

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

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

«На правах рукопису»

УДК _____ 621.314 _____

«До захисту допущено»

Науковий керівник кафедри

_____ С.П. Денисюк

« ____ » _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

спеціалізації Енергетичний менеджмент та енергоефективність

**на тему: «ВПЛИВ КОЛИВАНЬ ЧАСТОТИ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ
МЕРЕЖІ ТА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ГАРМОНІЧНОГО АНАЛІЗУ»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) VI курсу, групи ОН-61м

Шершень Олег Ігорович _____

Керівник:

доцент, проф, Волошко А.В. _____

Консультант з нормоконтролю:

ас. Прокопенко І.Д. _____

Рецензент:

Зайченко Стефан Володимирович, доцент,

д.т.н. каф. ЕМОЕВ _____

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

Студент _____

Київ – 2018 року

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1 Теоретичне підґрунтя для визначення впливу коливання частоти напруги мережі на показники її якості.

1.1 Нормативні документи, за допомогою яких контролюється і вирішуються проблеми вищих гармонік в енергетичних системах

1.1.1 Вимірювання якості електричної енергії

1.1.2 ДСТУ EN 50160

1.1.3 EN 61000. Напруга гармонік.

1.1.4 IEEE-519-1992. Вплив гармонік на електричні пристрої

1.1.5 Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення (СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-55_2011)

1.2 Огляд методів визначення гармонічного складу

1.3 Коливання частоти в електричній мережі та її вплив на точність визначення гармонічного складу напруги та струму.

РОЗДІЛ 2 Вищі гармоніки та їх вплив на ефективність роботи електричного обладнання

2.1 Вплив вищих гармонік на електроприймачі.

2.2 Девіація частоти енергетичних систем при вимірюванні потужності.

2.2.1 Несинусоїдальність напруги.

2.3 Визначення девіації частоти та аналіз її впливу. Матеріали та методи

2.3.1 Експерименти і результати

2.4. Корекція відхилення частоти

РОЗДІЛ 3 Виконання гармонічного аналізу за допомогою вейвлет-перетворення

3.1 Вейвлет-перетворення. Функції та застосування.

3.2 Реалізація вейвлет-перетворення

3.3 Економічні розрахунки збитків спричинених неякісними ПЯЕЕ.

РОЗДІЛ 4 СТАРТАП ПРОЕКТ

4.1 Опис ідеї методу

4.1.2 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

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

4.3.2 Потенційні групи клієнтів

4.3.3 Аналіз ринкового середовища

4.3.4 Аналіз пропозиції: загальні риси конкуренції на ринку

4.3.5 Детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М.

Портера)

4.3.6 SWOT-аналіз

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

4.4.1 Визначення стратегії охоплення ринку

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

4.5.1 Маркетингова концепція товару

4.5.2 Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару.

4.5.3 Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції

маркетингових комунікацій,

ВИСНОВКИ

ВСТУП

Електрична енергія - продукт, який за своїми особливостями відрізняється від будь-якого іншого продукту. Вона виробляється далеко від місця споживання, а крім точки споживання, впродовж кілометрів повітряних та кабельних ліній передавальної та розподільної мережі проходить через серію перетворень від одного рівня до іншого. Проходження через цей шлях може призвести до погіршення якості електричної енергії, високий рівень якої є необхідним для електричних приймачів/пристроїв. Підтримка якості напруги в основному є техніко-економічним завданням, оскільки поліпшення якості обумовлене певними заходами, для реалізації яких необхідні інвестиційні фонди.

Покупець електроенергії очікує, що електроенергія матиме такі властивості:

- наявність - передбачає необхідність для клієнта постійно отримувати електроенергію
- якість напруги - передбачає необхідність для замовника постачати напругу в обсязі, частоті, формі сигналу та симетрії, що відповідають його пристрою;
- економічна - передбачає необхідність покупця купувати електроенергію за найбільш вигідними цінами.

Якість електроенергії у розподільчих мережах залежить від:

- характеристики підключених до мережі споживачів, особливо від промислових споживачів із приводами, де переважають перетворювачі енергії, пристрої з високими пусковими струмами, прилади, що базуються на впливі електричної дуги, потужні однофазні приймачі;
 - топології та характеристик самої мережі (довжина і переріз ліній, ступінь навантаження трансформаторів і напруги, асиметрія фазового навантаження);
 - Напруги електричної мережі , а також електростанціями, підключеними до мережі.

РОЗДІЛ 1

Теоретичне підґрунтя для визначення впливу коливання частоти напруги мережі на показники її якості.

1.3 Нормативні документи, за допомогою яких контролюється і вирішуються проблеми вищих гармонік в енергетичних системах

1.3.1 Вимірювання якості електричної енергії

Нижче наведені показники якості електричної мережі у розрізі визначення гармонічного аналізу, за якими вони повинні бути збережені в допустимих межах[1], а також граничних значень відповідно до стандарту EN 50160.

Частота мережі

Номинальна частота змінного струму електроенергетичної мережі становить 50 Гц. Відповідно до мережевої політики, допустимої частоти від номінального значення при нормальних експлуатаційних і технічних умовах $\pm 0,5\%$ від номінального значення, в разі порушень в системі електроживлення, допускається більше відхилення.

Відповідно до стандарту EN 50160 значення частоти при нормальних робочих умовах, а саме десятисекундне середнє значення частоти в мережі має бути в наступних діапазонах:

- 50 Гц $\pm 1\%$ протягом 99,5% часу протягом року;
- 50 Гц + 4% / 6% в порівнянні з 100% часу, протягом року, на решті 0,5%.

Несинусоїдальна напруга (проблеми вищих гармонік)

Проблема нелінійності напруги обумовлена наявністю нелінійних імпедансів та перемикаючих елементів у системі. Поточні хвилі таких елементів не є суто синусоїдальними і вони містять компоненти вищих гармонік. Зварювальні пристрої, дугові печі, напівпровідникові перетворювачі (випрямлячі, інвертори) є типовими джерелами вищих гармонік.

Робота цих пристроїв супроводжується низкою негативних наслідків: додаткові втрати потужності та додаткове нагрівання в каналах, трансформаторах, роторних машинах, конденсаторних батареях, що призводить до прискореного старіння ізоляції електричних машин, приладів та кабелів, тобто зменшення надійності та терміну служби приладів та обладнання. Крім того, погіршується точність електричних вимірювань (наприклад, лічильників електроенергії), виникають перебої в роботі автоматики, мікропроцесорних систем управління та релейного захисту. У безпосередній близькості від таких споживачів практично неможливо використовувати телекомунікаційні лінії та пристрої передачі інформації.

Завдяки перерахованим вище проблемам, ставиться завдання точно визначити несинусоїдальність напруги, її спектральний склад та рівень гармонік напруги для обмеження та усунення. Квантифікація спотворень хвиль напруги може бути здійснена кількома способами, але з аспекту якості найкраще спостерігати його по відношенню до основної гармоніки. Це тому, що критерієм якості є "чиста синусоїда", тобто перша гармоніка, тому треба спостерігати будь-які спотворення щодо неї. Тому фактори індивідуального та сумарного гармонічних спотворень часто використовуються для кількісної оцінки несинусоїдальності напруги.

Норма EN 50160 пропонує таблицю зі значеннями вищих гармонічних напруг, які ніколи не повинні перевищуватись ніколи, тобто 95% часу десятихвилинних спостережень середніх ефективних значень напруги кожної окремої вищої гармоніки при нормальних робочих умовах протягом одного тижня.

Значення загального коефіцієнта гармонічного спотворення, розрахованого за формулою (включаючи усі гармоніки), має бути $THDU \leq 8\%$ [3].

$$THDU = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \quad (1.1)$$

Таблиця 1.1 Значення деяких вищих гармонік на джерелі живлення.

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
Непарні гармоніки, які не діляться на 3		Непарні гармоніки, які діляться на 3			
Звичайний номер h	U_h у % U_n	Звичайний номер h	U_h у % U_n	Звичайний номер h	U_h у % U_n
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Примітка. Не наведено значення для гармонік з порядком вище ніж 25, тому що вони звичайно невеликі та значною мірою непередбачені через резонансні явища.

Вимірювання гармонік і інтергармонік

Основною вимогою для вимірювання гармонік та інтергармонік є те, що вимірювання повинно бути безперервним, з базовим інтервалом обробки 200 мс. Кожен наступний інтервал 200 мс слід дотримуватися без переривання та перекриття. Це ставить додаткові вимоги до використання мікропроцесорів. Як результат, багато виробників не можуть відповісти на цей запит, оскільки вимагається постійна обробка зразків вхідного каналу, обчислення їх ефективного значення та збереження в пам'яті, а сам аналіз повинен виконуватися з кожним інтервалом 200 мс.

Основні вимоги до вимірювання гармонік та інтергармонік напруги пристроями класу А визначені в стандарті ІЕС 61000-4-7.

Крім того, на гармоніках та інтергармоніках необхідно застосувати принцип маркування. Якщо під час вимірювання відбувається переривання живлення, падіння напруги, збільшення напруги, швидких змін напруги, перехідних процесів та перенапруг, то значення, отримані з цих інтервалів, не використовуються у статистиці при порівнянні з граничними значеннями, встановленими EN 50160.

З точки зору результатів вимірювання, крім результатів для кожної вищої гармоніки в порівнянні з граничними значеннями, наведеними в EN 50160, (*Guidelines of Good Practice on the Implementation and Use of Voltage Quality Monitoring Systems for Regulatory Purposes*) пропонує наступні результати:

- для Гармоніки:
 - Для 3, 5 та 7 вищих гармонік - кількість значень, що перевищують граничне значення, запропоноване стандартом EN 50160.
 - Для 3, 5 та 7 вищих гармонік кількість значень, що перевищують 75% від граничного значення, запропонованого стандартом EN 50160.
 - значення загального гармонічного спотворення всіх непарних гармонік від 9 до 39,
 - значення сумарного гармонічного спотворення всіх гармонік від пари від 2 до 40.
 - значення THD 99%.
- Для інтергармоніки:
 - значення загального гармонічного спотворення від 2,5 до 39,5 (вищі міжгармоніки 0,5 та 1,5 пов'язані з мерехтінням, і вони виключаються з результату).

Вимірювання повинні бути виражені для кожної фази трифазної системи окремо.

Вимірювальні пристрої

У цьому розділі будуть запропоновані певні вимірювальні прилади для вимірювання якості напруги. Не має значення, на яке обладнання користувач прийме рішення, але важливо дотримуватися високих стандартів, які має це обладнання, перш за все в точності вимірювання та якості обробки результатів вимірювань. Нижче наведено таблицю з функціями найсучасніших офлайнових пристроїв для вимірювання якості електроенергії.

Таблиця 1.2 Функції найсучасніших офлайнових пристроїв для вимірювання якості електроенергії

Виробник	LEM (FLUKE)	LEM (FLUKE)	LEM(FLUKE)	METREL
Тип	МЕМОВOX 800	TOPAS	435-II	MI 2292 Power PLUS
Кількість вхідних напруг	3	4	4	3
Кількість вхідних напруг	4	4	4	3
Фазова напруга RMS та проміжна напруга RMS	При встановленні вимірювання вирішується, чи буде вимірюватися трикутник або зірка	Він вимірює і відображає обидва значення	Він вимірює і відображає обидва значення	Розрахунок струму в нейтральному провіднику

THD до гармонійного аналізу	Q версія вимірює напругу до 40 гармонік і THD, P версія вимірює THD U и THD I	+	+	+ до 50-ї гармоніки
Мерехтіння	Pst, Plt обчислюється в ПК	+	+	+
Події на нарузі	Він фіксує кількість подій, сортування за тривалістю та закінченням.	+	+	+
Виробник	LEM (FLUKE)	LEM (FLUKE)	LEM (FLUKE)	METREL
Тип	МЕМОВOX 800	TOPAS	435-II	MI 2292 Power PLUS
Перехідні процеси	-	Запис перехідних частот 0,5 МГц та 10 МГц	Запис перехідних процесів 200 кГц	+
Частота	З опцією (вимірювальна функція) Q	+	+	-
Інтергармонічна напруга	З опцією (вимірювальна функція) Q	+	+	-

Несиметрія	З опцією (вимірювальна функція) Q	+	+	-
Напруга сигналу	З опцією (вимірювальна функція) Q	+	+	-
Аналіз згідно EN 50160	Статична обробка даних на комп'ютері	Статична обробка даних на комп'ютері, аналіз причини помилки у системі, друк звітів	Відображення результатів вимірювань, діаграм та створення звітів про показники.	Статична обробка даних на комп'ютері

1.1.2 ДСТУ EN 50160

Напруга сигналів у мережах електропостачання

У деяких країнах електропостачальник може використати електромережі загальної призначеності для передавання сигналів. Протягом 99 % доби значення напруг сигналів, усереднені на трисекундному проміжку, мають бути меншими чи рівними значенням, наведеним на рисунку 1.1.

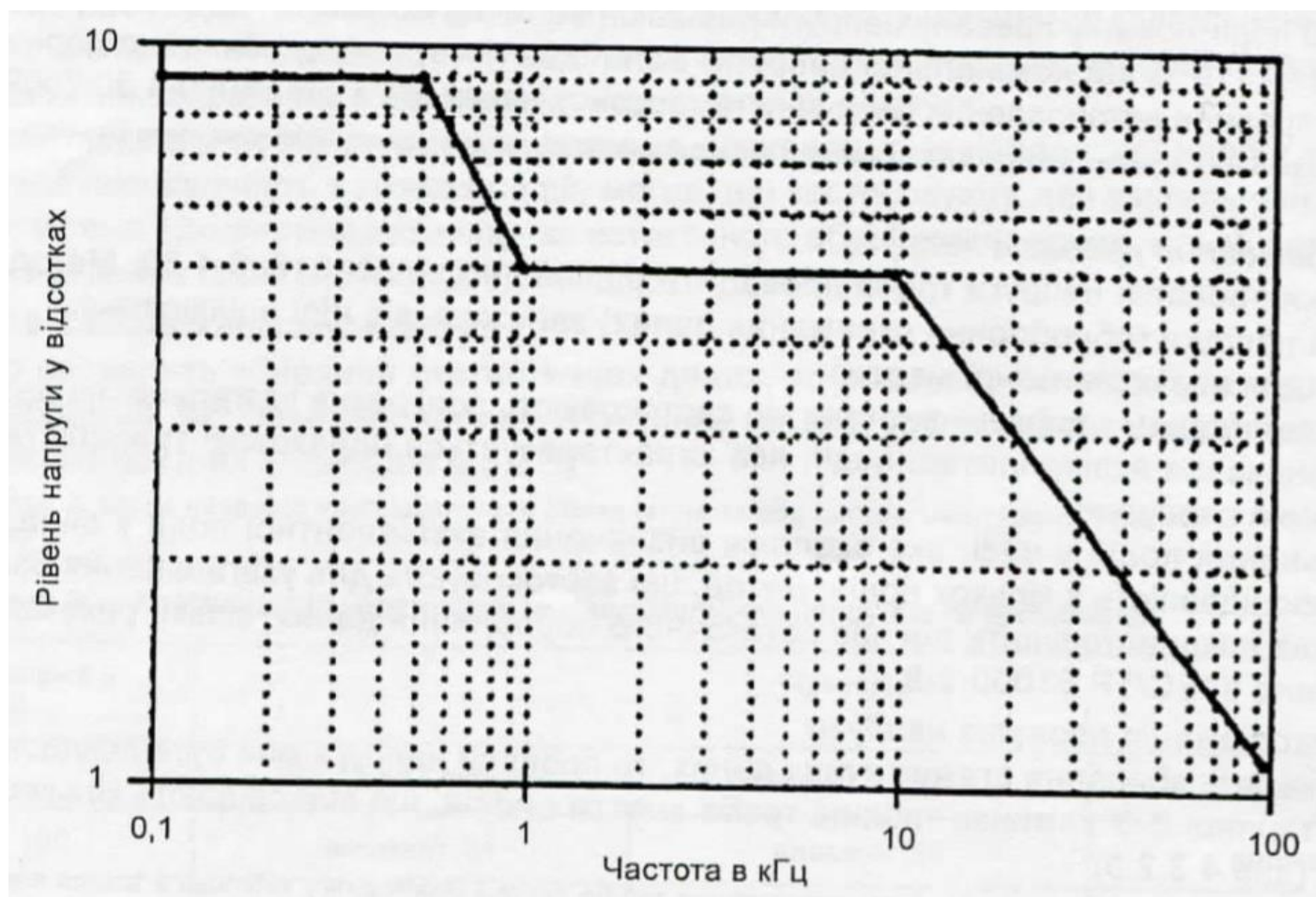


Рисунок 1.1 — Рівні напруги у відсотках від ІІІ залежно від частоти сигналів, що їх застосовують у мережах низької напруги загальної призначеності.

Примітка 1. В устаткованні користувача може бути використано проводи живлення, що передають сигнали в межах від 95 кГц до 148,5 кГц [1]. Незважаючи на те, що мережі низької напруги заборонено використовувати для передавання даних між користувачами, треба брати до уваги можливість у низьковольтній мережі напруги величиною до 1,4 В наведеної частоти. Щоб уникнути можливою взаємного впливу суміжних систем користувачів[1], що використовують такі сигнали, користувач мережею електропостачання може бути змушений здійснювати захист від цього чи вживати відповідних заходів щодо зменшення дії сигналів на устаткування.

Примітка 2. У деяких мережах в інтересах державних компаній можуть використовувати сигнали з частотами вище ніж 148,5 кГц[1]

Характеристики середньої напруги електропостачання. Загальні положення

Користувачі мережею електропостачання[1], що потребують потужність, яка перевищує можливості низьковольтної мережі, в основному, підключені до мереж із номінальною напругою вище ніж 1 кВ. Цей розділ стосується систем електропостачання із номінальною напругою до 36 кВ включно.

Примітка. Користувачів мережі електропостачання також можуть забезпечувати електроенергією за таких рівнів напруг, щоб забезпечити спеціальні вимоги або щоб знизити кондуктивне збурення від свого устаткування.

У цьому розділі [1] описано характеристики напруги електроенергії, що постачається мережами середньої напруги загальної призначеності. Під час цього треба розрізняти:

— безперервні явища, тобто відхилення від номінального значення, що мають місце протягом усього часу. Зазначені явища мають місце головним чином унаслідок особливостей навантаження, змін потужності навантаження, або нелінійного характеру навантаження[1];

— випадкові події з напругою, тобто раптові та істотні відхилення від нормальної чи бажаної форми кривої напруги. Це скоріше за все відбувається внаслідок непередбачуваних подій (наприклад, аварій) або зовнішніх причин (наприклад, погодних умов, дій третіх сторін).

Для деяких безперервних явищ визначено граничні величини[1] характеристик; для випадків, що пов'язані з напругою, на даний час може бути використано тільки орієнтовні значення (див. додаток В).

Величину напруги визначають декларованою напругою U_c .

Частота напруги електропостачання

Номинальна частота напруги електропостачання має бути 50 Гц. За нормальних робочих умов [1] середнє значення частоти основного складника напруги, яку виміряно на проміжку 10 с, має бути в межах:

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

50 Гц $\pm 1\%$ (тобто 49,5 Гц...50,5 Гц) протягом 99,5 % часу за рік;

50 Гц $+4\% - 6\%$ (тобто 47 Гц...52 Гц) протягом 100 % часу вимірювання;

— для мереж без синхронного підключення до об'єднаної енергосистеми (тобто для електро- постачальних систем типу енергетичний острів):

50 Гц $\pm 2\%$ (тобто 49 Гц...51 Гц) протягом 95 % часу за тиждень;

50 Гц $\pm 15\%$ (тобто 42,5 Гц...57,5 Гц) протягом 100 % часу вимірювання;

Примітка. Відповідний моніторинг зазвичай здійснює оператор диспетчерської служби району.

Напруга гармонік

За нормальних робочих умов [1] протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути меншими чи рівними значенням, що їх наведено в таблиці 4. Резонанси можуть спричинювати вищі напруги окремих гармонік.

Окрім того, СКГС напруги електропостачання (ураховуючи всі гармоніки до 40-ої включно) має бути меншими чи рівними 8 %[1].

Примітка. Обмеження порядку гармонік до 40 є загальноприйнятим. Залежно від типу використаного трансформатора, вимірювання гармонік високих порядків може бути невірним, додаткову інформацію наведено в EN 61000-4-30:2009, А.2.

Таблиця 1.3 — Величини напруг окремих гармонік до 25-го порядку в точках приєднання, у відсотках від напруги основного складника U

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
не кратні 3		кратні 3			
Порядок h	Відносна амплітуда u_h	Порядок h	Відносна амплітуда u_h	Порядок h	Відносна амплітуда u_h
5	6,0 %	3	5,0 % ^{a)}	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Примітка. Не наведено значення для гармонік з порядком вище ніж 25, тому що вони звичайно невеликі та значною мірою непередбачені через резонансні явища.

а) Залежно від побудови мережі величина третьої гармоніки може бути суттєво нижче.

Напруга сигналів у мережах електропостачання

У деяких країнах електропостачальник може використати електромережі загальної призначеності для передавання сигналів. Протягом 99 % доби значення напруг сигналів, усереднені на трисекундному проміжку, мають бути меншими чи рівними значенням, наведеним на рисунку 1.2.

Примітка 1. Уважають, що користувачі не використовують мережі середньої напруги загальної призначеності для пере-силання даних. Примітка 2. У деяких мережах в інтересах державних компаній можуть використовувати сигнали з частотами вище ніж 148,5 кГц.

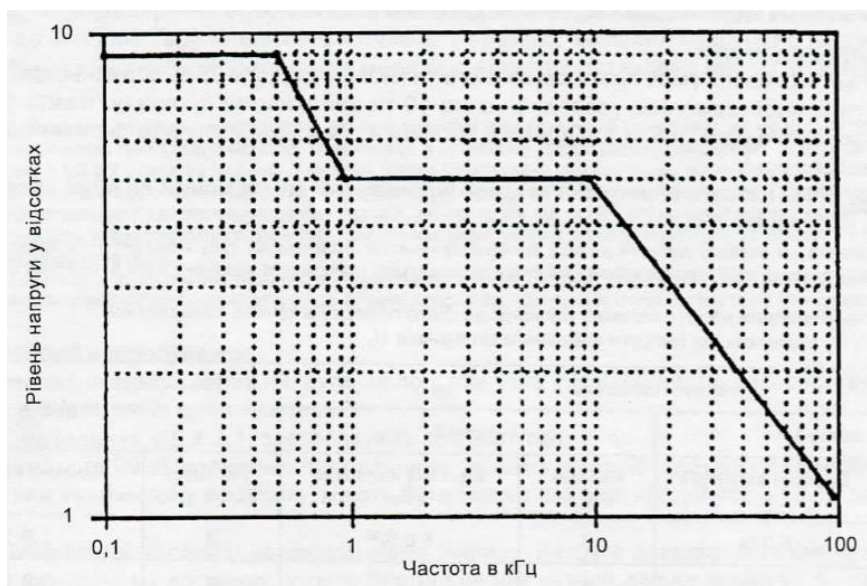


Рисунок 1.2 — Рівні напруги у відсотках від U_n залежно від частоти сигналів, що їх застосовують у мережах середньої напруги загальної призначеності.

