

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ВПЛИВ ВИЩИХ ГАРМОНІЙНИХ СКЛАДОВИХ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-Е23мг-1
Спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/Владислав СТАРОКОЖКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/Антон СКОРКІН
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки і електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

К.Т.Н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти
здобувачу вищої освіти Владиславу СТАРОКОЖКУ

1. Тема «Вплив вищих гармонійних складових на функціонування систем електропостачання промислових підприємств» затверджена наказом по університету № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.
2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Напруга та струм у різних точках системи, характеристики навантаження, надійність роботи обладнання (кількість відмов, простоїв), витрати на обслуговування та ремонт.
4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. ВИМІРЮВАННЯ ТА МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ; РОЗДІЛ 2. ГАРМОНІЙНІ СПОТВОРЕННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДО 1 кВ; РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ РІВНІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК: МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ; ВИСНОВКИ
5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):
Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024 р.

Керівник

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Владислав СТАРОКОЖКО

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	12.10.24 – 15.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	16.10.24 – 23.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	24.10.24 – 01.11.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	02.11.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Владислав СТАРОКОЖКО

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ВИМІРЮВАННЯ ТА МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

- 1.1. Сучасні дослідження проблеми ВГ в СЕП: літературний аналіз
- 1.2. Вплив вищих гармонік на роботу електричних мереж
- 1.3. Вищі гармоніки в розподільчих мережах 0,4 кВ: методи зниження

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

РОЗДІЛ 2. ГАРМОНІЙНІ СПОТВОРЕННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДО 1 кВ

- 2.1. Вплив вищих гармонік на електрообладнання
- 2.2. Дослідження гармонік в первинних струмах

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ РІВНІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК: МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ

- 3.1. Автоматизація розрахунку вищих гармонік в електричних мережах промислових підприємств з нелінійним навантаженням
- 3.2. Засоби зниження гармонічних спотворень
 - 3.2.1. Оптимізація кривої мережевого струму
 - 3.2.2. Поліпшення якості електропостачання через зниження гармонік
- 3.3. Резонансні фільтри для енергетичних систем

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ:

СЕП - системах електропостачання

ЕЕ – електрична енергія

ДБЖ/UPS - джерела безперебійного живлення

ТКП - тиристорно-конденсаторні перетворювачі

СУ - система управління

ПІ - паралельний інвертор

ВГ – вищі гармоніки

ДСП – дугосталеплавильна піч

SCR - Silicon Controlled Rectifier

ВСТУП

Поняття «якість електричної енергії» є одним з ключових понять. Від показників якості залежить робота приладів, апаратів та іншого електрообладнання, а також залежить ефективна та надійна робота системи електропостачання в цілому щодо постачання споживачеві електричної енергії відповідної якості.

Розглядаючи конкретну систему «випрямляч – інвертор», необхідно зауважити, що проблема якості електричної енергії на надійності електропостачання має багато проблем, серед яких наявність гармонійних складових у системі електропостачання. Як відомо, вищі гармоніки негативно впливають на якість електричної енергії та, як наслідок, знижують надійність та ефективність електропостачання споживачів. Причина появи вищих гармонік в системах електропостачання – що стосується промисловості, це наявність промислових приладів, які мають нелінійні вольт-амперні характеристики, що стосується побуту – наявність приладів, які мають широке розповсюдження в побутовому секторі. В процесі експлуатації ці прилади погіршують якість електричної енергії.

Вплив вищих гармонік залежить від декількох факторів: тривалість дії ВГ, їх інтенсивність та характер. В свою чергу вищі гармоніки знижують строк експлуатації електрообладнання, знижують, як зазначалося вище, надійність роботи обладнання.

Оскільки проблема є важливою та поширеною, їй приділяється багато уваги. Для того, щоб знайти оптимальні заходи щодо зменшення негативного впливу ВГ та поліпшити якість електричної енергії, вивчаються режими їх роботи та розрахунок, формуються методики вимірювання вищих гармонік в мережі та, відповідно, пропонуються шляхи зменшення їх негативного впливу. Отже, тема є безперечно, актуальною та вимагає неабиякої уваги, постійного моніторингу та пропонування нових та ефективних шляхів боротьби з вищими гармонійними складовими.

Робота присвячена аналізу впливу вищих гармонік на роботу систем електропостачання.

Мета дослідження полягає у аналізі вищих гармонік у системі промислових підприємств, визначенні впливу вищих гармонік в мережах електропостачання та дослідженні методів зниження рівнів вищих гармонік.

Завдання дослідження полягає у наступному:

- аналіз існуючих методів та визначення залежності якості електроенергії від появи вищих гармонік;
- удосконалений метод зниження рівнів вищих гармонік;

Предмет дослідження – система електропостачання промислових підприємств.

Об’єкт дослідження– вищі гармоніки в системі промислових підприємств.

Практична значущість отриманих результатів полягає у постановці завдання дослідження, проведення теоретичних досліджень та аналізі публікацій щодо вищих гармонік в СЕП, формуванні положень щодо зниження рівнів вищих гармонік в системах електропостачання.

РОЗДІЛ 1. ВИМІРЮВАННЯ ТА МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1.1. Сучасні дослідження проблеми ВГ в СЕП: літературний аналіз

Гармоніками називають синусоїдальні хвилі, які додаються до основної частоти мережі 50 Гц. Будь-яка комплексна форма синусоїди може бути розкладена на складові, отже, комплексна синусоїда є сумою визначеної кількості парних або непарних гармонік з різними величинами. Гармоніки представляють собою тривалі обурення або спотворення в електричній мережі, які мають різні джерела та прояви: імпульси, провали, броски.

Як вже зазначалося, вищі гармоніки є поширеним та негативним наслідком використання в системах електропостачання приладів, які мають нелінійну вольт-амперну характеристику. На промислових підприємствах поширеними джерелами вищих гармонік є ДСП. В свою чергу несинусоїдальні режими негативно впливають на силові обладнання, системи релейного захисту, автоматики та телекомунікації. ВГ є причиною економічних втрат, погіршення енергетичних показників, скорочення терміну роботи електричного обладнання, зниження надійності функціонування систем електропостачання. Також наявність ВГ можуть впливати на якість продукції, що підприємство випускає.

Збільшення виробничих потужностей в свою чергу є причиною загострення проблеми електромагнітної сумісності ДСП з мережею. З одного боку, підвищуються вимоги щодо дотримання показників якості електричної енергії у будь-якому місці підключення споживача, з іншого боку – використання ДСП призводить до того, що для підтримки цих показників у потрібних межах необхідні матеріальні витрати, які зростають.

Серед багатьох проблем, що існують в системах електропостачання та викликані різноманітними причинами, окремо виділяють проблеми, спричинені дією вищих гармонік. Отже, основні з них:

- додатковий нагрів та порушення нормального режиму роботи конденсаторів, запобіжників, трансформаторів, електричних двигунів, люмінесцентних ламп тощо;
- хибне спрацювання автоматичних вимикачів;
- необхідність збільшення перетину провідника через наявність 3-ї гармонійної складової;
- пошкодження рівня чутливості електричного обладнання;
- неправильна робота систем контролю через гармонічні шуми.

Розглянемо більш детально причини появи гармонійних складових. Вимоги промисловості щодо якості та надійності електропостачання постійно збільшуються. Також вимагається більш підвищена точність контролю режимів роботи електрообладнання. Це призвело, в свою чергу, до появи відносно недорогого обладнання, такого як діодів, тиристорів, SCR (Silicon Controlled Rectifier) та інших напівпровідників.

Наразі актуальними є UPS напівпровідники, статичні перетворювачі змінної напруги, пристрої плавного пуску. Вони дещо змінили форму струму та напруги в мережах. Але проблема генерації вищих гармонік існує. ВГ впливають на процес роботи систем електропостачання, перевантажують конденсатори, які використовуються з метою компенсації реактивної потужності в мережах.

Багато елементів систем електропостачання є джерелами вищих гармонік. Серед них відзначимо наступні:

- зварювальне, дугове обладнання: ДСП, зварювальні автомати, освітлення (люмінесцентні лампи);
- силове електронне обладнання: частотні приводи змінного струму, привода постійного струму, джерела безперебійного живлення UPS, випрямлювачі, конвертори, тиристорні системи, діодні мости, плавильні печі високої частоти;
- пристрої, що насичуються: трансформатори, генератори, електродвигуни. Якщо насичення не здійснюється, то величина

гармонійних складових є незначною та не дуже впливає на якість електричної енергії.

Як відомо, показники якості електричної енергії визначаються відповідним ДСТУ 13109-97 [11]. Аналізуючи ці показники, звернемо увагу на коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_i та коефіцієнти гармонійних складових напруги $K_{i(p)}$. Існують нормально допустимі значення і гранично допустимі значення. У даному випадку нормально допустимі та гранично допустимі значення величини K_i для мереж загального призначення наведені у таблиці 1.1. [24].

Таблиця 1.1. - Значення коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги (%)

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

1.2. Вплив вищих гармонік на роботу електричних мереж

Рівень складності обладнання у сфері комп'ютерних технологій постійно зростає. Тому системи забезпечення якості електропостачання (наприклад, джерела безперебійного живлення, ДБЖ/UPS) повинні бути розроблені таким чином, щоб вони були здатні впоратися з широким спектром проблем, починаючи від провалів, коливань, викидів напруги, високочастотних шумів, імпульсних перешкод та закінчуючи електроживленням за повної відсутності напруги промислової мережі. Однією з таких проблем є спотворення форми напруги, викликані гармонійними складовими струму, що споживається нелінійним навантаженням.

Більшість комп'ютерного та офісного обладнання є нелінійним електричним навантаженням, що створює спотворення в мережі живлення.

Сумарний ефект цих навантажень виражається у спотворенні напруги, що впливає на інше обладнання, що отримує електроживлення від джерела. Це може спричинити перегрів та розсинхронізацію в інших пристроях, збої в комунікаціях та мережах передачі даних, пошкодження апаратури та інші небажані ефекти.

Ступінь спотворень може бути визначена коефіцієнтом спотворення синусоїдальності K_i - ставленням діючого значення вищих гармонійних до чинного значення основної (першої) гармоніки [24] та коефіцієнтом амплітуди (хрест-фактором) навантаження K_a - ставленням пікового значення споживаного струму до його чинного значення.

Ефекти, що викликаються вищими гармоніками напруги та струму

Останні можуть бути поділені на ефекти миттєвого та тривалого виникнення.

Проблеми миттєвого виникнення включають:

- ✓ спотворення форми напруги живлення;
- ✓ падіння напруги у розподільчій мережі;
- ✓ ефект гармонік, кратних трьох (у трифазних мережах);
- ✓ резонансні явища на частотах найвищих гармонік;
- ✓ наведення у телекомунікаційних та керуючих мережах;
- ✓ підвищений акустичний шум у електромагнітному

устаткуванні;

- ✓ вібрація у електромашинних системах.

Проблеми тривалого виникнення включають:

- ✓ нагрівання та додаткові втрати у трансформаторах та електричних машинах;
- ✓ нагрівання конденсаторів;
- ✓ нагрівання кабелів розподільної мережі.

Розглянемо докладніше причини виникнення зазначених ефектів та можливі шляхи та засоби їх вирішення.

Форма напруги живлення

Підвищене значення коефіцієнта амплітуди вказує на те, що є великий пік споживаного струму за половину періоду частоти мережі. Чим вище пікове значення струму і менше його тривалість за півперіод напруги мережі, тим більше його спотворення. Коефіцієнт амплітуди струму даного навантаження змінюється залежно від характеру джерела електроживлення, у той час як здатність самого джерела до забезпечення навантажень з великим коефіцієнтом амплітуди визначається його повним внутрішнім опором та його здатністю забезпечувати пікові значення струму, що споживається від нього.

Розглянемо докладніше причини виникнення зазначених ефектів і можливі шляхи та засоби їх вирішення.

✓ Форма напруги живлення

Підвищене значення коефіцієнта амплітуди вказує на те, що є великий пік споживаного струму за половину періоду мережної частоти. Чим вище пікове значення струму і менше його тривалість за півперіод напруги мережі, тим більше його спотворення. Коефіцієнт амплітуди струму даного навантаження змінюється в залежності від характеру джерела електроживлення, в той час як здатність самого джерела до забезпечення навантажень з великим коефіцієнтом амплітуди визначається його повним внутрішнім опором і його здатністю забезпечувати пікові значення струму, що споживається від нього. Для багатьох пристроїв, що виконують функції джерел електроживлення, така здатність може бути досягнута шляхом завищення номінальних параметрів цього обладнання. Зокрема, у сучасних генераторних установках змінного струму надперехідний реактивний опір становить приблизно 15%, що справляє досить несприятливий вплив на форму напруги, якщо не використовуються спеціальні обмотки або потужність генератора не буде обрана завідомо завищеною.

Сучасні джерела безперебійного живлення (ДБЖ/UPS) здатні контролювати форму напруги на кожному напівперіоді синусоїди. В даний

час в переважній більшості систем безперебійного живлення практично будь-якої потужності використовуються інвертори на біполярних транзисторах із ізольованим затвором (IGBT) за високочастотного широтно-імпульсного методу їх управління. Такі системи мають здатність живлення навантажень з високими коефіцієнтами амплітуди струму (3 і вище) за рахунок перемикачів на високій частоті та коригування форми напруги на кожному напівперіоді. Ця здатність віддавати струм із високими піковими значеннями може призводити до того, що форма напруги на виході ДБЖ з подвійним перетворенням енергії помітно краще, ніж у промислової мережі на вході системи.

✓ Падіння напруги у розподільчій мережі

Більшість ДБЖ здатна жити навантаження з високим значенням коефіцієнта амплітуди, причому коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги не перевищує 3-6%. Однак це рівень спотворень напруги, що отримується при вимірах на вихідних клеммах самих ДБЖ, але не в місцях підключення навантаження.

Слід враховувати, що форма струму через високий відсотковий зміст вищих гармонік сильно відрізнятиметься від синусоїдальної. Форми струмів для однофазного (рис. 1.1) та трифазного (рис. 1.2) випрямлячів характеризуються певним відсотковим вмістом непарних високочастотних гармонік (таблиця 1.2). Відповідні спектри таких струмів наведено на рис. 1.3.

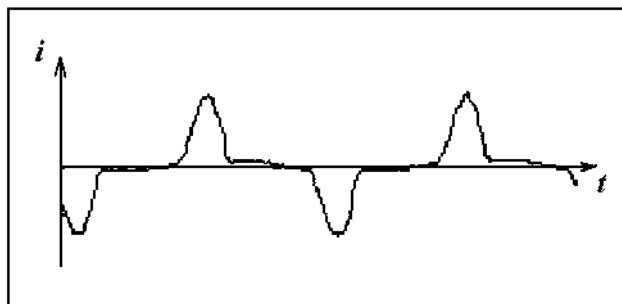


Рисунок 1.1. – Форма струму однофазного випрямлювача

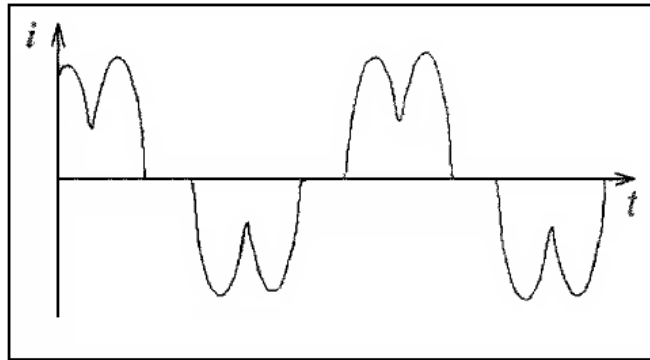
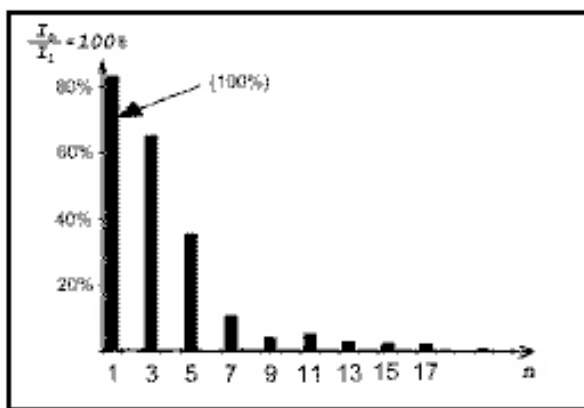
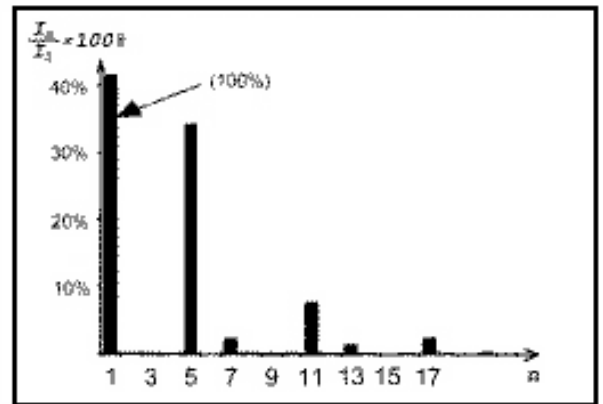


Рисунок 1.2. – Форма струму трифазного випрямлювача



а)



б)

Рисунок 1.3. – Спектри вхідних струмів випрямлювачів:

а) однофазного; б) трифазного.

Таблиця 1.2. – Спектральний склад струму на вході ДБЖ (приклад – при 100% навантаженні для ДБЖ без вхідного фільтру і коректора коефіцієнта потужності)

№ гармоніки, n	Однофазний ДЖБ, I_n/I_1 , (%)	Трифазний ДЖБ, I_n/I_1 , (%)
1	100	100
3	65,7	-
5	37,7	33
7	12,7	2,7
9	4,4	-
11	5,3	7,3

13	2,5	1,6
15	1,9	-
17	1,8	2,6

Повний опір розподільчої мережі має значною мірою індуктивний характер. Тому при дуже високому змісті гармонік струмів відповідне падіння напруги на кабелях і проводах стає набагато вищим за гранично допустимі значення, і в типових розподільних системах з кабельними трасами довжиною більше 100 метрів може відбуватися сильне спотворення напруги на навантаженні. Прикладом таких спотворень може бути графіки струму і напруги на вході однофазного випрямляча залежно від величини відносної реактивної складової опору вхідного фідера або внутрішнього опору джерела живлення випрямляча (рис. 1.4).