1.1.3 EN 61000. Напруга гармонік.

Для цілей порівняльного аналізу слід використовувати місцеположення середньої та низької напруги. Необхідно представити окремі індекси (при наявності достатньої кількості моніторів) для основних підстанцій середньої напруги, з боку середньої напруги на підстанціях СН/ НН, з боку низької напруги на підстанціях СН/ НН, для місцеположень у НН-мережі та для терміналів постачання НН клієнтів.

10-хвилинну підгрупу гармонік слід розраховувати, як визначено в EN 61000-4-30 та EN 61000-4-7. Позначені значення через переривання, провали напруги, перенапруги, швидкі зміни напруги, перехідні напруги та перехідні перенапруги слід вилучити зі статистики.

Це призведе до 40 різних значень, всі з яких представляють інтерес для оператора мережі та національного регуляторного органу, але для цілей порівняльного аналізу потрібно скорочення. Для цілей порівняльного аналізу слід використовувати наступні "характеристики гармоніки", отримані за кожний 10-хвилинний інтервал:

- гармонічна підгрупа 3 (тільки в мережах НН);
- гармонічна підгрупа 5;
- гармонічна підгрупа 7;
- загальне гармонічне спотворення над усіма непарними гармонічними підгрупами порядку 9 - 39;
- загальне гармонічне спотворення над усіма навіть гармонічними підгрупами порядку 2 - 40.

Для кожного монітора, такі індекси місцеположення повинні бути розраховані на кожен календарний рік для кожного з вищевказаних гармонійних характеристик:

- 99% значення гармонійної характеристики протягом одного року;
- (для гармонійних підгруп 3, 5 та 7) Кількість значень, що перевищують значення EN 50160 протягом року;
- (для гармонійних підгруп 3, 5 та 7) Кількість значень, що перевищують 75% значень EN 50160 протягом року;
- Кількість 10-хвилинних інтервалів, протягом яких перевищено принаймні одне з обмежень EN 50160.

У трифазній системі ці чотири індекси повинні бути обчислені для кожного з трьох каналів напруги (фаза-фаза або фаза-нейтраль, в залежності від рівня напруги). Найбільше з трьох значень слід використовувати як основу для розрахунку системних індексів нижче.

Для системи, що має щонайменше 20 місць розташування моніторів, для кожного календарного року слід розрахувати наступні системні індекси:

- 95% значення 99% значень для кожного місцеположення;
- (для гармонічних підгруп 3, 5 та 7) 95% значення кількості значень, що перевищують обмеження EN 50160;
- (для гармонічних підгруп 3, 5 і 7) 95% значення кількості значень, що перевищують 75% від значень EN 50160;
- (для гармонічних підгруп 3, 5 та 7) Відсоток сайтів, для яких принаймні одне із значень перевищує обмеження EN 50160;
- (для гармонічних підгруп 3, 5 та 7) Відсоток ділянок, для яких принаймні одне із значень перевищує 75% від значень EN 50160;
- 95% значення кількості 10-хвилинних інтервалів, протягом яких перевищено принаймні одне з обмежень EN 50160.

1.1.4 IEEE-519-1992. Вплив гармонік на електричні пристрої.

Загальні положення. Ступінь, до якої можна допустити гармоніки, визначається сприйнятливістю навантаження (або джерела живлення) до них. Найменш чутливий тип обладнання - це той, в якому основний елемент нагрівний, як у духовці або в печі. У цьому випадку енергія гармонік зазвичай використовується і, отже, цілком допустима. Найбільш сприйнятливим видом обладнання є те, чий дизайн або конституція передбачає (майже) досконалий синусоїдальний фундаментальний ввід. Це обладнання часто відноситься до категорій обладнання для зв'язку або обробки даних. Тип навантаження, який звичайно падає між цими двома крайнощами сприйнятливості, є навантаження двигуна. Більшість моторних навантажень відносно терпимі до гармонік.

Навіть у випадку найменш чутливого обладнання гармоніки можуть бути шкідливими. Наприклад, у випадку печі, вони можуть викликати діелектричне термічне або вольтаїчне навантаження, що спричиняє передчасне старіння електричної ізоляції.

Двигуни та генератори. Основним ефектом гармонічних напруг та струмів в оберտальній машині (індукційна і синхронна) є збільшення обігріву через втрати в сталі і міді на частотах гармонік. Таким чином, гармонічні компоненти впливають на ефективність машини, а також можуть впливати на розвинений крутний момент.

Гармонічні струми в двигуні можуть викликати вищу звукоізоляцію в порівнянні з синусоїдальним збудженням. Гармоніки також створюють результуючий розподіл потоку в повітряному проміжку, що може спричинити або посилити явища, які називаються зусиллями (відмова плавно розпочинати) або повзання (дуже високі ковзання) в асинхронних двигунах[2].

Гармонічні пари, такі як п'ята та сьома гармоніки, мають потенціал для створення механічних коливань у комбінації турбогенераторів або в системі електроприводу. Механічні коливання призводять до коливань, викликаних взаємодією гармонічних струмів і основного частотного магнітного поля, збуджують механічну резонансну частоту. Наприклад, п'ята та сьома гармоніки можуть поєднуватись і утворити торсійний подразник на генераторі ротора на шостій частоті гармоніки. Якщо частота механічного резонансу близька до частоти електричного подразника, можуть бути створені механічні силові напруги.

Таблиця 6.1 визначає характерні гармонічні порядки, отримані від шестиімпульсного перетворювача, і передбачає ефект при застосуванні на виводах обертові машини. Кожна гармонічна напруга, 5, 7, 11 та ін, індукує відповідний гармонічний струм у статорі машини. Кожна з цих гармонік є позитивною чи негативною послідовністю, симетричною складовою загального струму. Ці струми викликають додаткове нагрівання в обмотках статора, що призводить до підвищення температури, викликаного фундаментальним струмом.

Таблиця 1.4 Шестімпульсний перетворювач гармонік

Гармоніка Замовлення	Частота Hz	Послідовність Мережі	Гармоніка статора	Гармоніка Обертання	Гармоніка ротора
1	60	+	1	Вперед	—
5	300	-	5	Назад	6
7	420	+	7	Вперед	6
11	660	-	11	Назад	12
13	780	+	13	Вперед	12
17	1020	-	17	Назад	18
19	1140	+	19	Вперед	18
23	1380	-	23	Назад	24
25	1500	+	25	Вперед	24

Ще одну, загалом більшу, стурбованість викликає в потоці гармонічних струмів у роторі. Потік кожного струму в статорі вироблятиме магнітомоторну силу в повітряній щілині, який буде викликати поточний струм у роторі машини. Точно так само, як кожна характерна гармоніка може бути визначена як позитивна або негативна послідовність, обертання цієї гармоніки буде або вперед, або назад у бік обертання ротора. П'ята гармоніка буде обертатися у зворотному напрямку (негативна послідовність), тому в роторі буде індукований струм гармоніки з частотою, яка відповідає чистій обертальній різниці між основною частотою повітряного зазору та п'ятою, тобто п'ятою плюсовою, або шостою гармонікою. Оскільки сьома гармоніка буде обертатися у прямому напрямку (позитивна послідовність), то в роторі буде індукований струм гармоніки з частотою, яка відповідає чистій різниці обертів між сьомою і основною частотою повітряного перерізу, тобто сьомому мінусовому, або шостій гармоніці. Таким чином, з точки зору нагріву ротора, п'ята та сьома гармоніки в статорі об'єднуються для отримання шостого гармонічного струму в роторі. 11-я та 13-а гармоніка діють так само, щоб

виробляти 12-й гармонійний струм у роторі і так далі з гармонійними парами вищестоящого порядку. Є дві основні проблеми з цими роторними гармоніками:

- (1) Результуючий роторний нагрів
- (2) Пульсуючий або зменшений обертовий момент

Величина нагріву ротора, яка може бути допустима, а також сума, яка виникає в даному випадку, залежить від типу ротора. Пошкодження роторних двигунів є більш суттєвим ніж у двигунів з короткозамкненим ротором. Збитки від втрат, як правило, більше турбують, ніж втрати в сталі. Сумарна дія гармонік полягає в зниженні ефективності та терміну служби машини. Гармонічне нагрівання, як правило, знижує продуктивність до 90-95% від того, що було б випробуване з застосуванням чистих фундаментальних синусоїдальних хвиль.

Ці твердження стосуються застосування двигунів у системах розподілу, що мають допустимий гармонійний вміст. Наприклад, вони не застосовуються до рейтингу двигуна, який повинен керуватися регульованим частотним інвертором. Типовий експлуатаційний двигун буде менше зазнавати пошкоджень ніж при роботі при номінальному навантаженні, коли напруга живлення збільшується (або зменшується) на 10%.

Як зазначалося вище, гармоніки також можуть викликати пульсуючий випуск крутного моменту. Це може вплинути на якість продукції, коли рухові навантаження чутливі до таких варіацій, наприклад, у деяких прядіннях синтетичного волокна або деяких металевих робочих областях. У випадках, коли суттєва інерція пов'язана з валом ротора, наприклад, в мотор-генераторі або генераторі двигуна, електрохімікати можуть викликати механічний резонанс. Отримані механічні коливання можуть спричинити втому вузла та прискорене старіння валу та пов'язаних з ним механічних частин.

Трансформатори. За винятком того, що гармоніки, що стосуються трансформаторів, можуть призвести до збільшення звукового шуму, вплив на ці компоненти зазвичай стає таким, що виникають при паразитичному нагріванні.

Ефект гармонік на трансформатори має подвійний характер: струмові гармоніки зумовлюють збільшення втрат в міді та втрати напружених потоків, а гармоніки напруги викликають збільшення втрат в сталі. Загальний ефект - збільшення обігріву трансформатора, порівняно з чисто синусоїдальною (фундаментальною) роботою[2].

IEEE C57.12.00-1987 пропонує обмеження на гармоніки в трансформаторному струмі. Верхня межа поточного коефіцієнта викривлення становить 5% при номінальному струмі. Рекомендована практика також дає максимальну середньоквадратичну перенапругу, яку трансформатор повинен витримувати в стаціонарному стані: 5% при номінальному навантаженні та 10% без навантаження. Гармонічні струми у прикладеній напрузі не повинні призводити до повної середньої напруги напруги, що перевищує цих оцінок.

Слід зазначити, що втрати трансформатора, викликані як гармонічними напругами, так і гармонічними струмами, залежать від частоти. Збитки збільшуються зі збільшенням частоти, і тому високочастотні компоненти гармонік можуть бути більш важливими, ніж низькочастотні компоненти при нагріванні трансформатора. Більш високі частотні гармоніки відбуваються з зменшеною амплітудою, яка має тенденцію скасувати їх більший ефект. Однак, певна фактична ситуація може мати невиправдано високі амплітуди для певних більш високих частот. IEEE C57.110-1986 дає рекомендації щодо очікуваних ефектів.

Потужності трансформатора можуть бути розділені на втрати навантаження та втрати без навантаження. Втрати навантаження можуть бути додатково розділені I^2R (втрат в обмотці) і паразитних втрат. Такі втрати мають особливе значення при оцінці доданого нагрівання через вплив хвилі несинусоїдального струму.

Блукаючі втрати - це втрати вихрових струмів внаслідок блукаючого електромагнітного потоку в обмотках, сердечника, пускача, магнітних щитах та інших структурних частинах трансформатора. Блукаюча втрата обмотки включає в себе втрати вихрових струмів провідника обмотки та втрати через циркуляційні струми між ланцюгами або паралельними обмотковими ланцюгами. Ця втрата зростатиме пропорційно до квадрата струму навантаження та квадрата частоти. Температура також зростатиме у структурних частинах через вихрові струми, знову приблизно як квадрат струму навантаження та квадрат частоти.

IEEE C57: 110-1986 наведено методику розрахунку для отримання втрат вихротокової потужності для даного трансформатора.

Силові кабелі. Кабелі, задіяні в системному резонансі можуть піддаватися напрузі стресу та короні, що може призвести до несправності ізоляції. Кабелі, які піддаються "звичайному" рівню гармонічного струму, схильні до нагрівання.

Потік несинусоїдального струму в провіднику призведе до додаткового нагрівання і більше, ніж очікується, для середньоквадратичного значення хвильової форми. Це пов'язано з двома явищами, відомими як "шкірний ефект" та "ефект близькості", обидва змінюються залежно від частоти, а також від розміру та інтервалу провідників. В результаті цих двох ефектів, ефективна опір змінного струму, R_{AC} , піднімається вище постійного опору, R_{DC} , особливо для більших провідників. Коли сигнал струму, багатий високочастотними гармоніками, протікає в кабелі, еквівалентний R_{AC} для кабелю піднімається ще вище, посилюючи втрату $I^2 R_{AC}[2]$.

З рисунка 1.3 видно, що ефект гармонійного нагрівання в кабелях зазвичай не викликає великого занепокоєння, однак, повинен забезпечити необхідне зацікавлення проблемою.

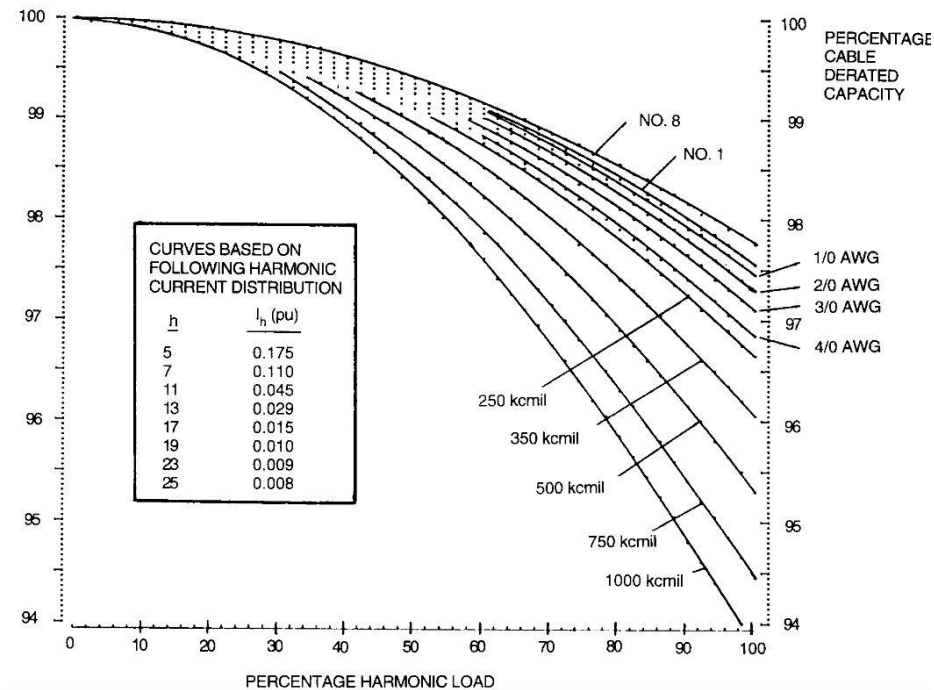


Рисунок 1.3 Зниження потужності кабелю проти гармонік з розподілом шестиімпульсного гармонічного струму

Конденсатори. Основною проблемою, пов'язаною з використанням конденсаторів в енергетичній системі, є можливість системного резонансу. Цей ефект накладає напругу та струми, які значно вищі, ніж це було б без резонансу.

Реактивна потужність конденсаторного банку зменшується з частотою, і тому банк виступає як раковина для вищих струмів гармоніки. Цей ефект збільшує нагрівання та діелектричні стреси. Часте перемикання нелінійних магнітних компонентів (наприклад, сталюого сердечника), таких як трансформатори та реактори, може призвести до гармонічних струмів, які додадуть до навантаження конденсаторів[2].

IEEE Std 18-1992 дає обмеження на напругу, струму та реактивну потужність для банків конденсаторів. Вони можуть бути використані для визначення максимально допустимих гармонічних рівнів.

Результатом підвищеного нагрівання та напруги, викликаного гармонікою, є скорочення часу роботи конденсатора.

Хоча попередня дискусія призначена для опису ефектів у пристроях розподілу електроенергії, таких як поліпшення коефіцієнта потужності або конденсатори з гармонічними фільтрами, слід зазначити, що інші конденсатори також можуть бути уражені. Наприклад, конденсатори, що використовуються в конденсаторних синхронних фазних двигунах, або ті, що використовуються в схемах випрямляча струму, будуть піддаватися подібним нагрівом та градієнтом напруги.

Електронне обладнання. силове електронне обладнання вразливе до неправильної роботи, викликаной гармонічним спотворенням. Це обладнання часто залежить від точного визначення нульових перетинів напруги або інших аспектів форми хвилі напруги. Гармонічне спотворення може спричинити зміну перетину нуля напруги або точку, в якій одна фаза напруги стає більше, ніж інша фаза напруги. Це обидва критичні моменти для багатьох типів елементів керування електронною схемою, а також може спричинити неправильне використання цих змін[2].

Інші види електронного обладнання можуть впливати на передачу гармонік через джерело живлення обладнання або шляхом магнітного з'єднання гармонік у компоненти обладнання. Комп'ютери та супутні пристрої, такі як програмовані контролери, часто потребують джерел змінного струму, які мають не більше 5% гармонічного коефіцієнта викривлення напруги, причому найбільша одинична гармоніка становить не більше 3% фундаментальної напруги. Вищий рівень гармонік призводить до нестабільностей, іноді гострих, несправностей обладнання, які в деяких випадках можуть мати серйозні наслідки. Інструменти можуть бути схожими на аналіз, надаючи помилкові дані або інакше виконуючи непередбачувані дії. Можливо, найбільш серйозними з них є нелінійні функції в медичних інструментах. Отже, багато медичних інструментів забезпечуються лінійно зумовленою потужністю. Менш драматичні ефекти інтерференції гармонік іноді можуть спостерігатися в радіо- та телевізійному устаткуванні, а також у

відеомагніторах та системах аудіорепродукції.

Оскільки більшість електронних пристроїв розташовуються на низькому рівні напруги пов'язаної з ним системи розподілу електроенергії, вона часто піддається впливу нарізання напруги. Зріз напруг зріз часто вводять частоти, як гармонічні, так і негармонічні, які значно вищі, ніж звичайно виставляються в системах розподілу 5 кВ та вищих напруг. Ці частоти можуть перебувати в діапазоні радіочастот (РЧ), і, як такі, можуть вводити шкідливі ефекти, пов'язані з підробленими РЧ. Ці ефекти зазвичай полягають в тому, що сигнальні перешкоди вводяться в схеми логіки або зв'язку. Інколи ефект просіювання має достатню потужність для перевантаження фільтрів електромагнітних перешкод (ЕМП) та аналогічних високочастотних чутливих ємнісних ланцюгів.

Вимірювання. На вимірювання та вимірювальні прилади впливають гармонічні компоненти, особливо якщо існують резонансні умови, що приводять до високих гармонічних напруг і струмів на ланцюгах. Індукційні дискові пристрої, такі як ватові лічильники, зазвичай бачать лише основний струм; однак фазовий дисбаланс, спричинений гармонічними спотвореннями, може спричинити помилкове функціонування цих пристроїв[2]. Дослідження показали, що можливі позитивні та негативні помилки при наявності гармонійних спотворень залежно від типу вимірювального приладу та пов'язаних гармонік. Загалом коефіцієнт спотворення повинен бути суттєвим ($> 20\%$), перш ніж виявляться значні похибки. Прилади-трансформатори 60 Гц, які використовуються як для вимірювання, так і ретрансляції, не впливають на звичайні рівні гармонік.

Розподільчі пристрої та реле. Як і в інших типах обладнання, гармонічні струми можуть збільшувати нагрівання та втрати в розподільчих пристроях, тим самим зменшуючи стаціонарну здатність струму та скорочуючи термін служби деяких ізоляційних компонентів.

Запобіжники страждають від зносу через нагрів, що утворюється гармоніками під час "нормальної" операції.

В даний час немає стандартів для рівня гармонічних струмів комутаційних пристроїв або запобіжників, необхідних для переривання або перенесення. Всі випробування виконуються при номінальній частоті подачі.

Комітет релейного захисту енергосистем енергетичного товариства IEEE підготував доповідь під назвою «Синусоїдальні хвилі на енергетичних системах та вплив на релейний захист». Цей звіт охоплює більшість типів спотворень, що відбуваються в енергетичних системах, та обговорює їх вплив на захисне реле. Звіт дає зрозуміти, що неможливо повністю визначити реакції ретрансляції через різноманітність використовуваних реле та варіацій характеру спотворень, що можуть виникнути, навіть якщо обговорення обмежується характерними гармоніками шестиімпульсного або 12-імпульсного перетворювача. Гармонічні величини та переважаючі гармонічні порядки можуть не тільки змінюватися, але й відносні фази можуть також різнитися[2]. Дві хвильові форми з однаковими характеристичними гармонічними величинами можуть суттєво відрізнятися, якщо їх гармоніки мають різні фазові кути відносно фундаментальних. Реле може реагувати по-різному на кожен форму хвилі, хоча кожен з них має однакову гармонічну величину. Звіт релейного комітету повідомляє:

"Захисні реле, як правило, не реагують на жодний ідентифікований параметр, такий як середньоквадратичне значення первинної кількості або базової частотної складової цієї кількості. У відповідному врахуванні характеристика реле до діапазону одиночних частотних входів не є свідченням того, як це реле реагує на спотворену хвилю, що містить ці частоти. Суперпозиція не застосовується. Багатопотокові реле можуть бути більш непередбачуваними, ніж одиночні вхідні реле у присутності хвильового спотворення. Реле реагування при спотвореному стані може відрізнятися між реле, що мають однакові номінальні основні частотні характеристики, а не лише між різними виробниками реле, а також між різними реле часу від одного виробника".

Канадське дослідження документів вплив гармонік на роботу реле наступним

чином[2]:

(1) Реле демонструють тенденцію працювати повільніше та / або з більш високими значками, а не працювати швидше та / або з меншими значеннями знімання.