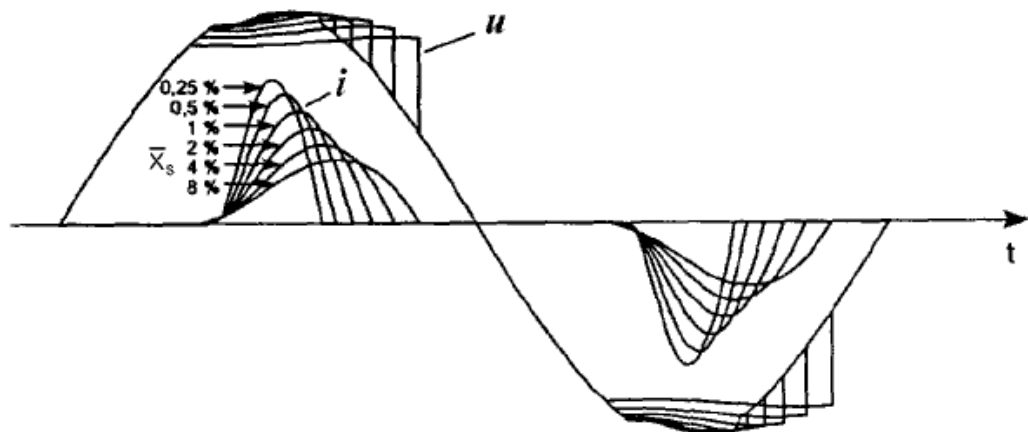


Рисунок 1.4. – Форми напруги і струму на вході безтрансформаторного однофазного випрямлювача в залежності від відносної реактивної складової опору вхідного фідера

✓ Ефект гармонік кратних третьої

Вищі гармоніки струму кратні трьом (тобто 3, 9, 15, 21 і т. д.), що визначають високе значення коефіцієнта амплітуди та генеруються однофазними навантаженнями, мають специфічний результируючий вплив у трифазних системах. У збалансованій (симетричній) трифазній системі

гармонійні (синусоїдальні) струми у всіх трьох фазах зсунуті на 120 градусів по відношенню один до одного, і в результаті сума струмів у нейтральному провіднику дорівнює нулю. Отже, немає і падіння напруги на провіднику нейтралі в кабелі.

Це твердження залишається справедливим більшість гармонік. Однак деякі з них мають напрямок обертання вектора струму в той самий бік, що і основна гармоніка (перша, "фундаментальна", тобто 50 Гц), тобто вони мають пряму послідовність. Інші обертаються у зворотному напрямку і, таким чином, мають зворотну послідовність. Це не стосується гармоніків, кратних третьої:

$$n = 3 \cdot (2 \cdot k + 1) \quad (1.1)$$

де $k = 0, 1, 2, \dots$

У трифазних ланцюгах вони зсунуті на 360 градусів один до одного, збігаються по фазі та утворюють нульову послідовність. Непарні гармоніки, кратні третьої, підсумовуються у провіднику нейтралі (рис. 1.5).

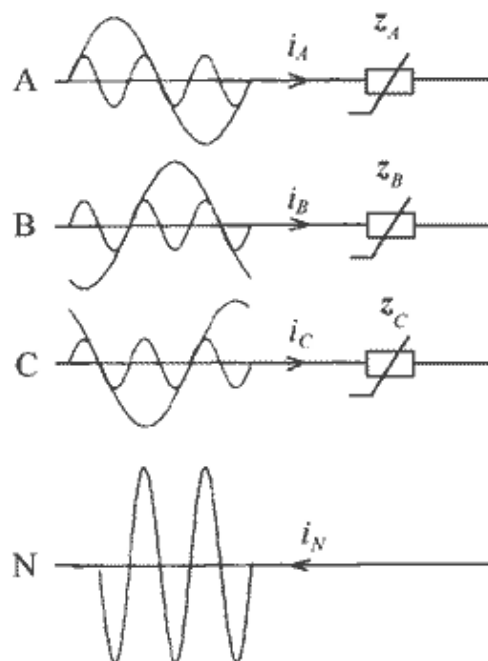


Рисунок 1.5. – Процес формування струму нейтралі при нелінійному навантаженні

В результаті, з урахуванням того, що вони складають велику частку в діючому значенні фазних струмів, загальний струм нейтралі може перевищувати фазні струми.

$$I_N = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots} \quad (1.2)$$

Так, наприклад, при фазних струмах рівних 37 А струм нейтралі становить 55 А при частоті, що дорівнює 150 Гц [25].

Неправильно спроектовані чотирипровідні кабелі трифазних мереж можуть перегріватися аж до займання, підтверджуючи цим необхідність збільшення перерізу провідників нейтралі трифазних кабелів мережі електроживлення комп'ютерного обладнання. Гармоніки, кратні третьої, призводять до падінь напруги як в нейтралі, так і фазних провідниках, викликаючи спотворення форми напруги на інших навантаженнях, підключених до цієї мережі.

Крім зазначеного вище, у міжфазних напругах трифазної мережі будуть відсутні гармоніки, кратні трьом, у зв'язку з чим співвідношення між фазним і міжфазним напруг при несинусоїдальних струму стає менше, ніж .

✓ Резонансні явища на частотах найвищих гармонік.

За наявності вищих гармонік в електричних ланцюгах із зосередженими та розподіленими параметрами, якими можуть бути представлені блоки, вузли та розподільчі мережі системи електроживлення, виникає небезпека появи резонансних явищ. При виникненні резонансного або близького до нього режиму будь-якої вищої гармоніки струму або напруги ця складова виявляється більше, ніж амплітудне значення першої гармоніки струму (напруги) на тих же ділянках ланцюга. Це негативно може позначитися на працездатності окремих елементів та вузлів системи.

✓ Наведення в телекомунікаційних та керуючих мережах.

Коли телекомунікаційні чи керуючі мережі проходять поблизу силових мереж, якими протікають струми вищих гармонік, у перших можуть наводитися перешкоди та спотворення інформаційного сигналу. Величина

спотворення залежатиме від частоти вищих гармонік, довжини паралельних ділянок мереж та відстані між ними.

✓ Акустичний шум.

В трансформаторах, дроселях та інших електромагнітних елементах найвищі гармоніки струму, створюючи електродинамічні зусилля, викликають додаткові акустичні шуми.

✓ Вібрація у електромашинних системах.

Наявність вищих гармонік в напрузі живлення індукційних електродвигунів є причиною виникнення в магнітному потоці складових на частотах вищих гармонік, які в свою чергу наводитимуть гармоніки ЕРС і, як наслідок, в обмотках ротора з'являються гармонії струму. створюючи додаткові механічні моменти на валу електричної машини. створюються гармонійні пульсації крутного моменту на валу двигуна.

✓ Нагрів та додаткові втрати у трансформаторах та електричних машинах.

Додаткові втрати, що викликають перегрів трансформаторів за наявності вищих гармонік, виникають через скін-ефект у міді обмотки (збільшення активного опору обмотки зі зростанням частоти), а також збільшенням втрат на гістерезис та вихрові струми в магнітопроводі трансформатора.

В електричних машинах, крім аналогічних втрат у статорі (втрати в міді та магнітопроводі), через значну різницю в швидкостях обертових магнітних полів, створюваних вищими гармоніками, і швидкістю обертання ротора виникають додаткові втрати в демпферних обмотках ротора і магнітопроводі електричної машини.

✓ Нагрівання конденсаторів.

Додаткові втрати за наявності вищих гармонік у конденсаторах обумовлені збільшенням "кута втрат" у діелектриці та зростанням діючого значення струму конденсатора. Перегрів, що виникає, в конденсаторі може

призводити до пробую діелектрика. Крім цього, конденсатори чутливі до перевантажень, що викликається присутністю вищих гармонік напруги.

✓ Нагрівання кабелів розподільної мережі.

Додаткові втрати в кабелях силової мережі, що призводять до підвищення температури провідників, за наявності вищих гармонік струму викликаються такими основними причинами:

- збільшенням чинного значення негармонічного струму;
- збільшенням активного опору провідника через скін-ефект;
- збільшенням втрат у діелектриці ізоляції кабелю.

Можливі засоби вирішення проблеми.

Різні методи можуть використовуватися, щоб спробувати послабити вплив проблем, викликані вищими гармоніками струму при навантаженнях з високим значенням коефіцієнта амплітуди.

✓ Забезпечує симетричний режим роботи трифазної системи.

Насамперед необхідно домогтися наскільки це можливо збалансованості навантажень по фазах. При цьому забезпечується мінімальний струм у провіднику нейтралі та мінімальний вміст гармонік у вихідній напрузі джерел безперебійного ітання. Відповідні схеми контролю та управління в ДБЖ підтримуватимуть номінальне діюче значення вихідної напруги, в той же час прагнучи забезпечити його синусоїдальну форму. Не завжди можна одночасно виконати обидві ці функції. У випадку незбалансована навантаження впливає напруга, викликаючи його спотворення. Хоча воно і відносно мало за величиною, але також додається до загальних спотворень у кабелі. Зазвичай переважають ті спотворення напруги, які згенеровані у розподільчій мережі.

Одним із раціональних способів симетрування однофазних навантажень у трифазній мережі є використання ДБЖ з подвійним перетворенням енергії при трифазному вході та однофазному виході (3ф/1ф). І тут розвантажується нейтраль, оскільки вона не бере участі в роботі трифазного випрямляча на вході ДБЖ, що знаходиться в

нормальному режимі перетворення напруги. Однак цей ефект зникає при переході ДБЖ на режим «Bypass».

✓ Включення в систему розділового трансформатора з обмотками «трикутник-зірка».

Цей метод використовувався практично, але не завжди з успіхом [7]. Передбачалося, що в цьому випадку трансформатор не пропускає гармоніки, кратні третій, і що відсутність провідника нейтралі на стороні первинної обмотки виключає падіння напруги на нейтралі. Але таке твердження виявилось правильним лише частково. Збалансовані гармоніки, кратні третьої, наводять відповідні магнітні потоки в стрижнях сердечника трансформатора і, якщо вони рівні за величиною і збігаються по фазі, то напруги, наведені в первинній обмотці, будуть компенсовані.