(2) Статичні реле низької частоти схильні до суттєвих змін в робочих характеристиках.

(3) У більшості випадків зміни експлуатаційних характеристик відносно невеликі в порівнянні з помірним діапазоном спотворень, очікуваних під час звичайної роботи (наприклад, 5% гармонічних факторів).

(4) Для різних виробників реле перенапруги та перевантаження мають різні зміни в експлуатаційних характеристиках.

(5) Залежно від гармонічного змісту робочі моменти реле іноді змінюються.

(6) Реле імпедансу балансу пучка показує як перевитрату, так і недоступність, залежно від спотворень.

(7) Гармоніки іноді погіршують високошвидкісну роботу диференціальних реле. Деякі випробування показують, що реле може мати повну стриманість.

1.1.5 Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення (СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-55_2011)

Метод вимірювань гармонік напруги

Клас А. Вимірювання гармонік напруги за класом А виконують згідно із ГОСТ Р 51317.4.7–2008 клас І, на основних інтервалах часу 10 періодів без пропусків між інтервалами[3]. Як результати вимірювань на основних інтервалах часу треба застосовувати гармонічні підгрупи U_{sg_h} згідно з ГОСТ Р 51317.4.7–2008.

Примітка 1. У деяких випадках можуть бути кращими інші методи, наприклад, застосування аналогових засобів вимірювань і частотного перетворення сигналів (див, ГОСТ Р 51317.4.7–2008).

Примітка 2. Відомості про вимірювання гармонік струму наведено в [3].

Виконують вимірювання гармонік напруги не менше ніж 50-го порядку. За необхідності розрахунків коефіцієнтів спотворення (див. ГОСТ Р 51317.4.7–2008) сумарний коефіцієнт гармонічних підгруп THDSy визначають за ГОСТ Р 51317.4.7–2008.

Клас S. Вимірювання гармонік напруги за класом S виконують згідно з ГОСТ Р 51317.4.7–2008 клас II, на основних інтервалах часу 10 періодів. Пропуски інтервалів допускаються. Як результати вимірювань на основних інтервалах часу виробник [3] ЗВ має застосовувати гармонічні групи U_{gh} або гармонічні підгрупи $U_{sg\ h}$ згідно із ГОСТ Р 51317.4.7–2008. Виконують вимірювання гармонік напруги не менше ніж 40-го порядку.

Примітка. Згідно з ГОСТ 13109, що регламентують норми ПЯЕЕ, встановлено вимірювання гармонік напруги до 40-го порядку.

Згідно з ГОСТ Р 51317.4.7–2008 визначають сумарний коефіцієнт гармонічних груп THDGy в разі, якщо виконують вимірювання гармонічних груп U_{gh} , і сумарний коефіцієнт гармонічних підгруп THDSy— у разі, якщо виконують вимірювання гармонічних підгруп $U_{sg\ h}$ (див. ГОСТ Р 51317.4.7–2008).

Клас В. Метод вимірювань гармонік напруги встановлює виробник ЗВ.

Похибка вимірювань і діапазон вимірювань:

Клас А. Максимальну похибку вимірювань визначають відповідно до [3], клас I. Діапазон вимірів має бути від 10 % до 200 % значення рівня електромагнітної сумісності обстановки класу 3.

Клас S. Максимальна похибка вимірювань має у два рази перевищувати встановлену згідно з ГОСТ Р 51317.4.7–2008, клас II. Застосовувати низькочастотний фільтр, що виключає паразитивне накладення спектрів, із шириною смуги пропускання на рівні 3 дБ, яка дорівнює ширині смуги частот вимірювань, і ослабленням поза смугою пропускання понад 50 дБ згідно з ГОСТ Р 51317.4.7–2008, а також [3], не являється обов'язковим. Вимога до допустимого відхилення тривалості інтервалу часу між початком першого відліку

дискредитизованого сигналу і початком $M+1$ відліку (M — кількість відліків) не більше ніж 0,03 % згідно з ГОСТ Р 51317.4.7–2008.

Вимогу до максимальної похибки вимірювань треба виконувати у сфері значень впливних величин, згідно з [3]. Діапазон вимірювань має бути від 10 % до 100 % значення рівня електромагнітної сумісності обстановки класу 3.

Клас В. Похибку вимірювань і метод її розрахунку, а також діапазон вимірювань установлює виробник ЗВ.

Об'єднання результатів вимірювань

Об'єднання результатів вимірювань виконують відповідно до [3].

1.4 Огляд методів визначення гармонічного складу

У [4] була представлена методика, оцінки відхилення частоти в енергосистемі, а також усередненої швидкості її змін під час аварійних режимів, які можуть призводити до відхилення навантаження. Оптимальна оцінка застосування даного методу досягається тільки під час низькочастотних коливань за рахунок застосовування двохетапного алгоритму. При цьому використовується адаптивний розширений фільтр Калмана, за допомогою якого обчислюється відхилення частоти, амплітуди та фази кута напруги. Миттєве значення відхилення частоти використовується в якості вхідного сигналу на лінійний фільтр Калмана, який моделює відхилення частоти як випадковий процес.

Широко застосовуються методи вимірювання характеристик електропостачання шляхом так званого «нульового перетину». У [5] розглянуто метод *DSP (digital system processing)*, який може застосовуватись для опису динамічної поведінки енергетичної системи зі змінною основною частиною. Даний метод заснований на інтеграції нульового перетину та квазісинхронної інтерполяційної вибірки.

У [6] представлено частотні вимірювання спотворених сигналів за допомогою методів Фур'є і нульового перетину. За допомогою методу Фур'є проводиться цифрова фільтрація, а метод кодування перетину нуля застосовується для косинусних або синусних компонент вихідного сигналу, який, як правило, містить вищі гармоніки.

Також у [7] представлена нова техніка для швидкого відстеження частотних відхилень на основі перетину нульового рівня. Запропонований метод, який ґрунтується на узагальненні визначення нульового перетину до визначення рівня перетину. Це дає кілька оцінок частоти протягом одного циклу. Комбінована «найкраща оцінка» визначається відповідним середнім із цих оцінок (точність залежить від відхилень частоти).

У [8] пропонуються два алгоритми цифрової обробки сигналів для вимірювання відхилень частоти енергосистемах. Дані алгоритми основані на застосуванні квадратичних форм вибірок сигналу. При цьому вони забезпечують високу точність вимірювання в широкому діапазоні зміни частоти.

У [9] представлено три нові техніки вимірювання частоти. Перший – модифікований метод нульового перетину з використанням кривої відповідності дискретних відліків. Другий метод базується на номінальному ліфтингу квазістаціонарних фазових даних отриманих за рахунок застосування дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) (для обчислення швидкості зміни фази кута). Третій метод базується на обробці складного сигналу отриманого за допомогою квадратурної демодуляції. Всі три методи застосовуються при наявності незначних значень струму та гармонік.

[10] Більшість цифрових методів для вимірювання частоти мають прийнятну точність, якщо форми наруги не спотворені. Однак, через нелінійні навантаження (напівпровідникові випрямлячі, електродугові печі) напруга може містити вищі гармоніки. Метод вимірювання частоти, який запропоновано в [10], базується на основі цифрової фільтрації та методу оцінки Проні. Запропонований метод є більш

точним по відношенню до способу, який базується на вимірюванні кутової швидкості обертання фази напруги, але якщо тільки сигнал стаціонарний та синусоїдальний.

У даний час синусоїдальні фазові вимірювання стають важливим елементом широкомасштабних вимірювальних систем, що використовуються в системах моніторингу, захисту та керування системою електроспоживання [11]. Так в [12] запропонована техніка забезпечує точність оцінювання із роздільною здатністю 0,01–0,02Гц для приблизно номінального, номінального і поза номінальними частотами приблизно 20 мс. Також в [13] представлений метод вимірювання частоти (відмінного від номінального значення) методом найменших квадратів, та спосіб корекції результатів вимірювання у випадку відхилення напруги в електричній мережі від синусоїдального значення. В роботі [14] запропоновано новий підхід до розробки алгоритму визначення фази напруги та частоти в локальній системі. Проблема даного підходу розглядається як оптимізаційна задача. Алгоритм виводиться як ітераційна задача по методу Ньютона. Алгоритм показав надійність та високу точність в широкому діапазоні зміни частоти.

Також широкого застосування набули методи оптимального відстеження векторів напруги та відхилення частоти [15], які орієнтовані на моделях лінійного фільтра Калмана.

На даний час в електроенергетиці швидко розвивається так званий напрямок *PMU* (синхронні вимірювання)[16]. Їх застосування розглядається у взаємозв'язку реактивної та активної потужностей, що дає змогу поєднання питань напруги і стабільності частоти.

Синхронна вибірка [17] представляє собою широко використовуваний метод з хорошою продуктивністю. Проте, оптимальної дискретизації досягти неможливо, якщо сигнал містить інтергармоніки, небажані асинхронні відхилення між вибірками. Це все призводить до появи похибок. У роботі пропонується

застосування квазісинхронного вікна, для зменшення витоків на великі відстані, а також алгоритм компенсації.

Огляд літературних джерел показав, що існуючі цифрові алгоритми визначення показників якості електричної енергії, а саме гармонічного аналізу, базуються на обробці перетворених в код вибірок миттєвих значень фазних напруг та струмів електричної мережі. Дані значення беруться в еквідістантні моменти часу із подальшим застосуванням дискретного перетворення Фур'є (ДПФ).

1.3 Коливання частоти в електричній мережі та її вплив на точність визначення гармонічного складу напруги та струму.

У випадку відсутності коливань частоти в електричній мережі і частоти дискретизації ($f_d \geq 2 f_c$) процес гармонічного аналізу проводиться порівняно точно. Але як відмічалось раніше наявність спотворень електричної енергії призводить до методичної похибки вимірювань. Особливий вплив на точність вимірювання має нестабільність частоти електричної мережі. Як показують дослідження, більшість проблем виникає в тих випадках, коли процес дискретизації не синхронізований з основною частотою електричної мережі.

Найбільш близьким до пропонованого в роботі методом є метод усереднення впливу чистоти на точність проведення гармонічного аналізу шляхом вибору частоти дискретизації із послідуочим застосуванням інтерполяційних функцій. Застосування такого методу зменшує вплив нестабільності частоти, але потребує великого об'єму обчислень.

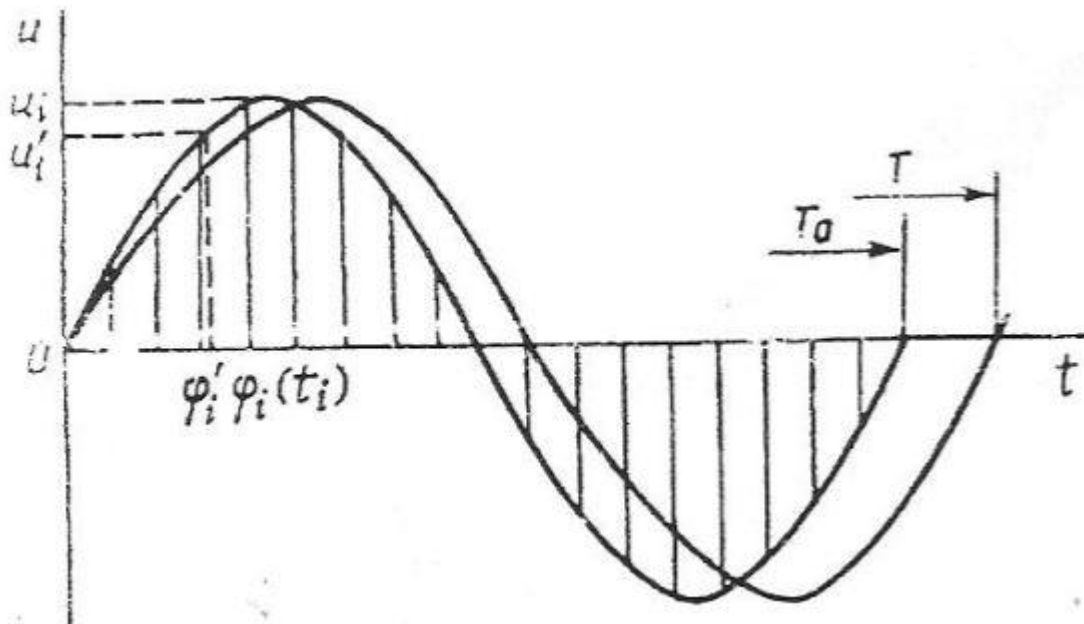


Рисунок 1.4 синусоїдальний сигнал напруги із періодом T , для якого розрахована частота дискретизації $f_d(\frac{1}{\Delta t})$.

Запропонований в роботі алгоритм зменшення впливу частоти електричної мережі заключається у наступному [18]. На рис.1.4 представлений синусоїдальний сигнал напруги із періодом T , для якого розрахована частота дискретизації $f_d(\frac{1}{\Delta t})$. Як видно із рис.1.4, миттєві значення U_i , які повинні мати фазові кути f (розрахований кут) мають кути f_i (дійсний кут). Розрахункові та дійсні кути миттєвих значень напруги будуть різнитись на величину $\Delta U = \frac{\Delta T}{N}$, де $\Delta T = T_0 - T$, N – число дискрет на періоді.

Як відомо, в основі ДПФ лежить операція множення миттєвих значень сигналу на відповідний йому вектор повороту[19]. У випадку синусоїдальних напруги u_i та струму i_e отримуємо наступні рівняння:

$$u_i = U_1 \sin \frac{2\pi \gamma l}{2n+1} + U_2 \cos \frac{2\pi \gamma l}{2n+1} \quad (1.2)$$

$$i_l = I_1 \sin \frac{2\pi \gamma l}{2n+1} + I_2 \cos \frac{2\pi \gamma l}{2n+1} \quad (1.3)$$

де $l = 0, 1, 2, \dots, n$ - дискретне число періоду T_0 , $2n + 1$ - число дискрет на періоді T , $\gamma = T_0/T$ - характеризує коливання періоду дискретизації від періоду T .

Після ряду математичних операцій отримаємо

$$P = UI[\cos(\varphi_u - \varphi_i) - \frac{\sin(2\pi\gamma)}{(2n+1)\sin(\frac{2\pi\gamma}{2n+1})} + \varphi_u + \varphi_i] \quad (1.4)$$

де відносна похибка:

$$\varepsilon(\gamma) = \left| \frac{\sin(2\pi\gamma)}{(2n+1)\sin(\frac{2\pi\gamma}{2n+1})} \right| \quad (1.5)$$

Як відмічалось у [19], невідповідність дійсного значення кута його розрахунковому значенню призводить до похибки визначення компонент Фур'є і, як наслідок, до похибки обчислення величин, які визначаються на їх основі.

Для підтвердження ефективності застосування корекції відносної похибки (1.5) була змодельована система напруг, яка дозволяла задавати гармонічний склад фазних напруг, несиметрію та невірноваженість системи напруг.

В дослідженні розглядалась система синусоїдальних напруг та система несинусоїдальна із коефіцієнтом несинусоїдальності $\leq 5\%$. Розрахунки виконували різними методами[19]. Для оцінки впливу нестабільності частоти використовувалось (1.5).

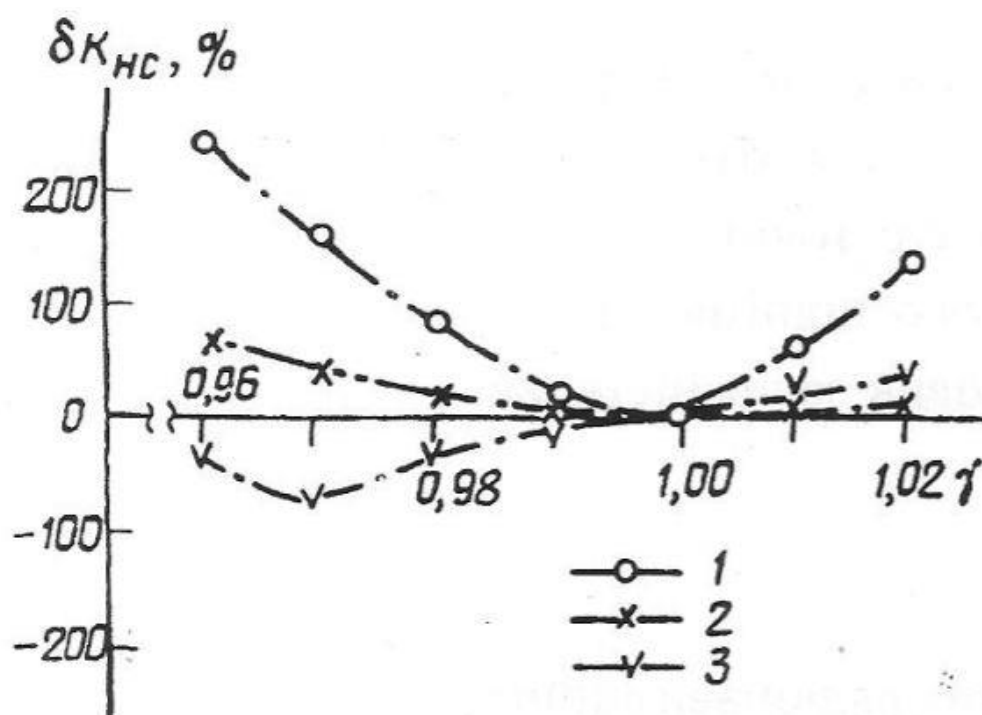


Рисунок 1.5 Графіки залежності відносної похибки $k_{НС}$

Аналіз проведених досліджень показав, що найбільший вплив нестабільності частоти має на точність визначення коефіцієнту несинусоїдальності ($k_{НС}$) та рівнів гармонічних складових напруги ($k_{u(n)}$). На рис.1.5 представлені графіки залежності відносної похибки $k_{НС}$ для фази А від нестабільності частоти електричної мережі у випадку несинусоїдальної, несиметричної напруги.

Як видно із рис.1.5 похибка різко зростає у випадку відхилення частоти електричної мережі від значення 50Гц, як у сторону її збільшення так і зменшення. Так у випадку $g=0,97$ ($f=48,5Гц$) і $k_{НС}=3\%$ відносна похибка визначення[19] $k_{НС}$ перевищує 150% (крива 1). Необхідно відмітити той факт, що у випадку $g=0,96$ ($f=48,0Гц$) і $k_{НС}=12\%$ похибка складає не більше 80% (крива 2).

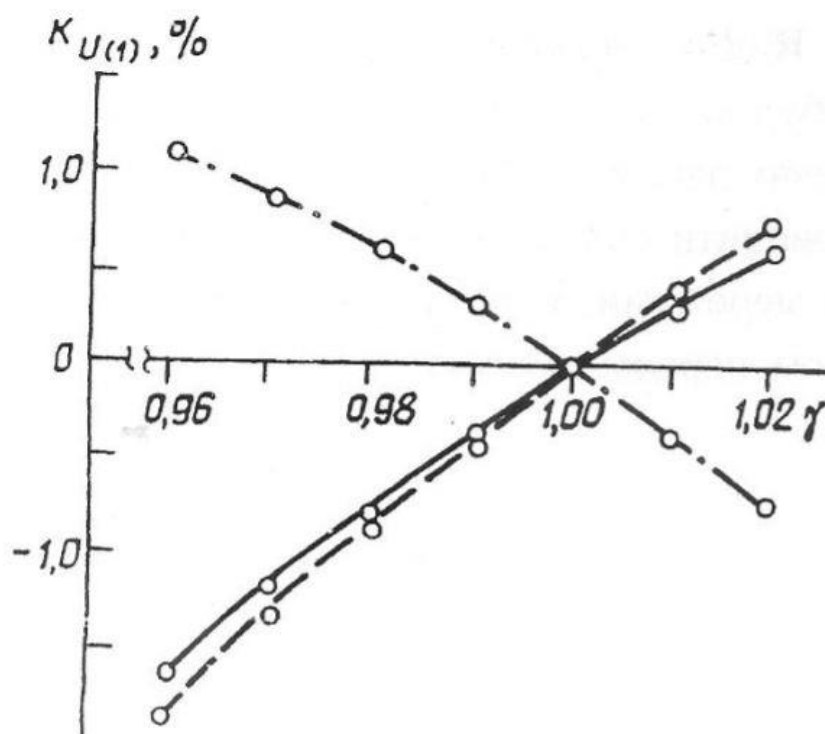


Рисунок 1.6 представлені графіки залежності відносної похибки $k_{\text{нн}}$

Також, на рис.1.6 представлені результати залежності відносної похибки визначення діючого значення основної гармонічної складової напруги від нестабільності частоти електричної мережі у випадку несиметричної неврівноваженої напруги[19]. Аналіз графіків рис.4 (залежність похибки визначення відхилень напруги від нестабільності частоти у випадку несинусоїдальності напруги ($k_{\text{нс}}=12\%$) показав, що на точність визначення даного показника суттєвий вплив надає вид несиметрії систем напруг. При цьому наявність фазової несиметрії (незалежно від амплітудної несиметрії) знижує значення похибки.

Аналіз результатів проведених досліджень дозволяє зробити декілька **висновків**.

1. Нестабільність частоти електричної мережі впливає на точність визначення показників якості електричної енергії.

2. Найбільший вплив даний параметр має на визначення величин, які відображають гармонічний склад системи напруг: коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги та коефіцієнт n -ої гармонічної складової напруги. На точність визначення даних величин також суттєво впливає і фаза сигналу напруги.

3. Похибка визначення величини відхилення напруги залежить від виду несиметрії – вона збільшується у випадку наявності амплітудної несиметрії і знижується у випадку появи фазової несиметрії.

Так як, в основному, похибка яка визвана нестбільністю частоти електричної мережі вноситься на етапі обчислення компонент Фур'є, то при їх визначенні пропонується враховувати величину невідповідності дійсного кута вибірки його розрахунковому значенню. Тобто,

$$X(k) = \sum_{l=0}^{2n} [\sum_{m=1}^n A_m \sin(\frac{2\pi lm}{N} \gamma_e + \varphi_m)] e^{-\frac{\gamma n l k}{N}} \quad (1.6)$$

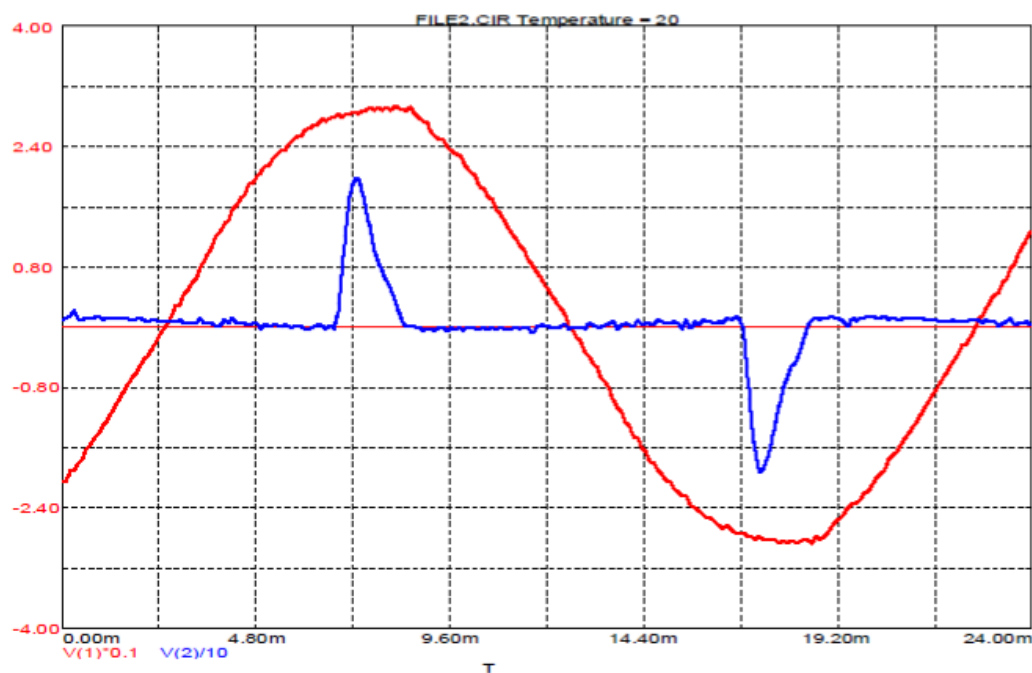
Де k – компонента Фур'є, A_m – амплітудне значення m -ої гармоніки, m – номер гармоніки, φ_m – фазовий кут m -ої гармоніки.

РОЗДІЛ 2

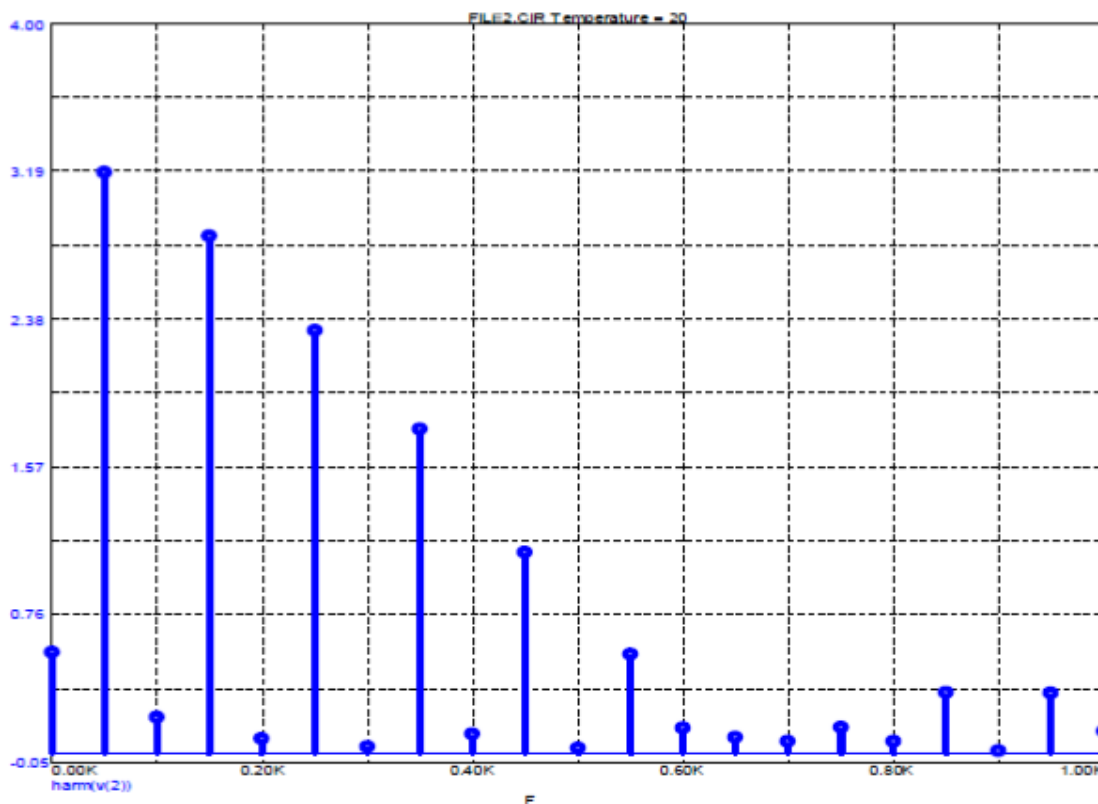
Вищі гармоніки та їх вплив на ефективність роботи електричного обладнання

2.2 Вплив вищих гармонік на електроприймачі.

Через нестаціонарність навантажень їх струми містять спектр вищих гармонік, які призводять до шкідливих явищ в електричних мережах і викликають небажані наслідки (рис. 2.1).



а



б

Рисунок 2.1 Вплив нелінійних джерел живлення на якість електричної енергії:

а – напруга, що живить, та споживаний струм; б– спектральний склад струму.

Вищі гармоніки в системах електропостачання можуть спричинити такі негативні наслідки [20]:

- *перегрів та руйнування нульових робочих провідників.* Більшість електричних мереж в Україні «старі», які проектувалися лише на лінійні навантаження; у них переріз нульового проводу дорівнює половині перерізу фазного проводу, тому що при лінійних навантаженнях струм, що протікає по нульовому провіднику, значно менше фазного струму. Але при нелінійному навантаженні струми нульового робочого проводу можуть перевищувати фазні струми майже у 1,73 рази через те, що навіть при симетричному навантаженні фазні струми вищих гармонік, порядок яких кратний трьом, утворюють систему

нульової послідовності, тобто в кожній фазі в будь-який момент часу ці складові будуть однаковими за величиною та за фазою. Тому при нелінійних навантаженнях струм в нульовому проводі дорівнює потрійному значенню струмів гармонік, кратних трьом;

- *неправильне спрацювання запобіжників та автоматичних вимикачів.*

Через додаткове нагрівання елементів захисних пристроїв внаслідок поверхневого ефекту[20] та ефекту близькості відбувається хибне спрацювання захисних апаратів. Це явище є найбільш характерним для автоматичних вимикачів, призначених для захисту ліній живлення комп'ютерної техніки;

- *прискорене старіння ізоляції проводів та кабелів*[20]. При підвищенні робочої температури струмоведучих провідників відбувається прискорення хімічних процесів в ізоляції, внаслідок чого її старіння відбувається значно швидше;

- *прискорене старіння ізоляції проводів та кабелів.* При підвищенні робочої температури струмоведучих проводів [20] відбувається прискорення хімічних процесів в діелектриках, внаслідок чого її старіння відбувається значно швидше;

- *додаткові втрати в силових трансформаторах.* Внаслідок поверхневого ефекту та ефекту близькості збільшується активний опір R обмоток трансформатора і, як наслідок, їх додаткове нагрівання; крім того вищі гармоніки викликають появу вихрових струмів в магнітопроводі трансформатора[20], що також збільшує додаткові втрати потужності та його нагрів;

- *спотворення форми синусоїди напруги живлення.* Струм, який споживається імпульсним навантаженням, викликає деформацію синусоїди напруги, що діє на затискачах навантаження. Синусоїда стає «плоскою» через те, що в момент імпульсу струму збільшується падіння напруги на внутрішньому опорі мережі[20]. Ця «плоска» синусоїда генерується на всіх елементах, що ввімкнені паралельно нелінійному навантаженню. Вказане явище викликає зниження стійкості до короточасних провалів напруг імпульсних джерел

живлення у зв'язку з тим, що спотворена синусоїда не встигає повністю зарядити конденсатори, що фільтрують, і енергії, яка в них запасеться, не вистачає для підтримання нормальної роботи кіл постійного струму;

- *підвищене зношення та передчасне руйнування конденсаторів та установок компенсації реактивної потужності.* Оскільки опір конденсатора зворотно пропорційний частоті, то конденсатор є елементом, який компенсує гармоніки з усієї мережі, тобто батареї конденсаторів замикають частину струму вищих гармонік на себе; через те, що опори елементів мережі мають індуктивний характер, то при використанні нелінійних елементів збільшується імовірність появи небажаних резонансних явищ[20];

- *збої в роботі та вихід з ладу комп'ютерної техніки та телекомунікації.* Збої відбуваються, коли силові лінії проходять досить близько до ліній телекомунікації та комп'ютерної техніки, так як вищі гармоніки, що протікають силовими лініями наводять завади в кабелях телекомунікації та в елементах мікропроцесорів[20];

- *зниження коефіцієнту потужності електроустановок споруд.* Вищі гармоніки носять реактивний характер, тому їх наявність в електричній мережі призводить до збільшення частки реактивної потужності, що в свою чергу викликає зниження коефіцієнту потужності;

- *передчасний вихід з ладу електричних двигунів.* Струми нульової послідовності створюють додаткове підмагнічування сталі, що призводить до погіршення характеристик електричних машин [20] та додаткового нагріву їх сердечників;

- *некоректний облік споживаної електроенергії.*

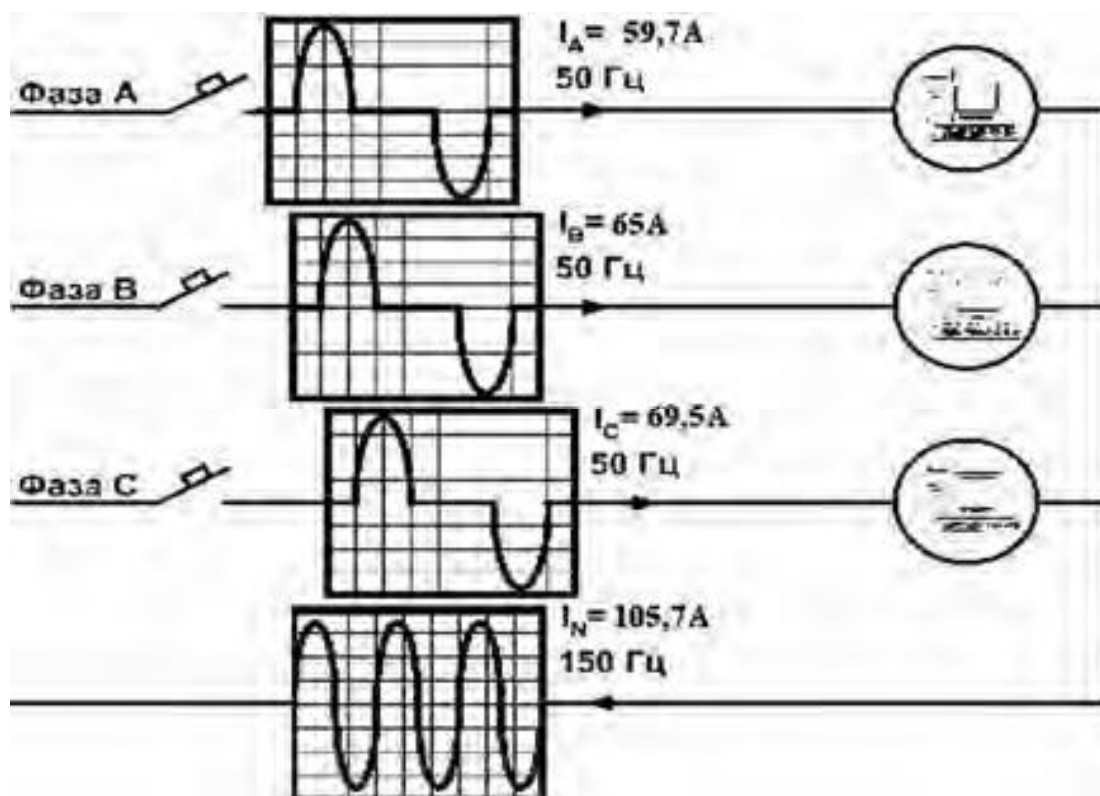
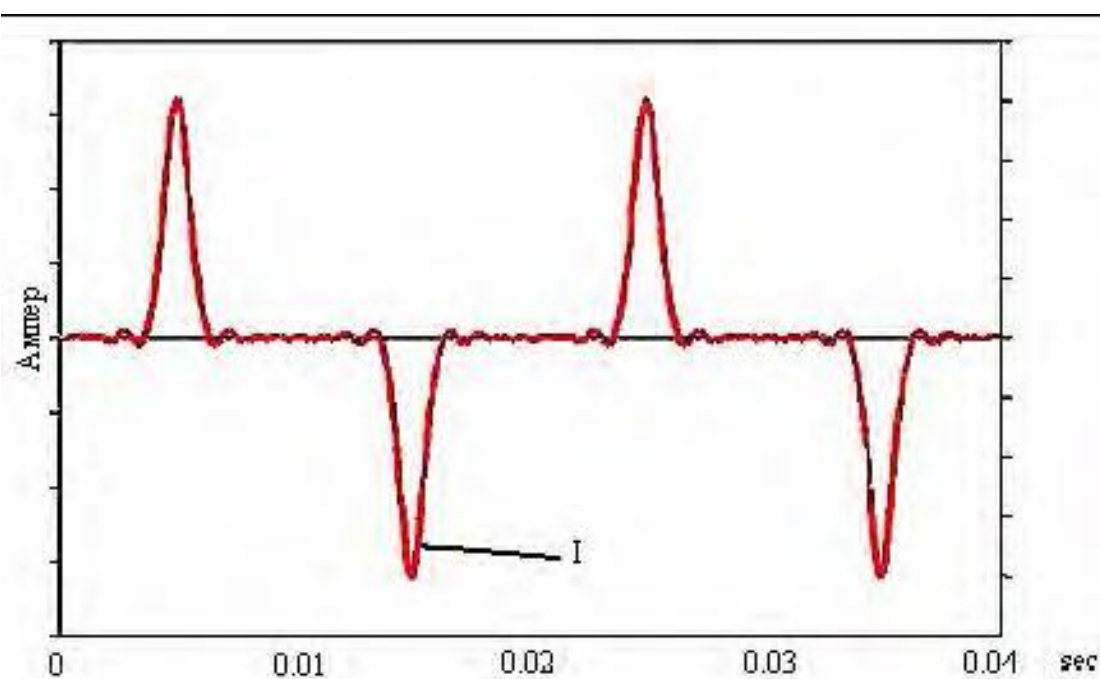


Рисунок 2.2 Вплив нелінійних джерел живлення на якість електричної енергії:

а – живляча напруга та споживаний струм; б– спектральний склад струму.

Всі названі явища є актуальними для будь-яких споживачів[20]. Беручи до уваги усе вище сказане, досить гостро постає питання про правильний та точний розрахунок електричних мереж, які будуть в змозі жити найрізноманітніші споживачі так, щоб вони не наносили шкоди один одному.

Оскільки всі заходи, що пов'язані з боротьбою з вищими гармоніками, пов'язані з великими капіталовкладеннями, то перш за все необхідно провести ретельний аналіз джерел вищих гармонік в системах електропостачання та особливостей їх роботи.

Щоб встановити справжній вплив та рівень вищих гармонік, необхідно провести їх електричні вимірювання [3]. Для цього необхідно використовувати спеціальні вимірювальні прилади, які чутливі до спектру вищих гармонік. Ці вимірювання проводяться як за допомогою безпосереднього апаратного аналізу самого процесу, здійснюючи це шляхом використання сучасних приладів-аналізаторів або ж проводити обробку попередньо зробленого запису процесу. Найчастіше для таких вимірів використовують шлейфові осцилографи та пристрої магнітного запису. Слід зазначити, що для систем електропостачання, в яких велика доля споживаної потужності [20] припадає на нелінійні споживачі, що працюють постійно, доцільно використовувати не звичайні прилади контролю параметрів електричної мережі, які розраховані для зчитування значень струмів та напруг частотою 50 Гц, а прилади, чутливі до більш широкого спектру частот. Ця рекомендація пов'язана з тим, що звичайні прилади не здатні уловлювати струми вищих гармонік, а через це будуть показувати значення менші, ніж ті, які насправді діють в мережі.

Моніторинг якості електричної енергії пов'язаний з проблемою вибору вимірювальних приладів. Встановлення стаціонарного обладнання, яке дозволяє контролювати усі показники якості електричної енергії, та пристроїв для боротьби з вищими гармоніками пов'язане зі значними капіталовкладеннями[20]. Але в розгалуженій мережі стаціонарне обладнання не дає очікуваного ефекту, оскільки з його допомогою важко виявити джерело збурень. Запропоновані сучасною промисловістю портативні пристрої, хоча і можуть здійснювати всі необхідні вимірювання, але є іноземного виробництва та коштують десятки тисяч гривень, що є недоступним для українських реалій. У зв'язку з цим постала проблема необхідності розробки [20] власного портативного пристрою для вимірювання показників якості електричної енергії.

Щоб вирішити завдання проведення електричних вимірювань у будь-якій точці системи електропостачання, у [20] було проведено розробку точного, швидкодіючого, простого у застосуванні та відносно дешевого пристрою для вимірювання показників якості електричної енергії.

Для досягнення цієї мети пропонується необхідно використовувати сучасні мікропроцесорні пристрої, зокрема мікроконтролер сімейства AVR компанії *ATMEL Atmega 8*, який може бути застосований у ролі АЦП.

AVR-архітектура, на основі якої побудовані мікроконтролери сімейства AVR, поєднує потужний Гарвардський RISC-процесор (*Reduced Instruction Set Computer* – обчислювач з обмеженим набором команд) з роздільним доступом до пам'яті програм і даних, 32 регістра загального призначення[20], кожен з яких може працювати, як регістр-акумулятор, і розвинену систему команд фіксованої 16-бітної довжини. Більшість команд виконуються за один машинний акт з одночасним виконанням поточної команди і вибіркою наступної команди, що забезпечує продуктивність до 1 MIPS на кожний МГц тактової частоти. До складу мікроконтролера *Atmega 8* входить 10-бітний АЦП. Аналого-цифрові

перетворювачі мікроконтролерів AVR працюють за принципом послідовного наближення або за методом «зважування» [20].

Для виведення інформації з мікроконтролера на ПЕОМ потрібно використовувати *HID*-пристрій (*Human Interface Device*) – це пристрій зв'язку з користувачем. У якості ПЕОМ рекомендується використовувати ноутбук. Через *HID*-пристрій мікроконтролер підключається до *USB*-порту ноутбука і здійснює передачу інформації про параметри електричного сигналу.

Для обробки і аналізу цієї інформації [20] розробляється програма на основі програмного середовища «*AVR Studio*» – це потужний сучасний програмний продукт, що дозволяє проводити всі етапи розробки програм для будь-яких мікроконтролерів серії AVR. Він має спеціалізований текстовий редактор для написання програм. Схема вольтметра проектується за допомогою програми *PonyProg*, основною задачею якої є програмування логічних мікросхем. Для забезпечення наочності застосовується програма *USB-Осцилограф 1.0*, яка створена засобами мови програмування *Delphi 7.0*.

Delphi 7.0 дозволяє за допомогою стандартного модуля *CANVAS* досить наочно відобразити сигнал, який приймається з пристрою. Оскільки мікроконтролер здатний працювати з напругами до 6 В, то в даному пристрої потрібно використовувати вимірювальні трансформатори напруги. Для проведення вимірювань без розмикання електричних кіл у схемі пропонується використовувати вимірювальні кліщі вищих гармонік в електричній мережі та їх характер конкретного споживача[20]. Що дозволить вживати організаційні та технічні заходи щодо зменшення їх впливу на електричну мережу.



Рис. 2.3 Структурна схема пристрою для вимірювання показників якості електричної енергії

2.2 Девіація частоти енергетичних систем при вимірюванні потужності.

Вступ.

Електрична енергія як товар використовується у всіх сферах життєдіяльності людини, володіє сукупністю специфічних властивостей і бере безпосередню участь при створенні інших видів продукції, впливаючи на їх якість. У зв'язку з цим питання точності вимірювання електричної енергії в електричних розподільних мережах є актуальним.

Для обліку електричної енергії в системах електропостачання в даний час застосовуються як індукційні, так і електронні лічильники електроенергії. Причому останні часто будуються на основі аналогово-цифрових перетворювачів з використанням мікропроцесорних обчислювачів, тобто в процесі обчислення електроенергії застосовується дискретизація вимірювань за часом та квантування вхідних сигналів, пропорційних поточних значень струму і напруги на навантаженні, що неминує спричиняє похибка обчислення енергії.

В якості електронних приладів обліку сьогодні використовуються спеціально розроблені лічильники, що забезпечують з досить високою точністю визначення поточного значення електричної енергії $W(t)$ у порівнянні з індукційними лічильниками, у відповідності з виразом[21]:

$$W(t) = \int_0^t u(t)i(t) dt \quad (2.1)$$

де $u(t)$ – миттєве значення напруги навантаження; $i(t)$ – миттєве значення струму навантаження; t – поточний час вимірювання.

У структурній схемі такого лічильника як перемножувача миттєвих значень $u(t)$ і $i(t)$ використовується імпульсний інтегратор, імпульсний перемножуючий пристрій, цифровий лічильник імпульсів, що дає можливість забезпечити дуже низьку загальну похибку вимірювання поточного значення електроенергії (порядку декількох десятих часток відсотка) в умовах значного рівня вищих гармонік на кратних частотах 50 Гц, аж до частот у кілька десятків кілогерц, і використовувати його для зразкового вимірювання електричної енергії.

Точність обліку електричної енергії, яка проходить через КВП-пристрій (лічильник), багато в чому залежить від параметрів якості електричної енергії (ЯЕ). Кожен електроприймач призначений для роботи при заданих параметрах електричної енергії: номінальній напрузі, частоті, струмі і т. п., тому для його нормального функціонування повинна бути забезпечена необхідна якість електроенергії[21]. Таким чином, якість електричної енергії визначається сукупністю її характеристик, при яких електроприймачі (ЕП) і контрольно-вимірювальні прилади можуть нормально працювати і виконувати закладені в них функції.

Показники якості електричної мережі які стосуються теми дисертації детально описані у першому розділі даної роботи.

2.2.1 Несинусоїдальність напруги.