Крім цього, будь-який трансформатор має індуктивність розсіювання, яка додається до існуючого повного вхідного опору розподільчої мережі. Це може мати ефект зменшення коефіцієнта амплітуди струму навантаження та сумарного значення коефіцієнта спотворень синусоїдальності струму. Однак спотворення напруги збільшується, а максимальне значення напруги постійного струму для живлення інвертора ДБЖ знижується.

✓ Використання фільтрів придушення гармонік.

Третя гармоніка є домінантною за своїм найбільш несприятливим впливом в однофазних ланцюгах. Включення в схему фільтра, який має низький повний опір на частоті цієї гармоніки, знижує напругу, що генерується нелінійним навантаженням. Застосування таких фільтрів у разі систем безперебійного живлення найбільше успішно для компенсації ефекту незбалансованих навантажень, які мають тенденцію генерувати високі рівні гармонік. Фільтри можуть бути встановлені як усередині ДБЖ, так і розташовані на вихідному кінці кабелю (тобто на стороні навантаження). Тоді струми третьої гармоніки циркулюють між навантаженням та фільтром, частково знижуючи сумарний струм у провіднику нейтралі.

Однак таке підключення не дає остаточного вирішення проблеми, якщо на виході ДБЖ підключено розподілені навантаження. Встановлений таким чином фільтр захищає лише частину навантаження, до якого безпосередньо підключений. Тому схема підключення має бути такою, щоб фільтр захищав усе навантаження, а не лише її частину. Це може викликати труднощі щодо вартості обладнання та необхідної площі при розміщенні додаткових пристроїв у декількох ділянках розподільної мережі на різних поверхах будівлі.

Особливе значення мають фільтри, що встановлюються на вході ДБЖ. Шостинапівперіодні (шостипульсні) випрямлячі, що застосовуються в трифазних ДБЖ, створюють високий рівень п'ятої гармоніки струму в мережі живлення. Для зниження гармонійного складу споживаного струму та підвищення коефіцієнта потужності системи у фазні дроти включають індуктивні опори (дроселі). Підвищення ефективності придушення вищих гармонік струму є включення вхідного фільтра ДБЖ, налаштованого на п'яту гармоніку.

- ✓ Застосування дванадцятипівперіодного випрямляча в ДБЖ.

Для зниження величини коефіцієнта спотворення синусоїдальності вхідного струму трифазних ДБЖ до рівня менше 10% використовують 12-напівперіодні (12-пульсного) випрямлячі.

- ✓ Зниження повного опору розподільчої мережі.

Це один із ефективних методів зниження нелінійних спотворень. Кабелі та збірні шини мають повний опір, який прямо пов'язаний із довжиною ліній. Збільшення перерізу кабелів (проводів) знижує активний опір розподільчої мережі, але знижує її індуктивність. Максимальний ефективний переріз жил кабелів (проводів) становить приблизно 95 кв. мм. З подальшим збільшенням перерізу кабелів їх індуктивність залишається відносно постійною. Очевидно, що ефективнішим буде використання паралельно з'єднаних кабелів (дротів). При можливості використання децентралізованої системи безперебійного живлення слід розглянути поділ

всього інстальованого обладнання (тобто пристроїв, що входять до складу навантаження, що захищається) на секції, кожна з яких буде запитана від окремого джерела безперебійного живлення (ДБЖ).

Слід пам'ятати, що під час профілактичних, ремонтних тощо. робіт системи безперебійного живлення повинні бути переключені в режим обходу (Bypass). У цьому можливе зростання рівня спотворень, оскільки нелінійне навантаження безпосередньо буде підключено до первинного джерела змінної напруги (генератор, трансформатор підстанції тощо). Форма напруги мережевого електроживлення часто буває спотворена через інші навантаження, що не належать до критичних, але мають характеристики, подібні до комп'ютерного та офісного обладнання. Спотворення форми напруги електроживлення, згенеровані іншим обладнанням, додадуться до спотворень від комп'ютерного навантаження, яке було переключено на живлення безпосередньо від мережі (на час профілактики або ремонту ДБЖ), створюючи таким чином більш високі рівні спотворень.

1.3. Вищі гармоніки в розподільчих мережах 0,4 кВ: методи зниження

Усі країни на певному етапі концентрації комп'ютерної техніки стикаються з нею та змушені кардинально змінювати технічні регламенти експлуатації, норми проектування, розробляти відповідну базу стандартів.

У випадках, коли потужність нелінійних електроспоживачів не перевищує 10-15 %, будь-яких особливостей експлуатації системи електропостачання, як правило, не виникає. При перевищенні зазначеної межі слід очікувати появи різних проблем в експлуатації та наслідків, причини яких не є очевидними. У будинках, що мають частку нелінійного навантаження понад 25%, окремі проблеми можуть виявитися відразу.

Негативний вплив вищих гармонік

Вищі гармонічні складові струмах нелінійних електроспоживачів призводять до негативних, котрий іноді катастрофічних наслідків.

1. Можливе перегрів та руйнування нульових робочих провідників кабельних ліній внаслідок їх перевантаження струмами третьої гармоніки. Це відбувається тоді, коли струми в нульових робочих провідниках значно перевершують струми фазних провідників, а захист від струмових перевантажень у ланцюгах нульових провідників не передбачено (п.1.3.10 ПУЕ). Відзначимо також прискорене старіння ізоляції при підвищенні робочої t_0 струмонесучих провідників.

Нульовий робочий провідник не захищений від перегріву автоматичними вимикачами чи запобіжниками (п.3.1.17 ПУЕ). «Старі» системи електропостачання проектувалися лише під лінійне навантаження, тобто. споживаний електроприймачами струм містив лише основну гармоніку (50 Гц). Отже, струм у нульовому робочому провіднику було перевищувати струм найбільш навантаженої фази, тобто. захист на фазних провідниках одночасно захищав від перегріву та нульовий робочий провідник.

Крім того, в процесі експлуатації нерівномірність розподілу струмів по фазах повинна бути не більше ніж 10%. Тому при визначенні тривало допустимих струмів за умовами нагрівання проводів та кабелів нульовий робочий провідник чотирипровідної системи трифазного струму, заземлювальні та нульові захисні провідники до розрахунку не приймаються (ПУЕ), оскільки струм у цих провідниках за наявності лінійних електроспоживачів істотно менший за струми у фазних провідниках.

У разі нелінійних електроспоживачів струми в нульових робочих провідниках перевищують фазні (гранично - в 1,73 рази, коли ширина імпульсу струму дорівнює 60 електричним градусам).

Тому значення тривало допустимих струмі, у разі нелінійних електроспоживачів мають бути знижені. На корпусах електрообладнання,

підключеного до нульового дроту, можуть виникати напруги, що при дотику надають дратівливий вплив на людину.

Однак у випадках використання протяжних ліній малого перерізу може виникати небезпечна (понад 50 В) напруга дотику на корпусах електроприймачів у системі TN-C, коли функції нульового захисного та нульового робочого провідників об'єднані в одному провіднику. При системі TN-S подібний ефект теоретично може виникнути при протіканні нульовим захисним провідником струму значної величини (при короткому замиканні).

2. Спотворення синусоїдальності напруги живлення. Наслідком характеру струму, який споживається імпульсним навантаженням, є деформація синусоїди напруги, що діє на затискачах навантаження (рис. 1). Синусоїда напруги стає «плоскою», тому що в момент імпульсу струму збільшується падіння напруги на внутрішньому опорі мережі:

$$U_{\text{навантаження}}(t) = U_{\text{мережі}}(t) - i(t) \cdot Z_{\text{мережі}} \quad (1.3)$$

де $U_{\text{навантаження}}(t)$ - деформована синусоїда напруги на затискачах навантаження;

$U_{\text{мережі}}(t)$ - синусоїдальна напруга мережі живлення;

$i(t)$ - імпульсний струм навантаження;

$Z_{\text{мережі}}$ — повний опір мережі з боку затискачів навантаження.

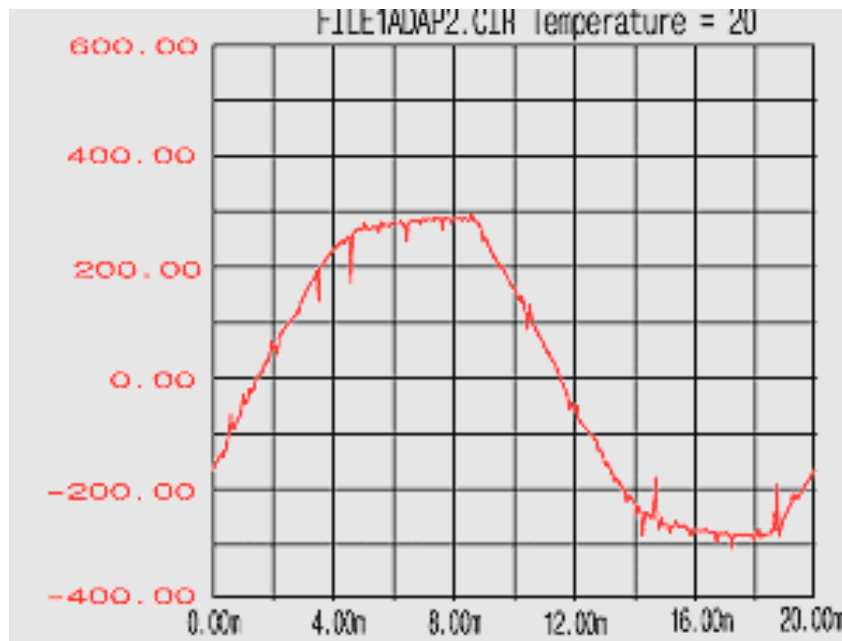


Рисунок 1.6. – напруга, що живить

Якщо припустити, що опір мережі щодо затискачів кожного окремого споживача дорівнює нулю, то спотворення синусоїдальності напруги не існувало б. Насправді мережу для будь-якого електроспоживача є певний опір. Несинусоїдальні струми, протікаючи з цього опору, викликають падіння напруги у ньому. В результаті на затискачах нелінійного електроспоживача, а також на затискачі всіх інших електроспоживачів, включених паралельно йому, з'являється несинусоїдальна напруга, зазвичай - "плоска" синусоїда. «Плоска» синусоїда, впливаючи на імпульсне джерело живлення, знижує рівень випрямленої напруги; збільшує тепловиділення в елементах імпульсного джерела живлення; знижує стійкість до короточасних провалів напруги.

Зниження рівня випрямленої напруги. Деформація синусоїди напруги живлення призводить до зниження значення амплітуди вхідної напруги, внаслідок цього знижується напруга на конденсаторі (рис. 1.7).

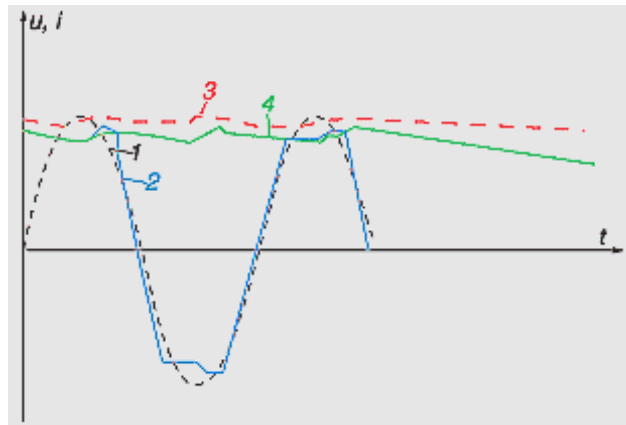


Рисунок 1.7. – Зниження напруги на згладжуючому конденсаторі імпульсного джерела живлення внаслідок дії «пласкої» синусоїди напруги: 1 – синусоїдальна напруга; 2 – «пласка» синусоїда напруги; 3 – напруга на конденсаторі при синусоїдальній напрузі; 4 – напруга на конденсаторі при «пласкій» синусоїді напруги.

Зниження рівня напруги на конденсаторі, з якого здійснюється живлення високочастотного перетворювача, а далі ланцюгів постійного струму, мало б призвести до зниження рівня випрямленої напруги. Але в більшості імпульсних джерел живлення передбачена система стабілізації вихідної напруги, наприклад, методом широтно-імпульсного регулювання. Зниження рівня вхідної напруги в допустимих межах не спричинить зниження рівня вихідної постійної напруги.

Збільшення тепловиділення в елементах імпульсного джерела живлення. При методі широтно-імпульсного регулювання зниження вхідної напруги викликає збільшення тривалості імпульсів струму високочастотного перетворювача по відношенню до тривалості пауз. Це означає збільшення струму, споживаного високочастотним перетворювачем, у середньому за період та збільшення швидкості розряду конденсатора. Більший струм, який споживається високочастотним перетворювачем, збільшує теплові втрати в елементах імпульсного джерела

живлення. Так, зниження вхідної напруги на 10% викликає збільшення струму на 11%, а теплових втрат — на 23%.

Зниження стійкості до короткочасних провалів напруги. У разі провалу або навіть повного зникнення напруги на затискачах імпульсного джерела живлення ланцюги постійного струму можуть продовжувати свою нормальну роботу протягом деякого, дуже короткого проміжку часу. Енергія, необхідна для роботи протягом цього проміжку часу, - це енергія конденсатора, що згладжує. Незважаючи на те, що цей конденсатор має дуже велику ємність, енергія, що запасасться ним, залежить ще й від напруги, до якої він був спочатку заряджений:

$$W = C \cdot U^2 / 2 \quad (1.4)$$

При синусоїдальній формі кривої напруги живлення конденсатор може зарядитися до напруги більшого, ніж він може зарядитися при «пласкій» формі напруги живлення. У такому разі запасеної в конденсаторі енергії може не вистачити для підтримки нормальної роботи ланцюгів постійного струму до моменту відновлення напруги живлення при його короткочасному провалі або зникненні.

3. Гармоніки, що генеруються нелінійним навантаженням, створюють додаткові втрати у трансформаторах. Ці втрати можуть призвести до значних втрат енергії та бути причиною виходу з ладу трансформаторів унаслідок перегріву.

Протікання по обмотках трансформатора несинусоїдальних струмів, внаслідок поверхневого ефекту та ефекту близькості, призводить до збільшення активного опору обмоток трансформатора і, як наслідок, додаткового нагрівання. Термін служби трансформатора залежить від нагрівання його частин і не дозволяє при несинусоїдальному струмі використовувати трансформатор на всю його номінальну потужність, її доводиться занижувати. Наприклад, повне завантаження трансформатора

може настати при використанні лише 80% номінальної потужності, зазначеної у паспортних даних.

Якщо не враховувати перевищення температури і спробувати використовувати трансформатор відповідно до його номінальних даних, термін його служби цілком може скоротитися з 40 років до 40 днів.

Крім того, високочастотні гармоніки струму - це причина появи вихрових струмів в обмотках трансформатора, що викликає додаткові втрати потужності та перегрів трансформатора. Для лінійних навантажень втрати на вихрові струми становлять у загальних втрат приблизно 5%, з нелінійним навантаженням вони іноді зростають у 15—20 разів.

4. В умовах несинусоїдальності струму погіршуються умови роботи батарей конденсаторів. Батареї конденсаторів призначені для компенсації реактивної потужності навантаження, тобто підвищення коефіцієнта потужності електроустановки будівлі.

Однак в умовах несинусоїдальності струму батареї конденсаторів одночасно є елементами, що абсорбують гармоніки з усієї мережі, так як опір конденсатора обернено пропорційно частоті f :

$$X_c = \frac{I}{\omega \cdot C} = \frac{I}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{I}{2\pi \cdot k \cdot f_0 \cdot C} \quad (1.5)$$

де f_0 - основна частота, Гц;

k -порядок гармоніки;

C -ємність конденсаторів.

Батареї конденсаторів змінюють нормальний шлях гармонік струму від нелінійного споживача до джерела живлення, замикаючи частину струму через себе. Так як опори елементів мережі мають індуктивний характер, то при застосуванні установок компенсації реактивної потужності та наявності нелінійних електроспоживачів з'являється ймовірність прояву резонансних явищ (як струму, так і напруги) на окремих елементах системи електропостачання.

5. Скорочення терміну служби електроустаткування через інтенсифікацію теплового та електричного старіння ізоляції. При робочих t_0 в ізоляційних матеріалах протікають хімічні реакції, що призводять до поступового зміни їх ізоляційних та механічних властивостей. Зі зростанням t_0 ці процеси прискорюються, скорочуючи термін служби устаткування. У конденсаторах втрати енергії пропорційні частоті $DP = U \cdot 2 \cdot w \cdot C \cdot tgd$, тому несинусоїдальний струм призводить до додаткового нагрівання. В електричних машинах струми нульової послідовності створюють додаткове підмагнічування сталі, що призводить до погіршення їх характеристик та додаткового нагрівання сердечників (статори асинхронних двигунів, магнітопроводи трансформаторів).

Струми в нульових робочих провідниках можуть бути більшими, ніж струми у фазних провідниках. Це пояснюється тим, що при симетричному навантаженні фазні струми основної частоти і всі вищі гармоніки, за винятком вищих гармонік порядку, кратного трьом, утворюють системи прямої та зворотної послідовностей і дають у сумі нуль. Гармоніки порядку, кратного трьом, утворюють систему нульової послідовності, тобто. мають у будь-який момент часу однакові значення та фази. Тому струм у нейтральному дроті дорівнює потрійній сумі струмів вищих гармонік, кратних трьом. Таким чином, при несинусоїдальному симетричному навантаженні струм у нульовому робочому провіднику дорівнюватиме:

$$I_0 = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots}. \quad (1.6)$$

де I_3, I_9, I_{15} - діючі значення відповідних гармонік струму.

При лінійному, навіть найпотужнішому навантаженні струм у нульовому робочому провіднику буде менше, ніж максимальний струм у фазних провідниках. Зовсім інша ситуація за наявності нелінійних

навантажень, у разі струм у нульовому робочому провіднику може перевищувати струм у фазі більш як 1,5 разу.

Більш ніж промовисто говорять про це осцилограми струмів на фідерах живлення комп'ютерних електроспоживачів, представлені на рис. 1.8 - 1.11.

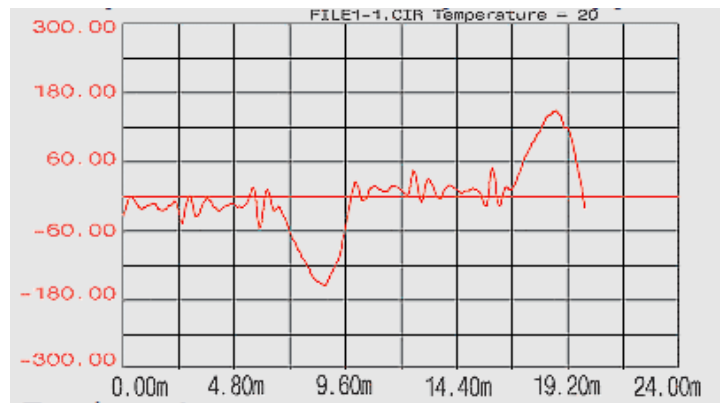


Рисунок 1.8. – Фідер живлення комп'ютерного навантаження
Струм фази А.

Діюче значення струму – 59,7 А.