В процесі генерації, перетворення, розподілу і споживання електроенергії мають місце спотворення форми синусоїдальних струмів і напруг. Несинусоїдальність форми струму в основному визначається електроприймачами з нелінійною характеристикою. До них, зокрема, відносяться вентиляльні перетворювачі, електродугові сталеплавильні печі, випрямлячі, газорозрядні лампи, зварювальне обладнання та ін. Вимірювання електроенергії при наявності вищих гармонік проводиться з похибкою, знак якої може бути як «+», так і «-». При відхиленні частоти на 1 Гц похибка лічильника може досягати 0,5 %. Відомо, що будь-яку несинусоїдальну функцію $f(\omega t)$ (наприклад, див. рис. 2.4), що

задовольняє умови Діріхле[19], можна показати у вигляді суми постійної величини і нескінченного ряду синусоїдальних величин з кратними частотами (гармонічні складові). Синусоїдальна складова, період якої дорівнює періоду несинусоїдальної періодичної величини, називається основною (першою) гармонікою. Інші складові синусоїди з частотами з другої по n-ну називають вищими гармоніками.

Несинусоїдальність напруги характеризується наступними показниками:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги.
- коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги.

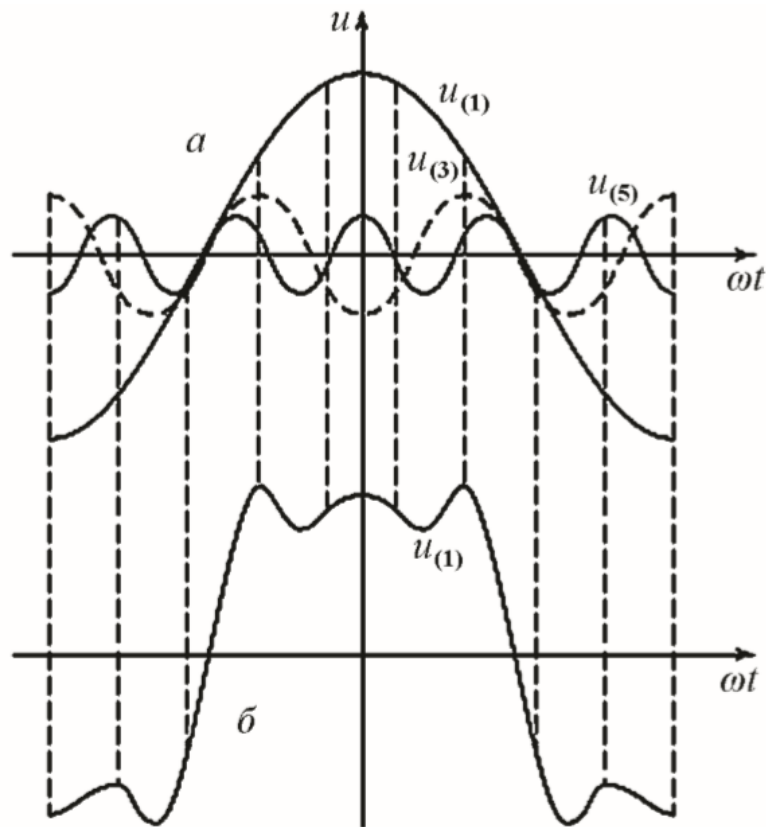


Рисунок 2.4 – Несинусоїдальність напруги: а – гармонічного складу напруги (1, 3, 5-а гармоніки), б – результуюча (спотворена форма кривої)

Коефіцієнт спотворення [21] синусоїдальної кривої напруги K_U визначається за виразом:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

де $U(n)$ – дійсне значення n -ої гармонійної складової напруги; V, n – порядок гармонійної складової напруги; N – порядок останньої з обліковуються гармонійних складових напруги, стандартом встановлюється $N = 40$; $U(1)$ – дійсне значення напруги основної частоти, В.

Коефіцієнт n -ої гармонічної складової напруги дорівнює:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

Для обчислення необхідно визначити значення напруги окремих гармонік, що генеруються нелінійним навантаженням. Нормально допустимі та гранично допустимі значення KU є нормованими величинами.

Насиченість систем електропостачання з нелінійними та потужними джерелами, як джерелами, так і споживачами електроенергії призвела до того, що сигнали в мережі стають нестационарними, нелінійними та значними коливаннями частоти. Метою роботи є зменшення методологічної похибки визначення параметрів режиму споживання електроенергії через відхилення частоти в електричній мережі. У статті запропоновані методи, засновані на визначенні значення відхилення частоти та введення корекційних коефіцієнтів (наприклад, при розрахунку активної потужності та напруги в електричній мережі). Запропоновані методи застосовуються як для синусоїдальної, так і несинусоїдальної форм сигналу. Результати показують, що ці методи мають високу точність, навіть із сигналами, що містять гармоніки, і для частоти, що відхиляється від номінального значення.

Погіршення якості електроенергії спричиняє помилки в вимірювальних пристроях. В даному випадку особливе занепокоєння викликає вплив

нестабільності частоти в мережі та наявність гармонік. В літературі було запропоновано ряд методів, що зменшують вплив цих факторів на вимірювання.

Огляд літератури

Обговорюються помилки в фазах через частотний дрейф та запропоновано нове ефективне корекційне поле для похибок. [22]. Термін корекції обчислюється по принципі циклу за циклом, і він реагує так швидко, як зміна частоти може бути обчислена. Проте з цього посилання не зрозуміло, наскільки рівняння визначають наявність гармонік та відхилення частоти в сусідніх періодах.

Особлива проблема виникає, коли процес відбору зразків не синхронізується з основним компонентом аналізу сигналу. У [23] ця похибка (асинхронний ефект вибірки) мінімізується шляхом регулювання кількості вибірок n так, що різниця між інтервалом підсумовування та часом для завершення інтегральної кількості циклів вхідного сигналу менша, ніж один інтервал вибірки. Показано, що максимальна похибка обернено пропорційна кількості зразків і не залежить від частоти сигналу.

Деякі методи були запропоновані для зменшення впливу нестабільності частоти мережі і наявності гармонік. У [24] розглянуто відповідні вікна та алгоритми інтерполяції для зменшення небажаних ефектів через спектральні витоки, спричинені процесом відбору проб, який не синхронізовано, а в роботі [25] сигнал зважується перед розрахунком дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Частоти і комплексні амплітуди різних компонентів сигналу отримують з ДПФ шляхом інтерполяції.

Фазова похибка не може бути зменшена за допомогою будь-яких кінчних вікон. Використання методів інтерполяції може фактично зменшити цю похибку, але вимагає багато обчислень, а також залежить від незначних гармонійних перешкод [26,27]. Тому прості та швидкі методи необхідні для зменшення впливу відхилення частоти на точність вимірювання. У цій роботі запропоновані методи визначення відхилення частоти. Обчислене відхилення частоти потім

використовується для виправлення рівнянь, що використовуються в алгоритмах для обчислення споживання енергії. Запропоновані методи є простими, точними та швидкими.

2.3 Визначення девіації частоти та аналіз її впливу. Матеріали та методи

Розглянемо, що сигнали напруги живлення, $u(t)$, та струму, $i(t)$, мають синусоїдальну форму

$$u(t) = U_1 \sin \frac{2\pi t}{T} + U_2 \cos \frac{2\pi t}{T}, \quad i(t) = I_1 \sin \frac{2\pi t}{T} + I_2 \cos \frac{2\pi t}{T}. \quad (2.3)$$

Для того, щоб визначити $u(t)$ та $i(t)$ в рівновіддалені моменти часу, t_l де,

$$t_l = \frac{lT_0}{2n+1}, \quad (2.4)$$

$l = 0, 1, 2, \dots, n$ дискретне число, T_0 це період, протягом якого здійснюється дискретизація, тобто вікно, а $2n+1 = N \in$ дискретним числом вибірок в період T , можна отримати дві періодичні послідовності

$$u_l = U_1 \sin \frac{2\pi \gamma l}{2n+1} + U_2 \cos \frac{2\pi \gamma l}{2n+1}, \quad i_l = I_1 \sin \frac{2\pi \gamma l}{2n+1} + I_2 \cos \frac{2\pi \gamma l}{2n+1}, \quad (2.5)$$

де $\gamma = T_0/T$ це подільність періоду, що характеризує відхилення періоду дискретизації T_0 від періоду сигналу T . При відсутності відхилення частоти вхідного сигналу, $\gamma = 1$. Як добре відомо, $\gamma < \text{або} > 1$ вказує на гармонічну перешкоду, яка є відповідальною за похибку "витоку великого діапазону", яка впливає як на амплітуду, так і на фазу. Вплив цього відхилення при визначенні активної потужності досліджено на прикладі.

Загальне рівняння для потужності можна записати як:

$$P = \frac{1}{2n+1} \sum_{l=0}^{2n} u_l i_l, \quad (2.6)$$

Підставляючи рівняння (2.5) у рівняння (2.6) отримаємо:

$$P = \frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{2} + \frac{1}{2n+1} \left(\frac{U_2 I_2 - U_1 I_1}{2} \sum_{l=0}^{2n} \cos \frac{4\pi \gamma l}{2n+1} + \frac{U_1 I_2 + U_2 I_1}{2} \sum_{l=0}^{2n} \sin \frac{4\pi \gamma l}{2n+1} \right). \quad (2.7)$$

Рівняння (2.7) можна перетворити і записати як:

$$P = \frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{2} + \frac{\sin 2\pi \gamma}{(2n+1) \sin \left(\frac{2\pi \gamma}{2n+1} \right)} \left(\frac{U_2 I_2 - U_1 I_1}{2} \cos \frac{4\pi \gamma n}{2n+1} + \frac{U_1 I_2 + U_2 I_1}{2} \sin \frac{4\pi \gamma n}{2n+1} \right) \quad (2.8)$$

Підставляємо

$$U_1 = \sqrt{2}U \cos \psi_u; \quad U_2 = \sqrt{2}U \sin \psi_u; \quad I_1 = \sqrt{2}I \cos \psi_i; \quad I_2 = \sqrt{2}I \sin \psi_i; \quad (2.9)$$

Рівняння (2.8) може бути записано як:

$$P = UI \left(\cos(\psi_u - \psi_i) - \frac{\sin 2\pi \gamma}{(2n+1) \sin \left(\frac{2\pi \gamma}{2n+1} \right)} \cos \left(\frac{4\pi \gamma n}{2n+1} \right) + \psi_u + \psi_i \right). \quad (2.10)$$

Аналогічним чином, ефективне значення квадрата сигналу напруги, $u(t)$, може бути записано як:

$$U_{eff}^2 = \frac{1}{2n+1} \sum_{l=0}^{2n} u_l^2. \quad (2.11)$$

Підставляючи рівн. (2.5) в рівн. (2.10), а після деяких математичних маніпуляцій, рівн. (2.9) можна записати у формі:

$$U_{eff}^2 = U^2 \left(1 - \frac{\sin(2\pi\gamma)}{(2n+1)\sin\left(\frac{2\pi\gamma}{2n+1}\right)} \cos\left(\frac{4\pi\gamma n}{2n+1} + 2\psi_u\right) \right). \quad (2.12)$$

Це видно з рівн. (2.10) та (2.12), що відносна похибка, $\xi(\gamma)$, при визначенні активної потужності P та ефективного значення напруги, пропорційна

$$\xi(\gamma) = \left| \frac{\sin(2\pi\gamma)}{(2n+1)\sin\left(\frac{2\pi\gamma}{2n+1}\right)} \right|. \quad (2.13)$$

2.3.1 Експерименти і результати

Результати обчислення рівн. (2.13) для різних значень n показані на рис. 1..

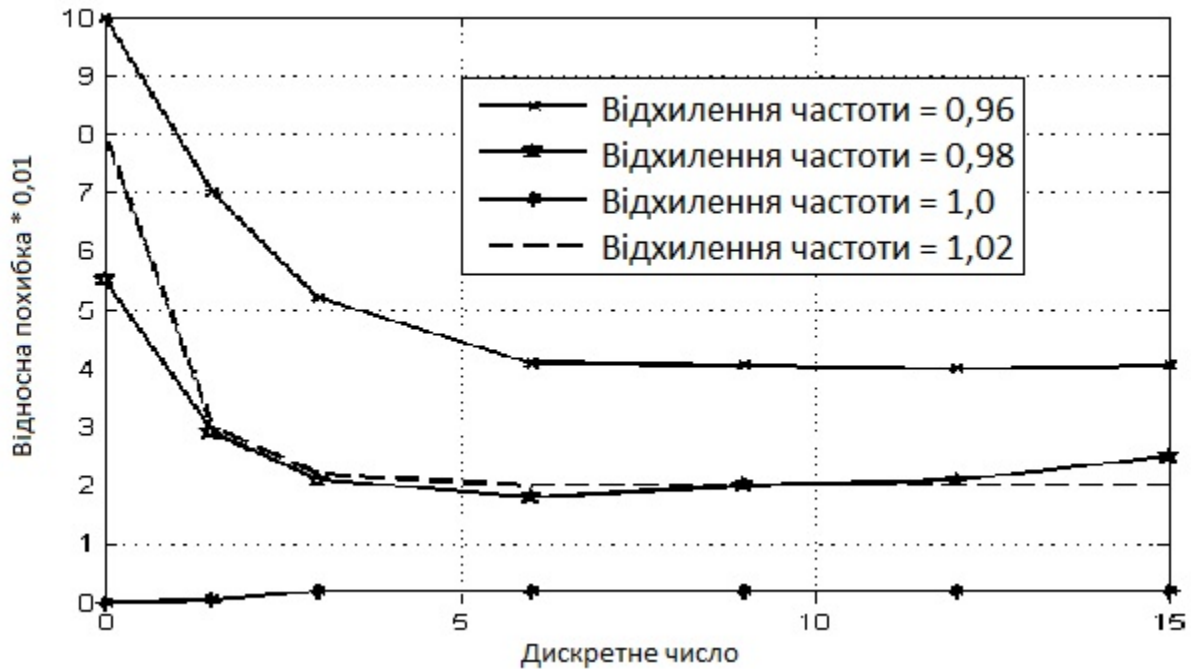


Рисунок 2.5 - Вплив відхилення частоти γ а рівень ξ як функцію від n .

Аналіз на рис.1 показує наступне:

- (і) для синусоїдальних $u(t)$ та $i(t)$, та $\gamma <$ або $>$ значення відносної похибки, як правило, обмежується діапазоном від 0,02 до 0,05 ;

(ii) відносна похибка має мінімальне значення близько 0,0015, що прирівнюється до $\gamma = 1$, а збільшення частоти дискретизації ($n \rightarrow \infty$) не зменшує цю похибку.

2.4. Корекція відхилення частоти

Для виправлення ефекту відхилення частоти при вимірюванні потужності пропонуються наступні методи.

Метод 1. Сигнали напруги та струму суто синусоїдальні:

(i) з бажаним кроком, обчислити відносну похибку відповідно до рівняння (2.13) і зберігати в пам'яті пристрою вимірювання;

(ii) вимірювати в реальному часі вхідну частоту і визначати γ . На підставі виміряного значення, визначити відносну помилку з пам'яті і замінити в рівняннях (2.10) та (2.12). Результати визначення активної потужності та ефективного значення напруги показані на рис. 2.

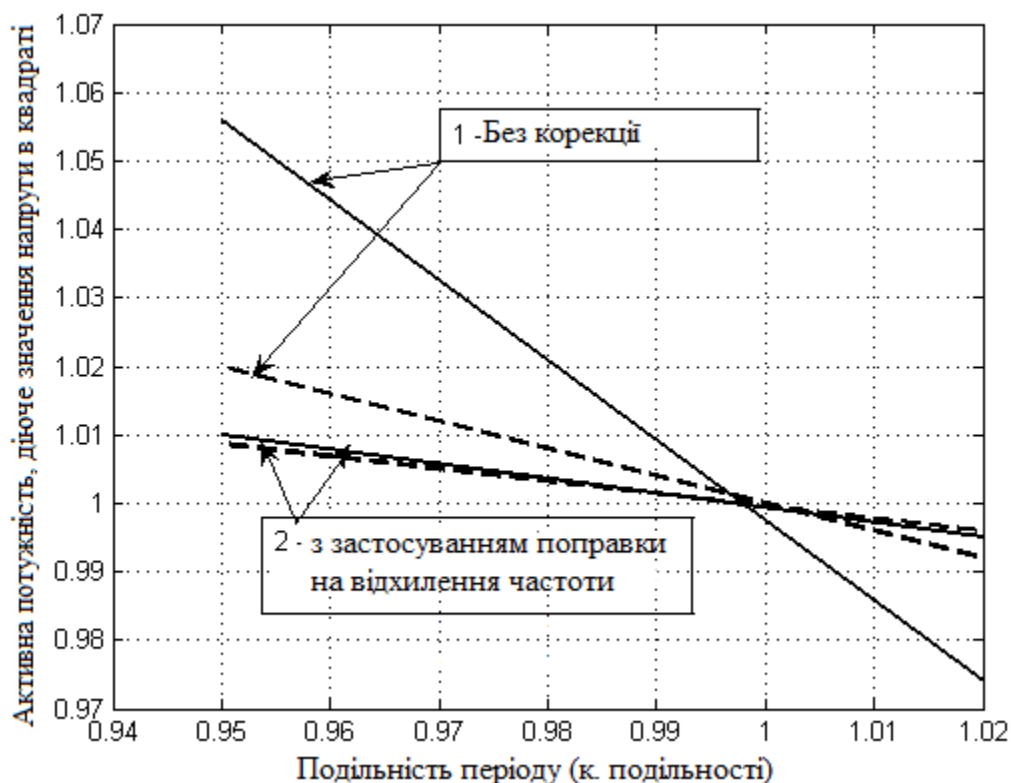


Рисунок 2.6 - Визначення активної потужності P (____) та діючого значення напруги в квадраті (- - -).

1 – без корекції; 2 – із застосуванням поправки на відхилення частоти ($\gamma <$ або > 1)

Аналіз на рисунку 2.6 показує, що, застосовуючи цей простий метод, відносні похибки при визначенні активної потужності P та діючого значення напруги були зменшені. Дослідження показали, що зменшенням похибки різними алгоритмами є:

- за допомогою алгоритму FFT - 25 відсотків;
- за допомогою алгоритму ДПФ - 40 відсотків.

Подальші дослідження показали, що при визначенні вхідної частоти (з використанням результатів рівн.(1,7)) з точністю 0,006-0,008% не вплинули на основні результати. Загалом, однак, бажано в межах точності $\pm 0,001$ відсотка. Це ж рівняння, тобто. (2.13), що описує вплив відхилення частоти у формі синусоїдальної хвилі від напруги силової системи $u(t)$ і струму $i(t)$, сигнали можуть бути використані для зменшення відносних похибок при визначенні всіх характеристик енергоспоживання.

Метод 2. Сигнали струму і напруги містять гармоніки.

Періодичний сигнал, $x(t)$, з періодом T і той що містить гармоніки, може бути представлений як

$$x(t) = \sum_{m=1}^n A_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T} m + \varphi_m\right), \quad (2.14)$$

де A_m є піковою величиною m -ї гармоніки, φ_m є фазним кутом m -ї гармоніки, m це порядковий номер гармоніки, а n це кількість гармонік.

Цей сигнал, який вимірюється в рівновіддалені моменти часу t_l , записується в рівняння (2.4) і можна записати у вигляді:

$$X_l = \sum_{m=1}^n A_m \sin\left(\frac{2\pi lm}{N} \gamma_l + \varphi_m\right), \quad (2.15)$$

де $\gamma_l = \gamma r$, а r це середнє значення, визначене протягом декількох періодів.

ДПФ рівняння (2.14) буде мати вигляд

$$X(k) = \sum_{l=0}^{2n} \left(\sum_{m=1}^n A_m \sin\left(\frac{2\pi lm}{N} \gamma_l + \varphi_m\right) \right) e^{-j \frac{nlk}{N}}, \quad (2.16)$$

де k це компонент Фур'є.

Після деяких математичних маніпуляцій:

$$\begin{aligned} x(k) &= \frac{1}{2j} \sum_{m=1}^n A_m \left(\sum_{l=0}^{2n} \left[e^{j\left(\frac{2\pi lm}{N} \gamma_l + \varphi_m\right)} - e^{-j\left(\frac{2\pi lm}{N} \gamma_l + \varphi_m\right)} \right] e^{-j \frac{2\pi lk}{N}} \right) = \\ &= \frac{1}{2j} \sum_{m=1}^n A_m \sum_{l=0}^{2n} \left[e^{j\left(\frac{2\pi lm}{N} \gamma_l + \varphi_m - \frac{2\pi lk}{N}\right)} - e^{-j\left(\frac{2\pi lm}{N} \gamma_l + \varphi_m + \frac{2\pi lk}{N}\right)} \right] = \\ &= \frac{1}{2j} \sum_{m=1}^n A_m \left[e^{j\varphi_m} \sum_{l=0}^{2n} e^{jl \frac{2\pi}{N} (m\gamma_l - k)} - e^{-j\varphi_m} \sum_{l=0}^{2n} e^{-jl \frac{2\pi}{N} (m\gamma_l + k)} \right]. \quad (2.17) \end{aligned}$$

Перший вираз в рівнянні (2.17) можна перетворити як

$$\begin{aligned} \sum_{l=0}^{2n} e^{j \frac{2\pi}{N} (m\gamma_l - k)} &= \sum_{l=0}^{2n} e^{j \frac{2\pi}{N} (m\gamma_l - k)} \Big|_l = \frac{e^{j(2n+1) \frac{2\pi}{N} (m\gamma_l - k)} - 1}{e^{j \frac{2\pi}{N} (m\gamma_l - k)} - 1} = \\ &= \frac{e^{j(n+1/2) \frac{2\pi}{N} (m\gamma_l - k)}}{e^{j(n+1/2) \frac{2\pi}{N} (m\gamma_l - k)}} \times \frac{\left[e^{j(n+1/2) \frac{2\pi}{N} (m\gamma_l - k)} - e^{-j(n+1/2) \frac{2\pi}{N} (m\gamma_l - k)} \right]}{\left[e^{j \frac{2\pi}{2N} (m\gamma_l - k)} - e^{-j \frac{2\pi}{2N} (m\gamma_l - k)} \right]} = \end{aligned}$$

$$= \frac{e^{j\pi(m\gamma_l - k)} \begin{bmatrix} e^{j\pi(m\gamma_l - k)} & -e^{-j\pi(m\gamma_l - k)} \end{bmatrix}}{e^{j\frac{\pi}{N}(m\gamma_l - k)} \begin{bmatrix} e^{j\frac{\pi}{N}(m\gamma_l - k)} & -e^{-j\frac{\pi}{N}(m\gamma_l - k)} \end{bmatrix}} = e^{j\frac{2\pi}{N}(m\gamma_l - k)} \frac{\sin \pi(m\gamma_l - k)}{\sin \frac{\pi}{N}(m\gamma_l - k)}. \quad (2.18)$$

Аналогічним чином, другий вираз в рівнянні (2.17) можна перетворити як

$$\sum_{l=0}^{2m} e^{-jl\frac{2\pi}{N}(m\gamma_l - k)} = e^{-j\frac{2\pi}{N}(m\gamma_l - k)} \frac{\sin \pi(m\gamma_l - k)}{\sin \frac{\pi}{N}(m\gamma_l - k)}. \quad (2.19)$$

Підставляючи рівняння (2.18) і (2.19) в рівняння (2.17), знаючи, що

$$e^{j\frac{2\pi}{N}(m\gamma_l - k)} = \cos \frac{2\pi n}{N}(m\gamma_l - k) + j \sin \frac{2\pi n}{N}(m\gamma_l - k) \quad (2.20)$$

$$\text{та } e^{-j\frac{2\pi}{N}(m\gamma_l + k)} = \cos \frac{2\pi}{N}(m\gamma_l + k) - j \sin \frac{2\pi}{N}(m\gamma_l + k) \quad (2.21)$$

можна отримати

$$X(k) = \frac{1}{2j} \sum_{m=1}^n A_m \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sin \left[\pi(\gamma_l m + \varphi_m - k) \right]}{\sin \left[\frac{\pi}{N}(\gamma_l m + \varphi_m - k) \right]} e^{j\frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m + \varphi_m - k)} \\ \frac{\sin \left[\pi(\gamma_l m + \varphi_m + k) \right]}{\sin \left[\frac{\pi}{N}(\gamma_l m + \varphi_m + k) \right]} e^{j\frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m + \varphi_m + k)} \end{array} \right\}. \quad (2.22)$$

Для того, щоб зробити аналіз цього рівняння легше, його можна спочатку перетворити як

$$X(k) = \frac{1}{2j} \sum_{m=1}^n A_m e^{j\varphi_m} \frac{\sin \left[\pi(\gamma_l m - k) \right]}{\sin \left[\frac{\pi}{N}(\gamma_l m - k) \right]} \left[\cos \frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m - k) + j \sin(\gamma_l m - k) \right] -$$

$$-\frac{1}{2j} \sum_{m=1}^n A_m e^{-j\varphi_m} \frac{\sin\left[\frac{\pi(\gamma_l m+k)}{N}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N}(\gamma_l m+k)\right]} \left[\cos\left[\frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m+k)\right] + j \sin\left[\frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m+k)\right] \right], \quad (2.23)$$

Вираз $A_m \exp(j\varphi_m) = X_m + jY_m$, та $X(k) = U_k + jV_k$,

де X_m , Y_m є реальними і уявними частинами m -ї гармоніки, відповідно, U_k , V_k є реальною і уявною частинами компонента Фур'є відповідно.