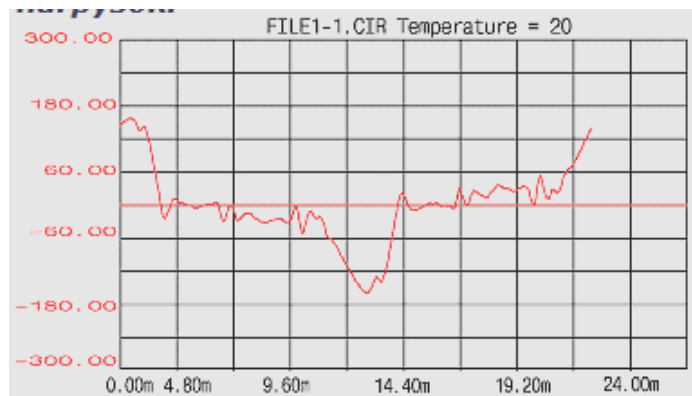


Рисунок 1.9. – Фідер живлення комп'ютерного навантаження
Струм фази В.

Діюче значення струму – 65 А.

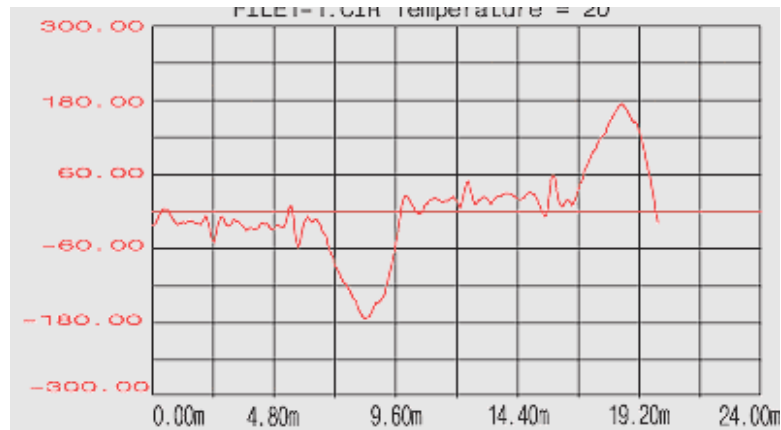


Рисунок 1.10 - Фідер живлення комп'ютерного навантаження
Струм фази С.
Діюче значення струму – 69,5 А.

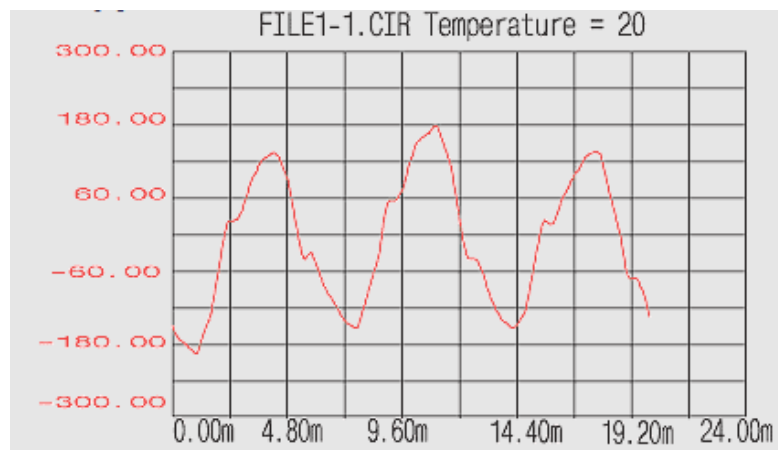


Рисунок 1.11. - Фідер живлення комп'ютерного навантаження
Струм в N-провіднику.
Діюче значення струму — 105,7 А.

З вищенаведених осцилограм видно, що значення струму, що діє, в нульовому робочому провіднику $I_n = 105,7$ А, а найбільше діюче значення струму у фазі $I_c = 69,5$ А.

5. Скорочення терміну служби електроустаткування через інтенсифікацію теплового та електричного старіння ізоляції. При робочих t_0 в ізоляційних матеріалах протікають хімічні реакції, що призводять до поступової зміни їх ізоляційних та механічних властивостей. Зі зростанням t_0 ці процеси прискорюються, скорочуючи термін служби устаткування. У

конденсаторах втрати енергії пропорційні частоті $DP = U^2 \omega C t_{gd}$, тому несинусоїдальний струм призводить до додаткового нагрівання. В електричних машинах струми нульової послідовності створюють додаткове підмагнічування сталі, що призводить до погіршення їх характеристик та додаткового нагрівання сердечників (статори асинхронних двигунів, магнітопроводи трансформаторів). Сутність електричного старіння – у виникненні про часткових розрядів, які поширюються лише частину ізоляційного проміжку, наприклад, часткові розряди в газових включеннях. Часткові розряди пов'язані з розсіюванням енергії, наслідком якого є електричний, механічний і хімічний вплив на навколишній діелектрик. Внаслідок цього розвиваються місцеві дефекти в ізоляції, що призводить до скорочення терміну служби.

6. Необґрунтоване спрацювання запобіжників та автоматичних вимикачів внаслідок додаткового нагріву внутрішніх елементів захисних пристроїв. Цей процес обумовлений перебігом несинусоїдальних струмів і, отже, дією поверхневого ефекту та ефекту близькості. У нашій практиці зустрічалися випадки необґрунтованих спрацьовувань обраних відповідно до вимог ПУЕ автоматичних вимикачів, що захищають лінії живлення комп'ютерного обладнання (при навантаженні, що становить 80-85% уставки теплового розчеплювача автоматичного вимикача).

7. Прискорене старіння ізоляції проводів та кабелів. Старіння ізоляції провідників і кабелів обумовлено перебігом несинусоїдального струму, що призводить до підвищеного нагрівання зовнішньої поверхні жил кабелю внаслідок поверхневого ефекту та ефекту близькості.

8. Перешкоди в мережах телекомунікацій можуть бути там, де силові кабелі і кабелі телекомунікацій розташовані відносно близько. Внаслідок протікання в силових кабелях високочастотних гармонік струму, кабелях телекомунікацій можуть наводитися перешкоди. Магнітні поля вищих гармонік прямої та зворотної послідовності частково компенсують один одного, тому найбільший вплив на телекомунікації мають гармоніки, кратні

трьом. Що порядок гармонік, то більше вписувалося рівень перешкод, наведених ними в телекомунікаційних кабелях.

Вимірювання несинусоїдальних струмів

Зазвичай для вимірювання струмів використовують струмовимірювальні кліщі. Якщо охопити нульовий робочий провідник «звичайними» струмовимірювальними кліщами, вони можуть показати невірний результат, оскільки працюють у частотному діапазоні 50 Гц і зареєструвати вищі гармоніки струму не можуть. Отже, вони показують лише чинне значення основної гармоніки струму. Фактичне значення струму при цьому може виявитися на 25-50% більше і перевищить тривало допустимий струм, обраний за умовами термічної стійкості проводів і кабельних ліній. Тому необхідно застосовувати вимірювальні інструменти та прилади з широким частотним діапазоном, що реєструють справжнє значення вимірюваного струму (прилади з функцією True RMS).

Заходи безпеки

Враховуючи, що більшість офісів розташовується в будинках, не розрахованих на значне зростання нелінійних навантажень, потрібний особливий підхід до експлуатації систем електропостачання цих будівель. Дії щодо запобігання негативному впливу вищих гармонік:

1. Виділити повну номенклатуру всіх електроспоживачів загального призначення, які належать до категорії нелінійних і викликають генерацію підвищеної частки вищих гармонік у мережах електропостачання.

2. Провести діагностику стану мережі електроживлення задля попередження пожежонебезпечних і аварійних ситуацій на об'єктах із часткою встановленої потужності нелінійних електроспоживачів 10% і від. Дати прогноз роботи мережі електроживлення з точки зору оцінки частки вищих гармонік, якості електроенергії, струмових навантажень фазних та нульових робочих провідників з урахуванням несинусоїдальності струмів та напруг.

3. Враховувати вплив нелінійності навантажень електроспоживачів та наявності вищих гармонійних складових під час виконання проектів реконструкції існуючих систем електропостачання та розробки нових проектів. У тому числі при виконанні розрахунку умов тепловиділення, рівнів падіння напруги в кабельних лініях та оцінці впливу нелінійних навантажень на якість напруги живлення у кінцевих електроспоживачів.

4. Прогнозувати можливі наслідки зростання комп'ютерних навантажень під час розширення комп'ютерних мереж.

5. Проводити роботи з діагностики та аналізу систем електропостачання, використовуючи нормативні документи стандарт США IEEE Standard 399-1997.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

У розділі «Вимірювання та моніторинг якості електроенергії» було розглянуто сучасні дослідження та практики, пов'язані з проблемами вищих гармонік (ВГ) в системах електропостачання (СЕР). На основі аналізу літературних джерел та проведених досліджень зроблено такі висновки:

Аналіз літературних джерел виявив, що проблема вищих гармонік є актуальною для сучасних електроенергетичних систем. ВГ спричиняють значні спотворення у формі сигналу напруги і струму, що негативно впливає на роботу електрообладнання та загальну якість електропостачання. Значна увага приділяється дослідженню джерел ВГ та методам їх зниження.

Вищі гармоніки мають суттєвий вплив на ефективність роботи електричних мереж, зокрема, на підвищення втрат в електричних мережах, зниження коефіцієнта потужності, прискорення зносу обладнання, а також на зниження надійності роботи систем. Вони можуть спричиняти перегрів трансформаторів і кабельних ліній, а також збої в роботі електронного обладнання.

Для розподільчих мереж 0,4 кВ було запропоновано кілька методів зниження впливу ВГ, включаючи використання фільтрів гармонік, активних компенсаторів та оптимізацію роботи джерел навантаження. Ефективне застосування цих методів сприяє підвищенню якості електропостачання та зменшенню негативного впливу ВГ на обладнання та мережі.