Підставляючи рівн.(2.23) у рівн.(2.22) окремо для реальної та уявної частин, отримаємо

$$2U_k = \sum_{m=1}^n \left\{ \left[\frac{\sin\left[\frac{\pi(\gamma_l m-k)}{N}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N}(\gamma_l m-k)\right]} \sin\left[\frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m-k)\right] + \frac{\sin\left[\frac{\pi(\gamma_l m-k)}{N}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N}(\gamma_l m-k)\right]} \sin\left[\frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m-k)\right] \right\} X_m + \left\{ \frac{\sin\left[\frac{\pi(\gamma_l m-k)}{N}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N}(\gamma_l m-k)\right]} \cos\left[\frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m-k)\right] + \frac{\sin\left[\frac{\pi(\gamma_l m+k)}{N}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N}(\gamma_l m+k)\right]} \sin\left[\frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m+k)\right] \right\} Y_m. \quad (2.24)$$

$$-2V_k = \left\{ \frac{\sin\left[\frac{\pi(\gamma_l m-k)}{N}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N}(\gamma_l m-k)\right]} \cos\left[\frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m-k)\right] - \frac{\sin\left[\frac{\pi(\gamma_l m+k)}{N}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N}(\gamma_l m+k)\right]} \cos\left[\frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m+k)\right] \right\} X_m + \left\{ \frac{\sin\left[\frac{\pi(\gamma_l m+k)}{N}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N}(\gamma_l m+k)\right]} \sin\left[\frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m+k)\right] - \frac{\sin\left[\frac{\pi(\gamma_l m+k)}{N}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N}(\gamma_l m+k)\right]} \sin\left[\frac{2\pi n}{N}(\gamma_l m+k)\right] \right\} Y_m, \quad (2.25)$$

Аналіз (2.24) та (2.25) показує, що функції інтерполяції X_m та Y_m залежать тільки від періоду (частоти) досліджуваного сигналу. Якщо γ_l Аналіз (2.24) та (2.25) показує, що функції інтерполяції залежать тільки від періоду (частоти) досліджуваного сигналу. Якщо і відповідні компоненти Фур'є визначені, можна вирішити для, і для t -ї гармоніки відповідно до рівняннями (2.10,2.11) X_m , Y_m ,

A_m та φ_m для m -ї Аналіз (2.24) та (2.25) показує, що функції інтерполяції залежать тільки від періоду (частоти) досліджуваного сигналу. Якщо і відповідні компоненти Фур'є визначені, можна вирішити для, і для n -ї гармоніки відповідно до рівнянь (2.10,2.11)

$$A_m = \sqrt{X_m^2 + Y_m^2}; \quad \varphi_m = \operatorname{arctg} \left(\frac{Y_m}{X_m} \right). \quad (2.26)$$

Рівняння (2.24) та (2.26) показують вплив γ_1 та n . Значення похибок визначаються відповідно до рівн. (2.26). Спочатку досліджуються р-ня (2.24-2.26) при $n = 1$. Перетворення рівнянь (2.24) та (2.25) до більш зручних форм дає

$$2U_k = \left\{ \frac{\sin[\pi(\gamma_1 - k)]}{\sin[\pi/N(\gamma_1 - k)]} \sin\left[\frac{2\pi}{N}(\gamma_1 - k)\right] + \frac{\sin[\pi(\gamma_1 + k)]}{\sin[\pi/N(\gamma_1 + k)]} \sin\left[\frac{2\pi}{N}(\gamma_1 + k)\right] \right\} X_1 +$$

$$+ \left\{ \frac{\sin[\pi(\gamma_1 - k)]}{\sin[\pi/N(\gamma_1 - k)]} \cos\left[\frac{2\pi}{N}(\gamma_1 - k)\right] + \frac{\sin[\pi(\gamma_1 + k)]}{\sin[\pi/N(\gamma_1 + k)]} \cos\left[\frac{2\pi}{N}(\gamma_1 + k)\right] \right\} Y_1. \quad (2.27)$$

$$-2V_k = \left\{ \frac{\sin[\pi(\gamma_1 - k)]}{\sin[\pi/N(\gamma_1 - k)]} \cos\left[\frac{2\pi}{N}(\gamma_1 - k)\right] - \frac{\sin[\pi(\gamma_1 + k)]}{\sin[\pi/N(\gamma_1 + k)]} \cos\left[\frac{2\pi}{N}(\gamma_1 + k)\right] \right\} X_1 +$$

$$+ \left\{ \frac{\sin[\pi(\gamma_1 + k)]}{\sin[\pi/N(\gamma_1 + k)]} \sin\left[\frac{2\pi}{N}(\gamma_1 + k)\right] - \frac{\sin[\pi(\gamma_1 - k)]}{\sin[\pi/N(\gamma_1 - k)]} \sin\left[\frac{2\pi}{N}(\gamma_1 - k)\right] \right\} Y_1. \quad (2.28)$$

Аналіз рівнянь (2.27) та (2.28) показує, що похибки при визначенні амплітуди та фази вхідного сигналу за допомогою алгоритму ДПФ (FFT) залежать від інтерполяції компонент цих рівнянь за допомогою X та Y , і, нарешті, на відхилення частоти ($\gamma_1 = \text{змінна}$). Вхідні сигнали, напруги $u(t)$ та струму $i(t)$, можуть бути вирішені вздовж осі ортогональних опор, як показано нижче [10]:

$$U_{1m} = \frac{2}{2n+1} \sum_{l=0}^{2n} u_l \sin \frac{2\pi ml}{2n+1}; \quad I_{1m} = \frac{2}{2n+1} \sum_{l=0}^{2n} i_l \sin \frac{2\pi ml}{2n+1};$$

$$U_{2m} = \frac{2}{2n+1} \sum_{l=0}^{2n} u_l \cos \frac{2\pi ml}{2n+1}; \quad I_{2m} = \frac{2}{2n+1} \sum_{l=0}^{2n} i_l \cos \frac{2\pi ml}{2n+1}. \quad (2.29)$$

коли U_{1m}, I_{1m} – синусні компоненти ортогональних компонентів напруги та струму, відповідно; U_{2m}, I_{2m} – косинус ортогональних компонентів напруги та струму, відповідно.

Відповідно до деяких результатів, запропонованих в роб.[29], рівняння для визначення активної P_m і реактивної Q_m потужностей можна записати як

$$P_m = 0.5(U_{1m}I_{1m} + U_{2m}I_{2m}), \quad Q_m = 0.5(U_{1m}I_{2m} + U_{2m}I_{1m}), \quad m = \overline{1, \dots, n}. \quad (2.30)$$

де m – кількість гармонік.

Для ілюстрації розглянемо як приклад, в якому пропонується зменшити вплив відхилення частоти при визначенні реактивної потужності (фундаментальні та вищі гармоніки).

Спочатку визначаємо значення γ_l . Потім за допомогою інтерполяційних формул (2.27), (2.28) і (2.29), обчислюють амплітуди і фази гармонік.

Далі, для відомих значень амплітуди та фази кожної гармоніки напруги U_m та струму I_m , визначаємо синус та косинус ортогональних компонент. Тоді визначають фундаментальні Q_1 і вищі гармоніки Q_m ($m = 2, n$) реактивної потужності.

Порівняння відносних похибок в Q цього методу та відносні похибки наведені в таблицях 2.1 – 2.3.

Таблиця 2.1 - відносні похибки для $u(t)$ та $i(t)$ що містять гармоніки

	Відносна похибка в	
	Q_1	Q_2
Інший метод	5.2 e-4	9.1 e-4
Запропонований метод	4.96 e-5	8.6 e-5

Таблиця 2.2 – Відносні похибки $u(t)$ та $i(t)$, що містять гармоніки, з частотою відмінною від 50 Гц

	Відносна похибка в	
	Q ₁	Q ₂
Відхилення частоти – 0.8%		
Інший метод	6.12 e-2	5.9 e-2
Запропонований метод	3.83 e-2	9.6 e-3
Відхилення частоти + 0.8 %		
Інший метод	6.095 e-2	6.01 e-2
Запропонований метод	3.67 e-3	9.98 e-3
Відхилення частоти – 0.45 %		
Інший метод	7.45 e-4	6.95 e-4
Запропонований метод	2.12 e-5	6.32 e-5
Відхилення частоти + 0.45 %		
Інший метод	7.12 e-3	7.01 e-3
Запропонований метод	2.2 e-4	6.285 e-4

Результати в таблицях 2.1 і 2.2 для випадку 1 і 2 відповідно показують, що похибка з запропонованим методом нижче, ніж з іншим алгоритмом, в будь-якому випадку. Відзначено, що відносні похибки запропонованого методу залежать від точності, з якою визначається значення γ (відхилення частоти).

Результати для випадку обох сигналів, $u(t)$ та $i(t)$, що містять гармоніки, їх частота не відповідає номінальній частоті, а величина вимірюється з похибкою, наведені в таблиці 3.

Таблиця 2.3 Відносні похибки для $u(t)$ та $i(t)$, що містить гармоніки, з відхиленням частоти від 50 Гц та величиною γ вимірюваною з похибкою ($\pm 0,02\%$)

	Відносна похибка в	
	Q1	Q2
Відхилення частоти + 0.45 %		
Інший метод	6.12 e-4	5.09 e-5
Запропонований метод	2.2 e-4	6.285 e-6

Ці результати показують, що якщо значення γ вимірюється з похибкою $\pm 0,02\%$, запропонований спосіб є прийнятним за всіх умов.

ВИСНОВКИ

В даному розділі описані методи зменшення впливу відхилення частоти на визначення характеристик споживання енергії. Основними перевагами запропонованих методів є простота, точність та швидкість.

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, і для частоти, яка відхиляється від номінального значення.

Рівняння корекції можна визначити заздалегідь і зберігати в пам'яті. Вимірне значення γ , використовується як корекція в рівняннях. Це зменшує загальний час, необхідний для визначення характеристик споживання енергії.

РОЗДІЛ 3 Виконання гармонічного аналізу за допомогою вейвлет-перетворення

Вступ.

Оцінка ефективності існуючих алгоритмів аналізу форми хвилі струму і напруги полягає у визначенні точності і швидкодії. Широко використовуваним методом проведення гармонійного аналізу є дискретне перетворення Фур'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 і частотами), тобто у вигляді розкладання в ряд Фур'є.

Для скорочення часу, необхідного для проведення ДПФ, розроблений алгоритм швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). В даний час цей алгоритм займає майже монопольне становище не тільки серед алгоритмів спектрального оцінювання, а й в інших областях обробки інформації. Проте алгоритми Фур'є мають кілька джерел методичних похибок, які призводять до зниження точності результатів гармонійного аналізу і до їх якісного спотворення.

Головними недоліками алгоритмів Фур'є є обмеженість частотної здатності і недостатня точність оцінки частоти окремих гармонічних компонент. У першому випадку - це роздільна здатність поділу двох спектральних складових з близькими частотами, а в другому - правильність визначення частоти відокремленої гармонічної компоненти. Для підвищення точності проведення ШПФ застосовується ряд додаткових математичних операцій. Так, для виключення ефекту розсіювання (коли довжина тимчасової вибірки не дорівнює періоду аналізованої функції) виконується синхронізація частоти дискретизації з частотою досліджуваного сигналу, доповнення нулями вихідної вибірки аналізованого сигналу або застосовуються тимчасові або спектральні вікна [30]. Ефективним засобом зменшення спектральних витоків є також застосування віконних функцій відповідно до інтерполяційних алгоритмів.

Однак ці способи не забезпечують збільшення частотної здатності.

Застосування тимчасових або спектральних вікон дозволяє зменшити ефект розсіювання внаслідок погіршення частотної здатності (у зв'язку з виключенням частини інформації проаналізованої функції), а при доповненні вихідної вибірки нулями збільшується вибірковість оцінювання частот вузькосмугових спектральних піків внаслідок зменшення нерівномірності амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) і, відповідно, похибок, пов'язаних з її нерівномірністю.

3.1 Вейвлет-перетворення. Функції та застосування.

В даний час все більшого поширення набуває вейвлет-перетворення, в якому використовуються спеціальні функції апроксимації, звані материнськими вейвлетами. Вейвлет Ψ - це функція з нульовим середнім значенням.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0,$$

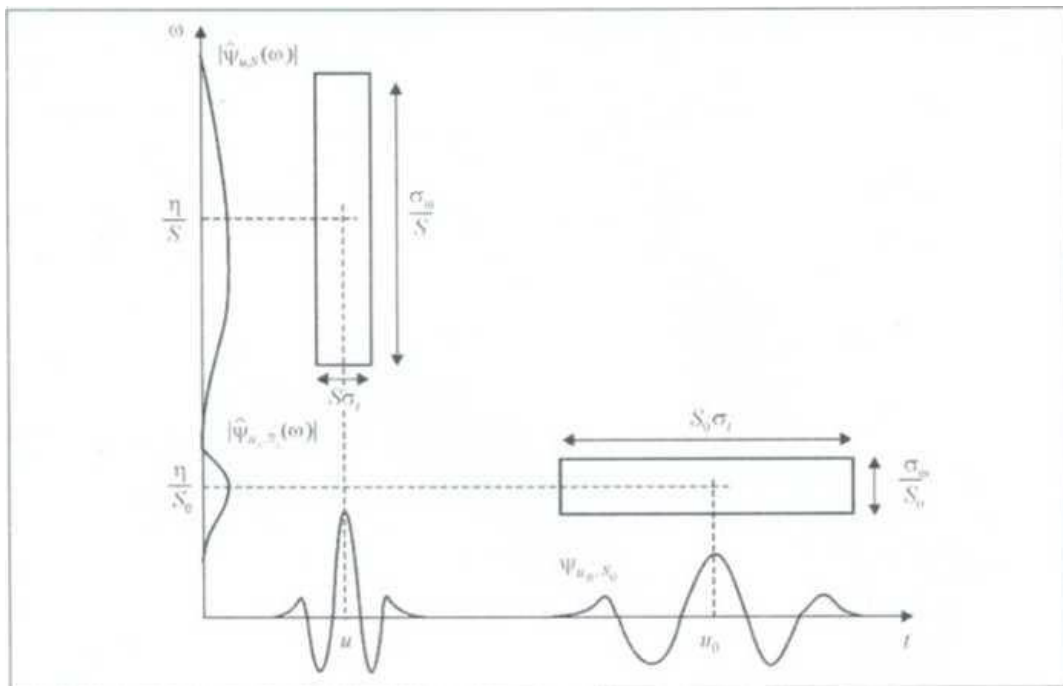


Рисунок 3.1 Частотно-тимчасової прямокутник для двох вейвлетів $\Psi_{u,S}$ і

Ψ_{u_0,S_0} з параметром розтягування S та параметром зсуву u :

$$\Psi_{u,S} = \frac{1}{\sqrt{S}} \Psi\left(\frac{t-u}{S}\right).$$

Вейвлет-перетворення f з масштабом S і зрушенням u обчислюється кореляцією f з вейвлет-атомом:

$$Wf(u, S) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{S}} \Psi^* \left(\frac{t-u}{S} \right) dt, \quad (3.1)$$

де Ψ^* — комплексно пов'язаний вейвлет. Застосувавши формулу Парсеваля, вираз (3.1) запишемо у вигляді інтеграла по частоті:

$$Wf(u, S) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{S}} \Psi^* \left(\frac{t-u}{S} \right) dt, \quad (3.2)$$

Як випливає з (3.2), вейвлет-коефіцієнт $Wf(u, S)$ залежить від значень $f(t)$ та $f(\omega)$ в частотно-часовій області, де зосереджені енергії $\Psi_{u,S}$ та $\hat{\Psi}_{u,S}^*$. Зміна в часі гармонійних складових можна виявити по зсуву та масштабу вейвлет-коефіцієнтів максимальної амплітуди.

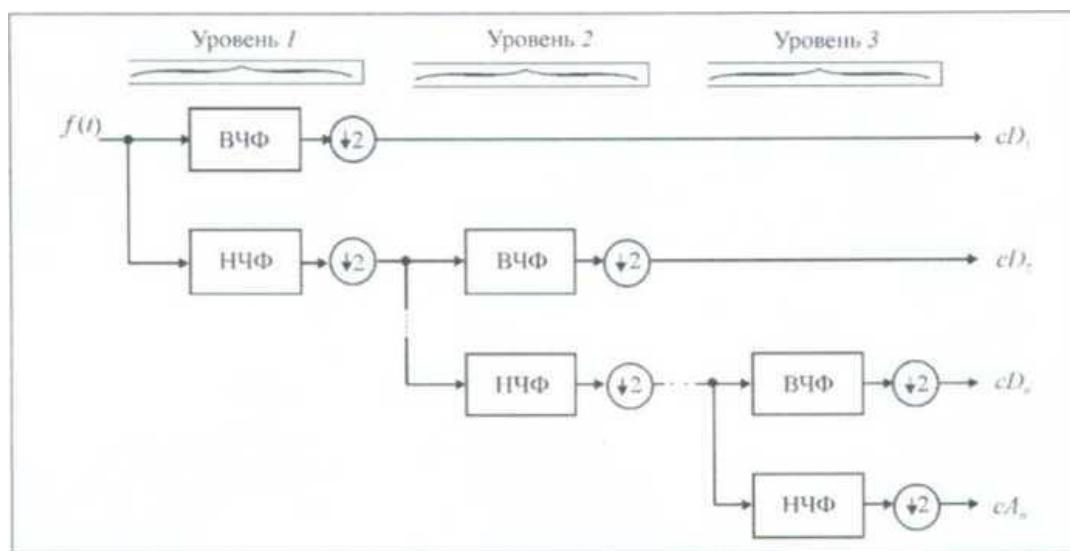


Рисунок 3.2 Дерево вейвлет-розкладання за алгоритмом Малла, де ВЧФ -

високочастотний фільтр; НЧФ - низькочастотний фільтр; $\downarrow 2$ - децимація (зменшення коефіцієнтів в два рази).

З рис. 3.1 видно, що при зменшенні масштабу 5 носій стає менше за часом, але протяжність по частоті збільшується, та прямокутник Гейзенберга (принцип

невизначеності Гейзенберга говорить, що неможливо одночасно виміряти частоту і час з довільно високою точністю) зсувається в область високих частот. При цьому площа прямокутника залишається постійною. Теоретично безперервне вейвлет-перетворення (БВП) складається з нескінченного числа різних вейвлетів які просто створюються модифікацією коефіцієнтів за масштабом і часом оригінальним материнським вейвлетом[30]. Таким чином, техніка БВП прийнятна для проведення аналізу сигналів з високою роздільною здатністю і є основою для визначення різних їх параметрів.

Відомо два основні підходи в області визначення гармонік і флікера за допомогою вейвлет аналізу. Перший заснований на кратномасштабному аналізі (КМА) з використанням банку вейвлет-фільтрів на першому кроці і застосуванні безперервного вейвлет-перетворення підгруп на другому кроці, другий - на використанні комплексного вейвлет-перетворення або безперервного перетворення.

На першому кроці проводилася декомпозиція частотного спектра сигналу на два піддіапазони на основі дискретного вейвлет-перетворення за допомогою функцій Добеши високих порядків. На другому кроці застосовувалося безперервне вейвлет-перетворення до ненульових піддіапазонів. Даний метод успішно компенсує частотні недосконалості фільтра при використанні банку вейвлет-фільтрів[30].

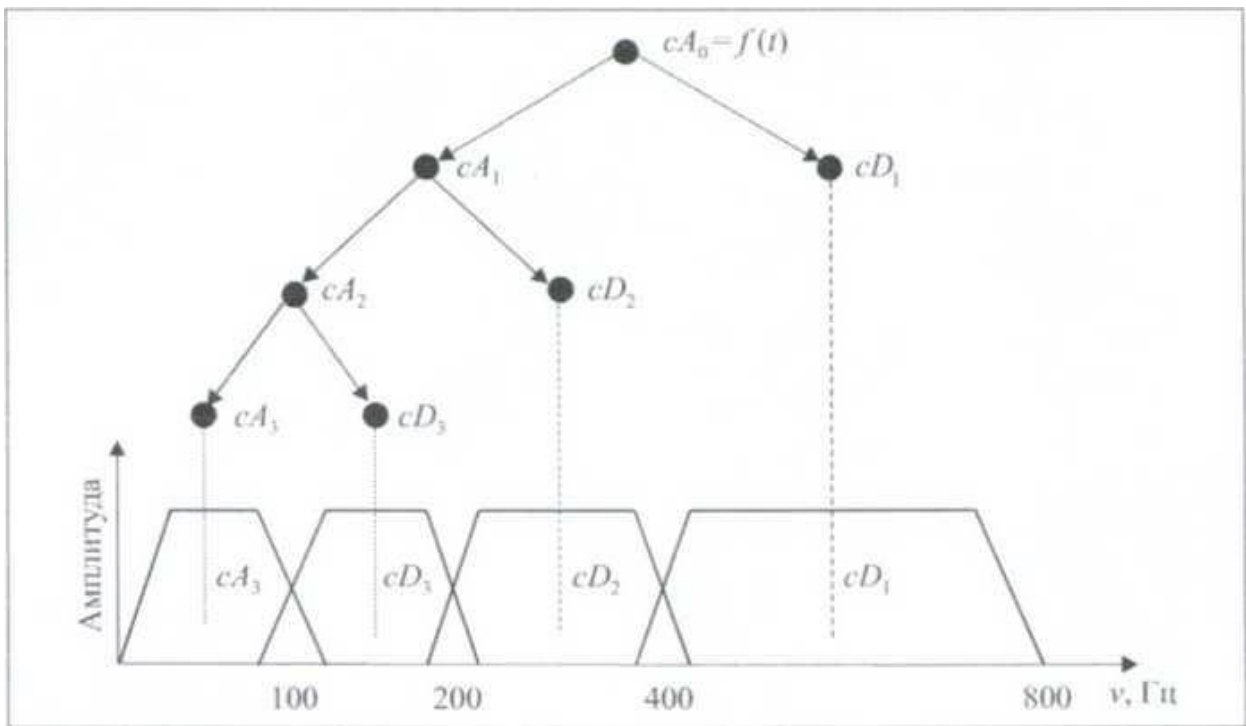


Рисунок 3.3 Нерівномірні частотні смуги кратномасштабного аналізу

В більш пізніх роботах представлені застосування вейвлет-аналізу для удосконалення частотних характеристик фільтрів, аналізу субгармонік, використання трапецеїдальної комплексної вейвлет-функції, різних видів материнських вейвлетів.

Швидке вейвлет-перетворення за алгоритмом Малла являє собою так званий короткомасштабний аналіз (рис. 3.2). При переході з рівня 0 на рівень 1 вхідний сигнал $f(t)$ за допомогою ВЧФ і НЧФ розділяється на апроксимуючі - cA_i і деталізуючі - cD_i коефіцієнти. Потім, в свою чергу, при переході з рівня 1 на рівень 2 (і т. д.). Апроксимуючі коефіцієнти поділяються за допомогою фільтрів на низькочастотні (апроксимуючі) і високочастотні (деталізуючі) коефіцієнти. Тобто, вхідний сигнал вейвлет-перетворення ділить на окремі приватні смуги (рис. 3.3) [30].

За даним алгоритмом можливе визначення середньоквадратичних величин струму, напруги та потужності [30], однак він не дозволяє визначати середньоквадратичні значення струму, напруги та потужності окремих

гармонійних компонент. Виходячи з вищевикладеного, в даний час для проведення гармонійного аналізу використовується пакетне вейвлет-перетворення [30]. На відміну від алгоритму Малла, декомпозиції на всіх рівнях піддаються і апроксимуючі і деталізуючі коефіцієнти (рис. 3.4), і, відповідно, частотні смуги мають вигляд, представлений на рис. 3.46.

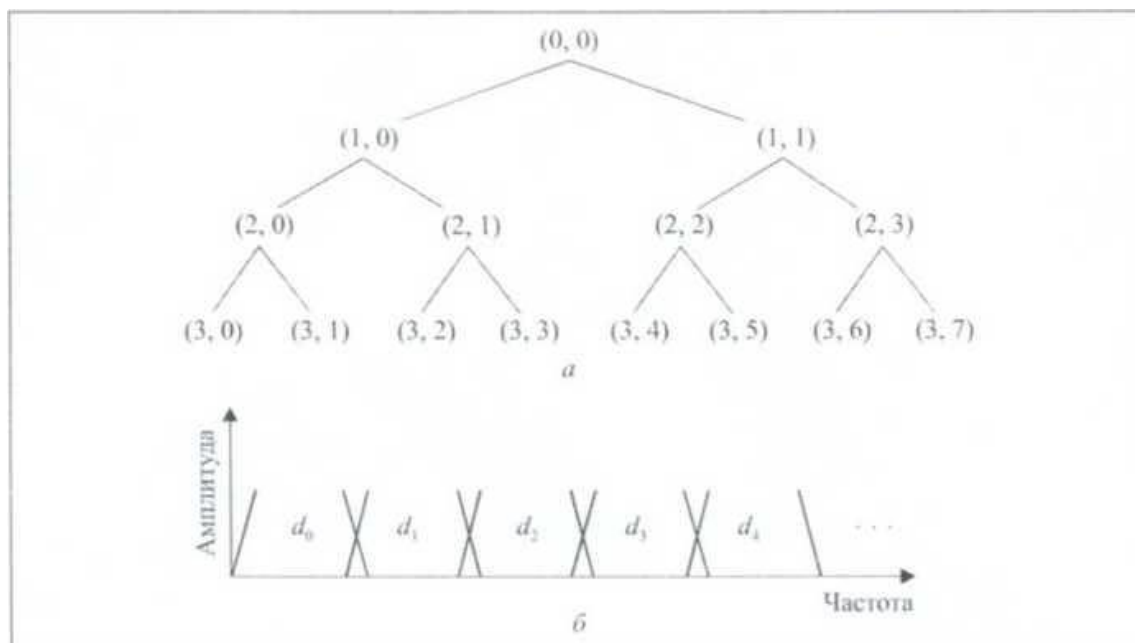


Рисунок 3.4 Дерево декомпозиції (а), частотні смуги (б)

Можливості застосування пакетного вейвлет-перетворення для проведення часово-частотного гармонійного аналізу показані в багатьох роботах. Зокрема, для підвищення швидкодії, точності визначення гармонік, виключення спектральних витоків використовуються різні способи, засновані на перетворенні Гільберта, різного роду фільтрах, комбінації декількох методів. Як відомо, ІЕС 61000-4-7 , ГОСТ Р 51317.4.7 визначають контрольно-вимірювальну апаратуру для вимірювання гармонік та інтергармонік електричних струмів і напруг в системах електропостачання. В якості методу вимірювань передбачається використання ШПФ із застосуванням тимчасового вікна Хеннінг при втраті синхронізації. При цьому, тривалість тимчасового інтервалу вимірювання повинна дорівнювати 10-ти періодам основної частоти при прямокутному вікні зважування. При цьому не виключаються також і інші принципи аналізу, такі як застосування банків

цифрових фільтрів або вейвлет-перетворення.

На відміну від перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз при вимірюванні частотно-часових змін спектральних компонент інформаційного сигналу має інший частотно-часовий дозвіл. У зв'язку з цим, проведемо порівняльний аналіз розрахунку гармонійних компонент відповідно до вимог за допомогою ДПФ і вейвлет-аналізу[30].

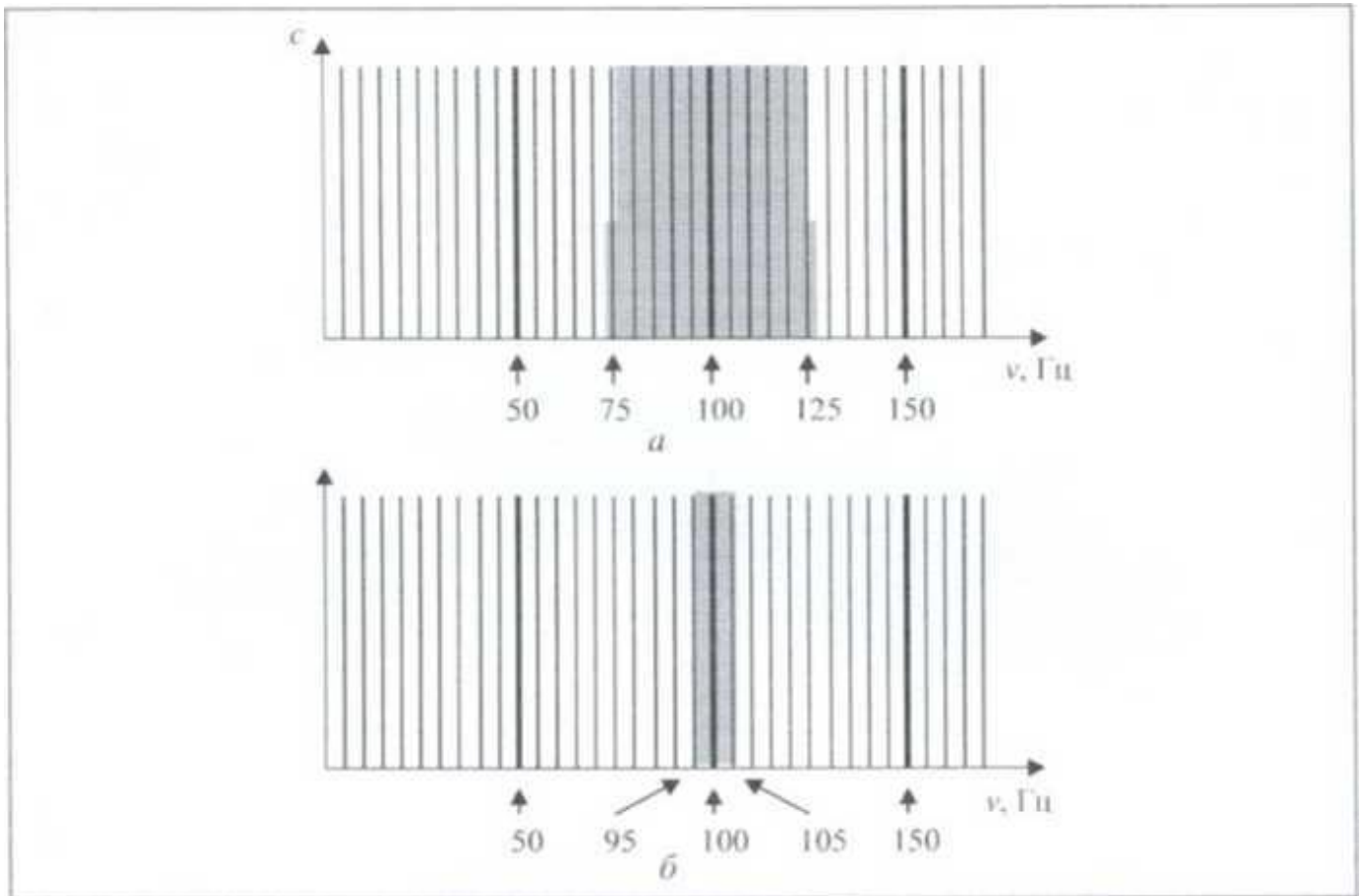


Рисунок 3.5 Схеми утворення гармонічної групи (а) і підгрупи (б) гармонік другого порядку

3.2 Реалізація вейвлет-перетворення .

Для забезпечення більш точного уявлення гармонік при наявності нелінійних навантажень в системі електропостачання, в групи гармонік включаються проміжні спектральні лінії. При цьому середньоквадратичне значення гармонійної групи (рис. 3.5а) дорівнюватиме кореню квадратному із суми квадратів середньоквадратичних значень гармонійної складової і прилеглих до неї

спектральних складових, відповідних даної тривалості тимчасового інтервалу вимірювання [30]. Тобто, для оцінки гармонік результати проведення ДПФ повинні бути згруповані у відповідності з наступною формулою:

$$G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k+1}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2}, \quad (3.3)$$

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

$C_{(k+i)}$ - середньоквадратичне значення спектральної складової відповідної частотної позиції ШПФ; n - порядок гармоніки дорівнює k/n ; k - компонент Фур'є; N - число періодів у вікні часу вимірювань ($N = 10$).

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

Середньоквадратичне значення гармонійної підгрупи (рис. 5, б) буде дорівнювати кореню квадратному із суми квадратів середньоквадратичних значень гармонійної складової і двох безпосередньо прилеглих до неї спектральних складових.

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2$$

Алгоритм визначення гармонічних груп. Гармонічний аналіз необхідно проводити до 50 гармоніки, що при тимчасовому вікні 200 мс, частотному дозволі 5 Гц і необхідності виконання умов теореми Шеннона (Котельникова) призводить до частоти дискретизації вхідного сигналу 6,4 кГц і вейвлет-розкладання до рівня $j = 7$.

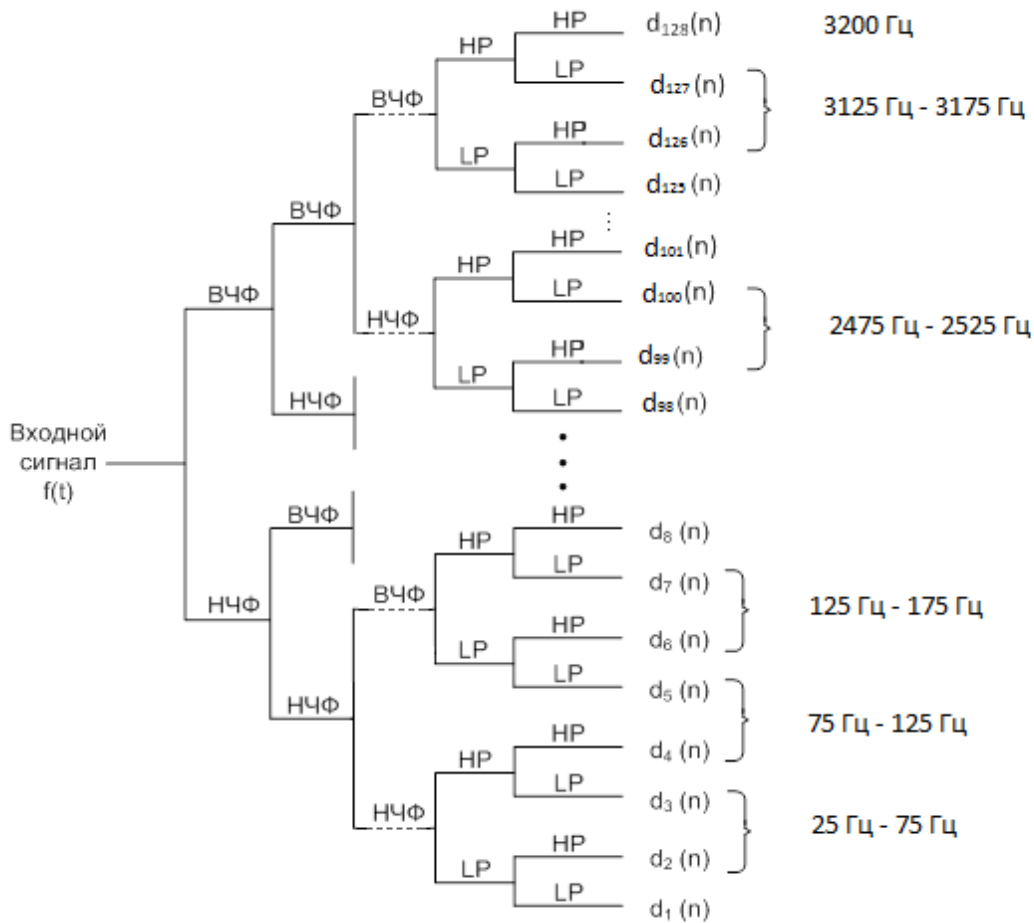


Рисунок 3.6 Дерево вейвлет-пакетного розкладання з групуванням частотних смуг $d_1(n), \dots, d_{128}(n)$ - вейвлет-коефіцієнти сьомого рівня розкладання (частотні смуги шириною $3200/128 - 25$ Гц).

У відповідності з (3.3) згрупуємо вейвлет-коефіцієнти сьомого рівня розкладання на 63 групи $d'_1 \dots d'_{63}$, з кожним компонентом частоти гармоніки (як парних, так і непарних) в центрі кожної групи з інтервалом 50Гц. Визначимо середньоквадратичне значення кожної групи ($d'_1 \dots d'_{63}$) згрупованої частоти як корінь квадратний середнього квадрата коефіцієнтів двох підгруп, що входять в кожну групу відповідно до [8]:

$$x_{\text{сркв}}(1) = \sqrt{\frac{1}{2}(d'_1)^2} = \sqrt{\frac{1}{2}(d_2(n) + d_3(n))^2}$$

У загальному випадку середньоквадратичне значення сигналу будь-якого

вузла (j, p) визначається через вейвлет-коефіцієнти $d_{j,k}$, k наступним чином:

$$x_{\text{сркв}}(j, p) = \sqrt{\sum_{k=0}^{2^j-1} (d_{j,k}^p)^2},$$

Отже, середньоквадратичне значення всіх гармонійних груп сигналу на будь-якому рівні вейвлет-декомпозиції визначиться наступним чином

$$x_{\text{сркв}}(j) = \sqrt{\sum_{p=0}^{2^j-1} (x_{\text{сркв}}(j, p))^2},$$

В якості досліджуваного сигналу розглядається функція $x(t) = \sqrt{2} (220\sin(\omega t - 19.91^\circ) + 55\sin(3\omega t - 35^\circ) + 30\sin(5\omega t + 110^\circ) + 120\sin(7\omega t + 19^\circ))$ яка має першу, третю, п'яту і сьому гармоніки (рис. 3.7).

Розрахунок гармонічних груп проведено за допомогою ДПФ і вейвлет-аналізу з різними типами вейвлетів. Результати обчислень представлені в табл. 1. У якості вейвлет-функції використані вейвлети Добеши, Хаара і Морле. Як видно з табл. 3.1, результати визначення гармонійних груп за алгоритмом ДПФ і вейвлет-аналізу можна порівняти в разі відсутності шуму і різного роду спотворень.

Таблиця 3.1 порівняльна характеристика методів

Частотна полоса, Гц	Гармонічна група	ДПФ	Вейвлет-аналіз			
			Добеши		Хаара	Морле
			db2	db9		
25—75	1	220.001	220.001	220.86	219.05	220,03
125—175	3	55.006	55.004	55.009	54.98	55,01
225—275	5	20.61	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
Похибка, %		0.015	0.016	-0,3	0.309	-0.0155

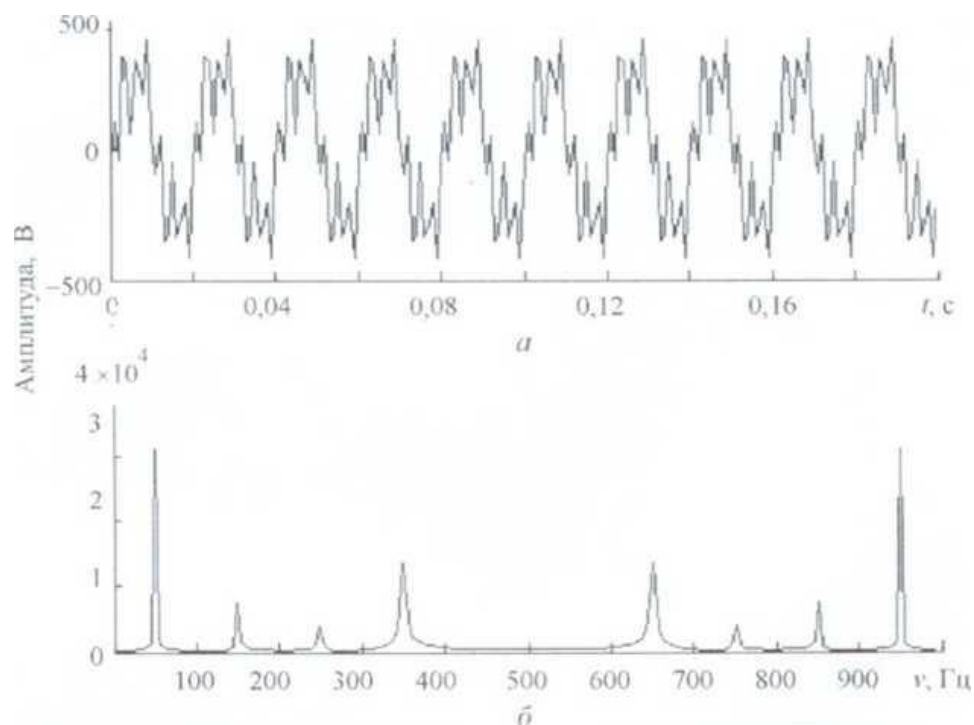


Рисунок 3.7 Досліджуваний сигнал (а) та його АЧХ (б): частота дискретизації 800 Гц (0.00125 с); рівень вейвлет-розкладання $j=4$ (16 отсчетов на период);
временное окно 10 періодів

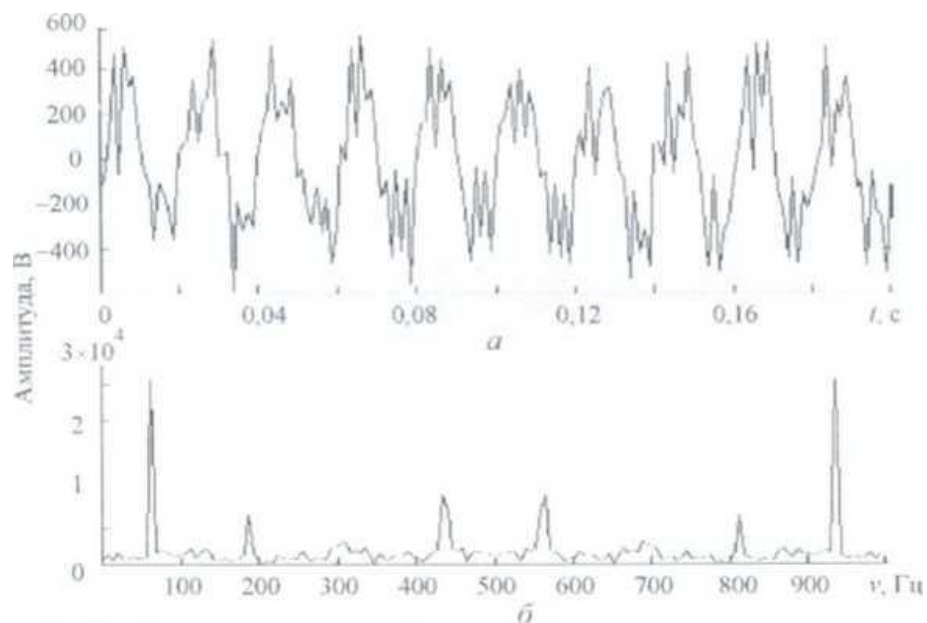


Рисунок 3.8 Зашумлений сигнал (а) та його АЧХ (б)

Таблиця 3.2 Результати розрахунку гармонічних груп перешкоди сигналу за допомогою ДПФ (без застосування віконних функцій) і вейвлет-аналізу.