Загалом, забезпечення високої якості електроенергії вимагає комплексного підходу, що включає аналіз причин виникнення ВГ, дослідження їх впливу на електроенергетичні системи та впровадження ефективних методів зниження гармонічних спотворень.

РОЗДІЛ 2. ГАРМОНІЙНІ СПОТВОРЕННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДО 1 кВ

2.1. Вплив вищих гармонік на електрообладнання

Вищі гармонійні складові в струмах нелінійних електроспоживачів можуть призвести до негативних, а інколи й катастрофічних наслідків.

✓ Перегрів і руйнування нульових робочих провідників може відбуватися внаслідок їхнього перевантаження струмами третьої гармоніки. Коли струми в нульових робочих провідниках значно перевищують струми фазних провідників, а захист від струмових перевантажень в цих ланцюгах не передбачений (п.1.3.10 ПУЕ). Додатково, підвищення робочої температури струмопровідних провідників спричиняє прискорене старіння ізоляції. Нульовий робочий провідник не захищений від перегріву автоматичними вимикачами або запобіжниками (п.3.1.17 ПУЕ).

✓ «Старі» системи електропостачання проектувалися лише для лінійного навантаження, тобто споживаний електроприймачами струм містив лише основну гармоніку (50 Гц). Відповідно, струм у нульовому робочому провіднику не міг перевершувати струм у найбільш навантаженій фазі, що дозволяло захисту на фазних провідниках одночасно захищати і нульовий робочий провідник від перегріву.

✓ Нерівномірність розподілу струмів по фазах - в процесі експлуатації нерівномірність розподілу струмів по фазах має бути не більше 10% (п.6.6. табл.6 Застосування 1, ПЕЕП). У сучасних системах електроживлення, де нелінійні навантаження стають більш поширеними, такі умови часто не дотримуються, що призводить до додаткових проблем.

✓ Відсутність відповідних захисних механізмів може призвести до підвищеної небезпеки експлуатації та зниження надійності системи.

✓ Негативний вплив гармонійних складових може призвести до значних економічних втрат через ремонт та заміну обладнання, а також через непродуктивні простої системи.

Таким чином, розуміння та мінімізація негативного впливу вищих гармонік є важливими для забезпечення стабільної та безпечної роботи електроенергетичних систем.

Для визначення тривало допустимих струмів за умовами нагріву дротів і кабелів, нульовий робочий провідник чотирьохпровідної системи трифазного струму, а також заземлюючі та нульові захисні провідники не враховуються (п.3.1.10 ПУЕ). Це обумовлено тим, що при наявності лінійних електроспоживачів струм у цих провідниках істотно менший, ніж у фазних провідниках.

У випадку з нелінійними електроспоживачами струми в нульових робочих провідниках можуть перевищувати фазні струми (максимально в 1,73 рази, коли ширина імпульсу струму дорівнює 60 електричним градусам). Тому значення тривало допустимих струмів для нелінійних електроспоживачів мають бути знижені.

На корпусах електрообладнання, підключеного до нульового провідника, може виникати напруга, яка при дотику створює неприємні відчуття для людини. У випадках використання протяжних ліній малого перетину може виникати небезпечна (понад 50 В) напруга дотику на корпусах електроприймачів у системі TN-C, коли функції нульового захисного і нульового робочого провідників об'єднані.

Отже, важливо враховувати вплив нелінійних електроспоживачів на струми в нульових робочих провідниках і відповідно коригувати значення тривало допустимих струмів, щоб забезпечити безпечну експлуатацію електрообладнання.

В системі TN-S подібний ефект може теоретично виникнути при протіканні по нульовому захисному провіднику значного струму (наприклад, при короткому замиканні).

Спотворення синусоїдальної форми живлячої напруги: Через характер струму, споживаного імпульсним навантаженням, відбувається деформація синусоїди напруги на затисках. Синусоїда напруги стає «плоскою», оскільки під час імпульсу струму зростає падіння напруги на внутрішньому опорі мережі.

$$U_{\text{навантаження}}(t) = U_{\text{мережі}}(t) - i(t) \cdot Z_{\text{мережі}} \quad (2.1.)$$

де $U_{\text{навантаження}}(t)$ - деформована синусоїда напруги на зажимах навантаження;

$U_{\text{мережі}}(t)$ - синусоїдальна напруга живлячої мережі;

$i(t)$ - імпульсний струм навантаження;

$Z_{\text{мережі}}$ - повний опір мережі зі сторони зажимів навантаження.

Якби опір мережі відносно затисків кожного окремого електроспоживача дорівнював нулю, спотворення синусоїдальності напруги не виникало б. Однак у реальності кожна мережа має певний опір. Несинусоїдальні струми, протікаючи через цей опір, викликають падіння напруги на ньому. У результаті на затисках нелінійного електроспоживача, а також на затисках усіх інших електроспоживачів, підключених паралельно до нього, з'являється несинусоїдальна напруга, зазвичай - «плоска» синусоїда [10, 22].

«Плоска» синусоїда впливає на імпульсне джерело живлення таким чином:

- ✓ Знижує рівень випрямленої напруги.
- ✓ Збільшує тепловиділення в елементах імпульсного джерела живлення.
- ✓ Знижує стійкість до короточасних провалів напруги.
- ✓ Зниження рівня випрямленої напруги:

Деформація синусоїди живлячої напруги призводить до зниження амплітуди вхідної напруги. Це, у свою чергу, знижує напругу на конденсаторі.

Таким чином, вплив «пласкої» синусоїди на імпульсні джерела живлення може призвести до зменшення їх ефективності та надійності.

Зниження рівня напруги на конденсаторі, який живить високочастотний перетворювач та ланцюги постійного струму, теоретично мало б призвести до зниження рівня випрямленої напруги [22]. Проте, у більшості імпульсних джерел живлення передбачена система стабілізації вихідної напруги, наприклад, за допомогою широтно-імпульсного регулювання. Зниження рівня вхідної напруги в межах допустимих значень не спричинить зниження рівня вихідної постійної напруги.

При застосуванні методу широтно-імпульсного регулювання зниження вхідної напруги призводить до збільшення тривалості імпульсів струму високочастотного перетворювача порівняно з тривалістю пауз. Це означає, що в середньому за період збільшується струм, який споживається високочастотним перетворювачем, а також підвищується швидкість розряду конденсатора. Більший струм, споживаний високочастотним перетворювачем, призводить до збільшення теплових втрат в елементах імпульсного джерела живлення.

Наприклад, зниження вхідної напруги на 10% викликає збільшення струму на 11%, що в свою чергу призводить до зростання теплових втрат на 23% [24, 29].

При провалі або навіть повному зникненні напруги на затисках імпульсного джерела живлення, ланцюги постійного струму можуть продовжувати працювати нормально протягом дуже короткого проміжку часу. Енергія, необхідна для роботи протягом цього часу, забезпечується згладжуючим конденсатором. Незважаючи на велику ємність цього

конденсатора, кількість запасеної енергії також залежить від початкової напруги, до якої він був заряджений:
$$W = \frac{C \cdot U^2}{2} .$$

При синусоїдальній формі живлячої напруги конденсатор може заряджатися до більш високого рівня, ніж при «плоскій» формі напруги. У такому випадку енергії, запасеної в конденсаторі, може не вистачити для підтримки нормальної роботи ланцюгів постійного струму до моменту відновлення живлячої напруги під час її короткочасного провалу або зникнення.

3. Гармоніки, що генеруються нелінійним навантаженням, створюють додаткові втрати в трансформаторах. Ці втрати можуть призвести до значних енергетичних втрат і навіть виходу з ладу трансформаторів через перегрів. Протікання несинусоїдальних струмів через обмотки трансформатора внаслідок поверхневого ефекту і ефекту близькості збільшує активний опір обмоток трансформатора, що, в свою чергу, призводить до додаткового нагріву [22].

Термін служби трансформатора залежить від нагріву його частин, і при несинусоїдальному струмі трансформатор не можна використовувати на повну номінальну потужність, що змушує знижувати її. Наприклад, повне завантаження трансформатора може бути досягнуте при використанні лише 80% номінальної потужності, зазначеної в паспортних даних. Якщо не враховувати перевищення температури та спробувати використовувати трансформатор відповідно до його номінальних даних, його термін служби може суттєво скоротитися.

Крім того, високочастотні гармоніки струму викликають появу вихрових струмів в обмотках трансформатора, що призводить до додаткових втрат потужності і перегріву. Для лінійних навантажень втрати на вихрові струми складають приблизно 5% від загальних втрат, тоді як для нелінійних навантажень вони можуть зростати в 15-20 разів [17, 18].

1. Погіршення умов роботи батарей конденсаторів в умовах несинусоїдальності струму.

Батареї конденсаторів призначені для компенсації реактивної потужності навантаження, що підвищує коефіцієнт потужності електроустановки будівлі. Проте в умовах несинусоїдальності струму батареї конденсаторів також функціонують як елементи, що абсорбують гармоніки зі всієї мережі, оскільки їх опір обернено пропорційний до частоти f .

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot k \cdot f_0 \cdot C} \quad (2.2.)$$

де f_0 — основна частота, Гц;

k — порядок гармоніки;

C — ємність конденсаторів.

Батареї конденсаторів змінюють нормальний шлях гармонік струму від нелінійного споживача до джерела живлення, пропускаючи частину цього струму через себе. Оскільки елементи мережі мають індуктивний опір, при використанні установок компенсації реактивної потужності та наявності нелінійних електроспоживачів, виникає ймовірність прояву резонансних явищ (як по струму, так і по напрузі) на окремих елементах системи електропостачання [22].