Частотна полоса, Гц	Гармонічна група	ДПФ	Вейвлет-аналіз			
			Добеши		Хаара	Морле
			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		259.8	258.48	259.10	260.84	258.35
Похибка, %		-	-0,0658	-0.306	-0.979	-0.058

Досліджуємо результати визначення гармонічних груп при наявності спотвореного сигналу в електричних мережах (рис. 3.8). Для цього в електричний сигнал $x(t)$ введемо спотворення. Характер АЧХ, визначеної за допомогою ШПФ, свідчить про те, що шум викликає зміни частотного способу сигналу у всьому інтервалі частот, які розподіляються по всій частотній осі. Отже, їх виявлення за спектром стає практично неможливим.

Результати розрахунку гармонічних груп перешкоди сигналу за допомогою ДПФ (без застосування віконних функцій) і вейвлет-аналізу наведені в табл. 3.2 (див. Рис. 3.7). Порівнюючи отримані результати бачимо, що застосування пакетного вейвлет-перетворення для гармонійного аналізу спотвореного сигналу в електричних мережах є кращим у порівнянні з ДПФ.

У подальших дослідженнях точності гармонійного аналізу при наявності шуму в разі використання вейвлет-аналізу високочастотні складові (деталізують вейвлет-коефіцієнти) віддалялися з спектра в результаті обмеження їх рівня деяким його граничним значенням, а в разі ДПФ застосовувалися вікна. Більш ефективним при придушенні впливу шуму на результати гармонійного аналізу виявився вибір

жорсткого порогу [30] обмеження величини деталізуючих коефіцієнтів у порівнянні з застосуванням віконних функцій.

3.3 Економічні розрахунки збитків спричинених неякісними ПЯЕЕ.

Зниження якості електроенергії оцінюється і як економічний збиток, якій розраховується для кожного ПЯЕ окремо, або для всіх ПЯЕ разом, як функція економічного збитку[31].

Характеристики роботи приймачів електричної енергії за напругою можна розділити на технічні та економічні. Технічні характеристики – це залежності, наприклад, частоти обертання електричних машин, світлового потоку джерел світла, активної потужності, споживаної двигунами, терміну служби приймачів електроенергії від напруги на їхніх затискачах.

При наявності даних про кількісний вплив напруги на технічні характеристики приймача електроенергії можна визначити економічний збиток[31] при відхиленнях напруги в системах електричного постачання.

Збиток, що обумовлюється зниженою якістю електроенергії, має електромагнітну і технологічну складові. Електромагнітна складова визначається, в основному, додатковими втратами активної потужності і скороченням терміну служби ізоляції електричних машин, трансформаторів, кабелів і конденсаторів. Збиток, що викликається технологічними показниками, визначається[31], в основному, відхиленнями напруги від оптимальних значень, різних для конкретних електротехнологічних установок і агрегатів і визначає собівартість продукції. Відомо, що при значеннях коефіцієнтів несиметрії і несинусоїдальності напруги, що не перевищує більш, ніж в два-три рази нормовані значення, порушень нормальної роботи систем і окремих елементів не спостерігається. При коливаннях напруги, спостережуваних на практиці, аварійні ситуації також не виникають.

При необхідності можна оцінити збиток[31] від кожного показника якості окремо.

Вираз для сумарного річного збитку $Y_{\text{НН}\Sigma}$, що обумовлюється несинусоїдальністю напруги, при стабільному режимі роботи мережі може бути представлено у вигляді:

$$Y_{\text{НН}\Sigma} = \beta T \sum_{S=1}^m \Delta P_{\text{НН}}^{(S)} + \sum_{S=1}^M \Delta u_p^{(s)} u_p^{(s)} K_S + Y_{T_{\text{НН}}} + Y_{\text{НН}}^{(0)} + Y_{\text{НН}}^{(\Delta Q)} \quad (3.4)$$

де β - вартість 1 кВт-год електроенергії, грн/(кВт-год);

T – число годин роботи електроустановки в році, годин;

$\Delta P_{\text{НН}}^{(S)}$ - втрати активної потужності в s -ому елементі системи електропостачання, кВт;

$\Delta u_p^{(s)}$ - відносне збільшення відрахувань на реновацію від капітальних витрат K_S для s -го виду устаткування, грн/рік;

$Y_{T_{\text{НН}}}$ - технологічний збиток, обумовлений несиметрією, грн/рік;

$Y_{\text{НН}}^{(0)}$ - збиток, що обумовлюється зниженням світлового потоку ламп, встановлених у фазах із зниженою напругою і скороченням терміну служби ламп, встановлених у фазах з підвищеною напругою, грн/рік;

$Y_{\text{НН}}^{(\Delta Q)}$ - збиток, обумовлений недовиробітком реактивної потужності батареями конденсаторів і синхронними двигунами, грн/рік.

Значення економічного збитку, обумовленого гармоніками, визначається по формулі (1.3):

$$\begin{aligned} Y_{\Gamma} = & \Lambda [3,65 K_{\text{фД}} u_p^{(a)} \tau_a + 3,65 K_{\text{С.Д}} u_p^{(C)} \tau_C + 0,062 u_p^{(T)} \tau_T \square \\ & \square \sum_{S=1}^m \frac{K_T}{x_{kS}^2} + 0,7 u_p^{(K)} \tau_K \sum_{S=1}^m K_{Kq} + \beta K_r S_{Kk} T \square 10^{-3}] + \\ & + 0,087 K_{\epsilon} u_p^{(\epsilon)} \tau_{\epsilon} \sum_{v=2}^H (u-1) U_u^2 + 1,6 K_{\epsilon} u_p^{(\epsilon)} \sum_{u=2}^H U_v + Y_K, \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\Lambda = \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}, \quad (3.5)$$

де $K_{a.d}$, $K_{c.d}$, K_T , K_K , K_B – відповідно вартість асинхронних і синхронних двигунів, трансформаторів, кабелів і батарей конденсаторів;

$u_p^{(a)}$ - питомі нормативні відрахування на реновацію відповідних видів устаткування;

τ_a - температура перегріву ізоляції вказаних видів електроустаткування при синусоїдальній напрузі;

U_v - відносне (у долях від напруги першої гармоніки) значення v -ї гармоніки напруги;

k_r – відношення активного і реактивного опорів мережі при промисловій частоті;

x_s – відносний реактивний опір трансформатора і навантаження.

При розрахунку економічного збитку[31] від дії вищих гармонік достатньо обмежитися 13-й гармонікою; облік гармонік вищих порядків не приводить до істотного уточнення величини збитку U_{Γ} .

Девіація напруги і частоти, що допустимі згідно нормативам і навіть дещо перевершують їх, не викликають порушень електропостачання споживачів. Тому функція економічного збитку U , викликаного відхиленням ПЯЕ від нульових значень (або у разі відхилення напруги – від оптимальних), є безперервною, а також диференційованою. Такі функції можна представити статечним рядом .

Функцію економічного збитку[31] для випадку, коли в електричній мережі мають місце відхилення і коливання напруги, а також його несиметрія, можна представити в загальному вигляді. Якщо режим роботи мережі стабільний і всі

показники якості електроенергії незмінні в часі, збиток при відхиленні напруги в i -му вузлі мережі буде мати вигляд:

$$Y_{\varepsilon i} = \sum_{S=1}^m \sum_{q=1}^n \beta_{qS} [\varepsilon(q_{\varepsilon})]^q, \quad (3.6)$$

$$Y_{v i} = \sum_{S=1}^m \sum_{v=2}^t \sum_{q=1}^n \alpha_{vq}(v) [U_v(q_v; \Delta U)]^q, \quad (3.7)$$

Запис $\alpha_{vq}(v)$ означає залежність цього коефіцієнта від номера гармоніки.

Сумарне значення збитку в мережі з числом вузлів W визначається за виразом:

$$Y_{\Sigma} = \sum_{i=1}^W (Y_{U i} + Y_{\varepsilon i} + Y_{v i}). \quad (3.8)$$

На великих металургійних, машинобудівних, хімічних промислових підприємствах, целюлозно-паперових комбінатах значення збитку, обумовлено наявністю відхилень і коливань напруги, його несиметрією і несинусоїдальністю, складають декілька сотень тисяч гривень на рік. Це свідчить про безумовну економічну доцільність поліпшення якості електроенергії.

Технологічну складову збитку $Y_{T\Sigma}$ обумовлену наявністю стабільних відхилень напруги від оптимальних значень для мережі з числом вузлів W , показано у вигляді лінійної суми:

$$Y_{T\Sigma} = \sum_{i=1}^W \sum_{S=1}^m \sum_{q=0}^n \delta_{qS}^{(i)} [\Delta V_q(q_{\Delta V}; \varepsilon; \delta V)]^q. \quad (3.9)$$

У всіх випадках не облік членів розкладання порядків $q > 3$ приводить до похибки у визначенні збитку, яка не перевищує 5%, що дозволяє нехтувати ними.

З матеріалу, що був розглянутий вище, робимо висновок, що при невідповідності рівнів показників якості електричної енергії вимогам Державного стандарту з'являються негативні впливи на споживачів. Ці впливи залежать від характеру викривлення кривої напруги. Вони можуть проявлятися сумісно або роздільно, постійно або стрибкоподібно. Але практично завжди вони ведуть до збитків.

Збитки, які обумовлені низькою якістю електричної енергії[31], мають дві складових: електромагнітну та технологічну. Електромагнітна складова визначається зростанням втрат енергії та зменшенням терміну служби електрообладнання. Технологічна складова збитків зумовлена впливом якості напруги на продуктивність технологічних установок і на собівартість продукції (технологічні збитки складають до 90 – 92% усіх збитків і вміщені в собівартість продукції).

Таким чином, поліпшення якості електричної енергії – це один з шляхів рішення проблеми енергозбереження.

Висновки

1. Результати дослідження підтвердили, що забезпечення більш точного аналізу гармонійного складу досліджуваного сигналу при наявності нелінійних навантажень в системі електропостачання вимагає включення в групи гармонік проміжних спектральних ліній.
2. При наявності нелінійних спотворень в електричній мережі найбільш точним методом визначення гармонічного складу напруги і струму є вейвлет-аналіз.
3. Ефективне підвищення точності проведення гармонійного аналізу може бути досягнуто при попередньому очищенні сигналу від шуму з подальшим вейвлет-аналізом (на відміну від застосування віконних функцій з подальшим ДПФ).

РОЗДІЛ 4 СТАРТАП ПРОЕКТ

4.3 Опис ідеї методу

Таблиця 4.1 Опис ідеї стартап-проекту

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

4.1.2 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 гармонічний склад без урахування відхилення частоти що автоматично усуває їх із числа конкурентів.

4.4 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.2 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. Результати визначення активної потужності та ефективного значення напруги показані у розділі 2.	Наявна	Повністю доступні авторам оскільки метод запатентований

Як видно із таблиці 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 пере-шкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку про-екту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

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

Таблиця 4.3 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од	15215
Загальний обсяг продаж, ум.од	100500
Динаміка ринку (якісна оцінка)	стагнує
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Мала проінформованість споживачів про вплив відхилення частоти на точність визначення гармонічного складу та про вплив вищих гармонік на приймачі електричної енергії
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Всі вимоги описані у нормативних документах описаних у розділі 1

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 Надалі визначаються *потенційні групи клієнтів*, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 4.4 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 вищими гармоніками	Великі та середні промислові підприємства у яких вищі гармоніки викликають брак продукції	Уникнення споживання неякісної електроенергії	Висока точність, швидкість та простота використання
Забезпечення високого рівня ПЯЕЕ	Електропередавальні компанії	Уникнення претензій від споживачів щодо зниження якості ПЯЕЕ зазначених у ДСТУ EN 50160 та інших нормативах зазначених у розділі 1	Висока точність, швидкість та простота використання

4.3.3 Аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають.

Таблиця 4.5 Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози Можлива реакція компанії
Недостатня проінформованість	Не всі керівники компаній мають розуміння необхідності проведення гармонічного 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 4.6 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 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 4.7 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 5 сил М. Портера)

Таблиця 4.8 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти
	-	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 постачальникам и, 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 гармонічного складу при відхиленні частоти. Отже, конкуренція настане тоді коли на ринку з'явиться аналогічний метод.

4.3.6 SWOT-аналіз

Таблиця 4.9 SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Врахування відхилення частоти (та її компенсування) при визначенні гармонічного складу. - Швидкий, простий та точний метод 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Необхідність наявності цифрової техніки вимірювання - Потрібні попередні професійні знання для застосування методу
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Можливість матеріальної компенсації браку спричиненого наявністю вищих гармонік з подальшою вигодою для авторів методу. - Підвищення якості моніторингу ПЯЕЕ 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Метод не здобуде необхідної популярності. - Імовірні клієнти не будуть вважати за необхідне проводити гармонічний аналіз, не кажучи вже про його точність.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

4.4.1 Визначення стратегії охоплення ринку

Таблиця 4.10 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 4.11 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, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
так	так	ні	заняття конкурентної ніші

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

4.5.1 Першим кроком є формування *маркетингової концепції товару*, який отримає споживач.

Таблиця 4.12 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

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

4.5.2 Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару.

Таблиця 4.13 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Визначати гармонічний склад при відхиленні частоти з невеликою похибкою.
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Швидкість 2. Простота 3. Точність
	Якість: стандарти, нормативи
	<ol style="list-style-type: none"> 1. ДСТУ EN 50160 2. EN 61000 3. IEEE-519-1992 4. СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-55_2011 <p style="text-align: center;">тощо</p>
Даний метод запатентовано, тому його захищено <i>Законом України «Про авторське право і суміжні права»</i>	

Таблиця 4.14 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 гармонічного складу	Надання послуги по визначенню гармонічного складу

4.5.3 Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій,

Таблиця 22. 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 гармонічного складу

Висновки.

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 гармонічного аналізу, що і може забезпечити метод корекції девіації. Це відкриває широкі перспективи впровадження. Хоча сильної конкуренції не просліджується існують бар'єри які заважають успішному просуванні, такі як необізнаність, а як наслідок, незацікавленість потенційних клієнтів.

ВИСНОВКИ

Найбільший вплив нестабільність частоти електричної мережі має на визначення величин, які відображають гармонічний склад системи напруг: коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги та коефіцієнт n -ої гармонічної складової напруги. На точність визначення даних величин також суттєво впливає і фаза сигналу напруги.

Похибка визначення величини відхилення напруги залежить від виду несиметрії – вона збільшується у випадку наявності амплітудної несиметрії і знижується у випадку появи фазової несиметрії.

Так як, в основному, похибка яка визвана нестбільністю частоти електричної мережі вноситься на етапі обчислення компонент Фур'є, то при їх визначенні пропонується враховувати величину невідповідності дійсного кута вибірки його розрахунковому значенню.

В даній роботі описані методи зменшення впливу відхилення частоти на визначення характеристик 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, і для частоти, яка відхиляється від номінального значення.

Результати дослідження підтвердили, що забезпечення більш точного аналізу гармонійного складу досліджуваного сигналу при наявності нелінійних навантажень в системі електропостачання вимагає включення в групи гармонік проміжних спектральних ліній.

При наявності нелінійних спотворень в електричній мережі найбільш точним методом визначення гармонічного складу напруги і струму є вейвлет-аналіз.

Ефективне підвищення точності проведення гармонійного аналізу може бути досягнуто при попередньому очищенні сигналу від шуму з подальшим вейвлет-аналізом (на відміну від застосування віконних функцій з подальшим ДПФ).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристика напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності.
2. IEEE Std 519-1992 // IEEE Recommend practices and Requirements for harmonic control in electrical power system.
3. СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-55_2011 Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення.
4. Girgins A.A. “Adaptive estimation of power systems frequency deviation and its rote of change for calculation sudden power system overloads”. IEEE Trans, on Power Delivery. – 1990, US, J.2, p.585-594
5. Backmutsky V. A new DSP method for precise dynamic measurement of the active power-line frequency and its data acquisition applications /V. Backmutsky V. , U. Zmudikov, A. Agizim ///[https://doi.org/10.1016/S0263-224\(96\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0263-224(96)00049-8)
- 6 Djuric B. Frequency measurement of distorted signals using Fourier and zero crossing techniques // Djuric B., D. Zeljko // Electronic Power Systems Research. 2008. V78, I.8.p.1407-1415.
7. Nguenn C.I. A new Technique for Rapid Tracking of Frequency Deviations Based on Level Crossings / C.I. Nguenn, K. Svinivasau // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. 1984. V.PAS-103, Js, 8. P.2230-2236
8. Kezunovic M. New digital signal processing algoritms for frequency deviation measurement / M. Kezunovic, P. Spasojevich, B. Perynicic// IEEE Trans. on Power Delivery. 2002. V.7., Js. 3, P. 1563-1573.
9. Begovic M.M. Frequency Tracking in power networks in the presence of harmonics / M.M.Begovic, P.M.Djuric, S.Dunlep // IEEE Trans. on Power Delivery. 1993.-V.8. Jss 2. P.480-486
10. Lobos T. Real-time determination of power systems frequency /T.Lobos, S.Rezwer // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 1997. U. 46. Js.4. P.877-881

11. Phadke A.G. Synchronized Phasor frequency Measurement Under Transient Conditions. /A.B. Phadke, B. Kaszleny // IEEE Trans. on Power Delivery. 2009. V 24, Js. v. p. 89-95.

12. Sidhu T.S. An Iterative Technique for Fast and Accurate Measurement of Power System Frequency /T.S.Sidhu, M.S. Sachdev // IEEE Trans. on Power Delivery. 1998. V.13. №1. P.109-115.

13. Givay M.M. Off-nominal frequency measurements in electric power systems /M.M. Givay, M.S. Sachdev // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. 1984. U. PAS-103. Js. 10. P. 2943-2951

14. Terzija V.V. Voltage Phasor and local system frequency estimation using Newton type algorithm / V.V. Terzija, M.B. Djuvich, B.D. Kovasevic // IEEE Trans. on Power Delivery. 1994. V. 14. Js.3. P.1368-1374

15. Girgins A.A. Optimal Estimation of Voltage Phasors and Frequency Deviation Using Linear and Non-Linear Kalman Filtering: Theory and Limitations /A.A. Girgis, T.L.D. Hwang // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. 2007. V. PAS-103, Js.10.p.2943-2951

16. Tang S. Adaptive load shedding based on combined frequency and voltage stability aswent using synchrophasor measurements / J.Tang, F.Ponci, A.Monti // IEEE Trans. on Power Delivery. -2013, U.28/Js.2 P.2035-2047

17. Dai X. Quasi-synchronous sampling algorithm and its applications / X.Dai, R. Grech, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement: 1994. V.43. Js 2. P. 204-209

18. Волошко А.В. Устранение влияния нестабильности частоты сети на на точность определения показателей качества *электрической энергии* / А.В. Волошко, О.В. Коцарь // Техническая электродинамика. – 1994. – № 4. – С. 73 – 77.

19. Шершень О. І. Вплив коливання частоти електричної мережі на точність проведення гармонічного аналізу, та способи їх зменшення / О. І. Шершень, А.В. Волошко // «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА»2018.

20. Лагутін Г.І. Вищі гармоніки в системах електропостачання / Г.І. Лагутін, А.М. Панченко, А.І. Гарагуля // Системи озброєння і військова техніка, 2012, № 2(30) ISSN 1997-9568.

21. С. Ю. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХП»; В. В. ВОЛОХІН, канд. техн. наук, доцент, СумДУ, Суми; І. М. ДЯГОВЧЕНКО, аспірант, СумДУ, Суми; Д. М. МАКУХА, асистент, СумДУ, Суми;

Стаття «АКТУАЛЬНІСТЬ УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ НАПРУГИ ПРИ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ»

22. K. Srinivasan, "Errors in digital measurements of voltage, active and reactive powers and on-line correction for frequency drift", IEEE Trans, on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 1, January 1987, pp. 72-76.

23. Garg R. Geo-location estimation from electrical network frequency signal/R. Gard, A Hajj-Ahmad// www.ece.umd.edu/~minwu/public_paper/Conf13/1305_ENFLocalize_icassp13.pdf.

24. G.N. Stenbakken, "A wide band sampling watt meter", IEEE Trans, on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS- 103, No. 10, October 1984, pp. 2919-2925.

25. F Adamo, F Attivissimo, A Di Nisio, M Savino, M Spadavecchia/ A spectral estimation method for nonstationary signals analysis with application to power systems// Measurement. 2015. - V. 73. – P. 247 - 261.

26. G. Andria, M. Savino, A. Trotta, "Windows and Interpolation Algorithms to improve Electrical Measurement Accuracy", IEEE Trans, on Instrum. & Meas., Vol. 38, No. 4, August 1989, pp. 856-863.

27. Ruipeng D. An Interpolation Algorithm for Discrete Fourier Transforms of Weighted Damped Sinusoidal Signals// D. Ruipeng, M. Qingfeng/ IEEE Transaction on Instrumentation and measurement. – 2013. – Volume 63. – Issue 6. – P. 1505 - 1513.

28. Ferrero A. A Calibration procedure for a digital instrument for electric power quality measurement//A. Ferrero, M. Lazzaroni, S. Salicone/ IEEE Transaction on Instrumentation and measurement. – 2002. – Volume 51. – Issue 4. – P. 716 – 722.

29. Tarasiuk T. Interpolation based on wavelet coefficients for frequency measurement/Proc. XVII IMEKO World Congress , June 22 – 27. – 2003. – P. 895 – 898.

30. Волошко А.В. Выполнение гармонического анализа с помощью вейвлет-преобразования / А.В. Волошко // ISSN 0204 Электрон. моделирование. 2012. Т. 34. №4

31. http://moodle.hups.mil.gov.ua/pluginfile.php/7360/mod_resource/content/1/%D0%93%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%B0%203.pdf