5. Скорочення терміну служби електроустаткування через інтенсифікацію теплового та електричного старіння ізоляції

При робочих температурах в ізоляційних матеріалах протікають хімічні реакції, які поступово змінюють їхні ізоляційні та механічні властивості. З підвищенням температури ці процеси прискорюються, що скорочує термін служби обладнання. В конденсаторах втрати енергії пропорційні частоті, тому несинусоїдальний струм призводить до їхнього додаткового нагріву.

В електричних машинах струми нульової послідовності створюють додаткове підмагнічування сталі, що погіршує їхні характеристики і викликає додатковий нагрів сердечників (статори асинхронних двигунів, магнітопроводи трансформаторів). Суть електричного старіння полягає у виникненні так званих часткових розрядів, які охоплюють лише частину ізоляційного проміжку, наприклад, часткових розрядів у газових включеннях. Часткові розряди супроводжуються розсіюванням енергії, що призводить до електричної, механічної і хімічної дії на навколишній діелектрик. В результаті цього виникають місцеві дефекти в ізоляції, що скорочує термін служби обладнання [19, 21, 22].

6. Необґрунтоване спрацьовування запобіжників і автоматичних вимикачів: Це явище виникає через додатковий нагрів внутрішніх елементів захисних пристроїв, викликаний протіканням несинусоїдальних струмів. Унаслідок дії поверхневого ефекту та ефекту близькості, ці струми призводять до необґрунтованих спрацьовувань автоматичних вимикачів, що захищають лінії живлення комп'ютерного обладнання, навіть при навантаженні 80—85% від уставки теплового розчеплювача автоматичного вимикача [22].

7. Прискорене старіння ізоляції дротів і кабелів: Старіння ізоляції провідників і кабелів обумовлене протіканням несинусоїдального струму, який викликає підвищений нагрів зовнішньої поверхні жил кабелю через поверхневий ефект та ефект близькості [22].

8. Перешкоди в мережах телекомунікацій

Перешкоди в мережах телекомунікацій можуть виникати там, де силові кабелі і кабелі телекомунікацій розташовані близько один до одного. Протікання високочастотних гармонік струму в силових кабелях може призводити до наведення перешкод у кабелях телекомунікацій.

Магнітні поля вищих гармонік прямої і зворотної послідовності частково компенсують одне одного, тому найбільший вплив на телекомунікаційні мережі мають гармоніки, кратні трьом. Чим вище

порядок гармоніки, тим більше рівень перешкод, що наводяться ними в телекомунікаційних кабелях.

Таким чином, вплив високочастотних гармонік на телекомунікаційні мережі може бути суттєвим, особливо у випадках, коли силові та телекомунікаційні кабелі прокладені поблизу один одного [5, 7, 8,22].

2.2. Дослідження гармонік в первинних струмах

У цьому пункті розглядаються питання визначення спектру відносних амплітуд гармонік фазного струму в системах живлення потужних електротехнологічних установок. Ці установки побудовані на схемі «трифазна мережа – випрямлювач – модулятор – навантаження». Аналіз досліджень виявив спектр і залежності коефіцієнта спотворення мережевого струму, що дозволяють визначити і оцінити вплив параметрів мережі та перетворювача.

Незважаючи на появу сучасних потужних IGBT та MOSFET-транзисторів, для створення джерел живлення потужних електротехнологічних установок досі використовуються одноопераційні тиристори різного класу, оскільки вони забезпечують вищу надійність. Для установок контактного зварювання широко застосовуються тиристорно-конденсаторні перетворювачі (ТКП) з дозованою передачею енергії.

Ускладнення схем тиристорно-конденсаторних перетворювачів (ТКП) і методів їх управління, а також вимоги підвищити коефіцієнт потужності при глибокому регулюванні напруги та потужності у вузлі навантаження, ускладнюють аналіз електромагнітних процесів. Це обумовлено складними формами струмів, що протікають через вентилі та обмотки мережевого трансформатора.

Аналіз форми струму первинної обмотки мережевого трансформатора в складі складних силових схем ТКП виявляє деякі труднощі. Це пов'язано з тим, що результуюча крива первинного струму складається з великої

кількості окремих ділянок, на кожній з яких струм має своє аналітичне вираження [12].

На рисунку 2.7 показані типові та найбільш поширені схеми ТКП з дозованою передачею енергії. Для зменшення комутаційних перенапруг використовується демпфуючий конденсатор C_d .

Варто зазначити, що для цих перетворювачів характерні два режими:

1. Режим, при якому струм I_{B_V} на виході випрямлювального мосту є переривчастим (те ж саме стосується струмів I_{B1} та I_{B2} на схемах (в) і (г), де використовуються додаткові катодні вентильні групи).
2. Режим, при якому струм на входах модулятора і випрямлювача є безперервним.

Ці режими роботи визначають особливості аналізу електромагнітних процесів у ТКП.

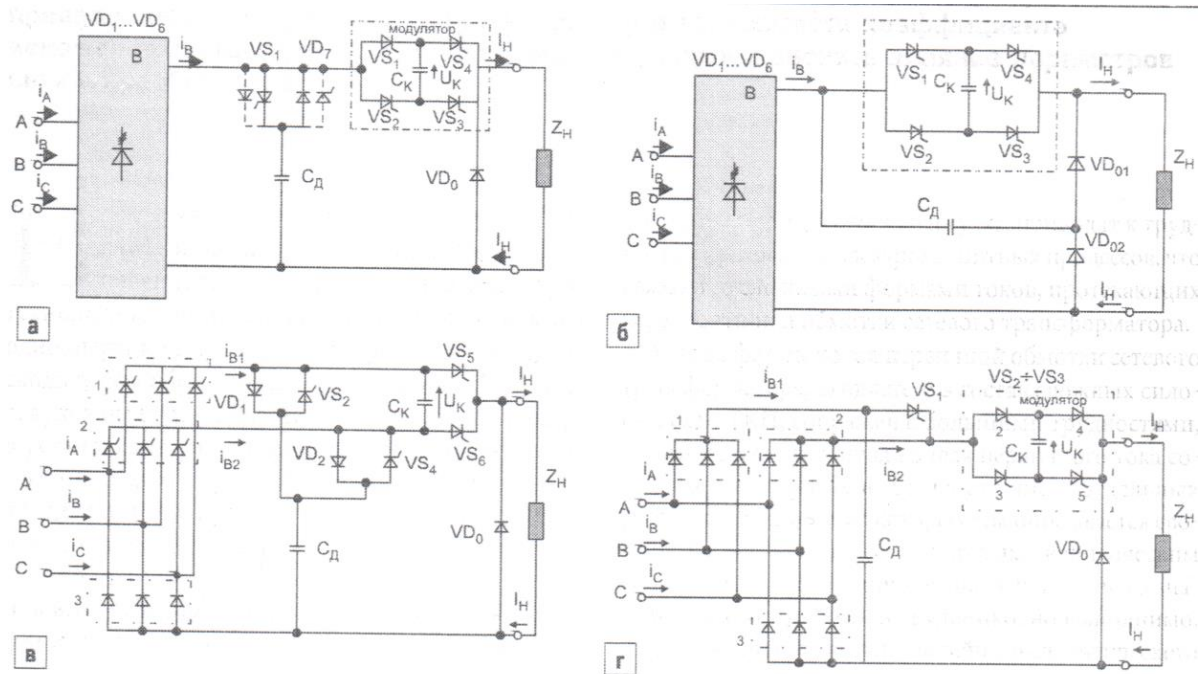


Рисунок 2.7.- Основні схеми перетворювачів з дозованої передачею енергії при демпфуючому конденсаторі на вході: а) ТКП з підключенням демпфуючого конденсатора на виході випрямлювача за допомогою діодно-тиристорного ланцюга; б) ТКП з підключенням конденсатора за

допомогою двох зворотних діодів; в) ТКП з неявно вираженим ланцюгом постійного струму; г) ТКП з додатковою катодною групою.

На рис. 2.8. показані характерні форми струму i_B на виході випрямлювача.

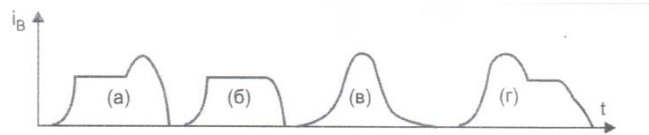


Рисунок 2.8.- Характерні форми струму i_B на виході випрямлювача.

Існує багато методів для визначення гармонійних складових несинусоїдальних періодичних функцій. У деяких випадках досліджуються гармонійні складові мережевого струму для різних видів навантаження, таких як вентиляльні перетворювачі, установки дугового та контактного зварювання, газорозрядні лампи тощо [22].

При цьому із мережі споживається струм, форма кривої якого є несинусоїдальною, а в багатьох випадках і неперіодичною. Це призводить до нелінійних спотворень напруги мережі, тобто виникають несинусоїдальні режими. Досліджуються системи, які мають таку структуру: «мережа – трансформатор – випрямлювач – навантаження».

При використанні проміжного високочастотного ланцюга (модулятора) між випрямлювачем і навантаженням, оцінка несинусоїдальності мережевого струму стає складнішою. У цьому випадку метод комутаційних функцій виявляється більш ефективним з точки зору простоти і точності розрахунків. Суть цього методу полягає в тому, що значення струму в різних фазах отримуються шляхом множення безперервної послідовності імпульсів вихідного струму випрямлювача на відповідні одиничні комутаційні функції (комутаційна функція i -ої фази) [28, 29].

На рисунку 2.9 показані фазні струми трифазної мережі для перетворювача за схемою на рис. 2.9.б. Для інших схем форми фазного струму схожі, різниця лише в зміні форми окремих імпульсів струму.

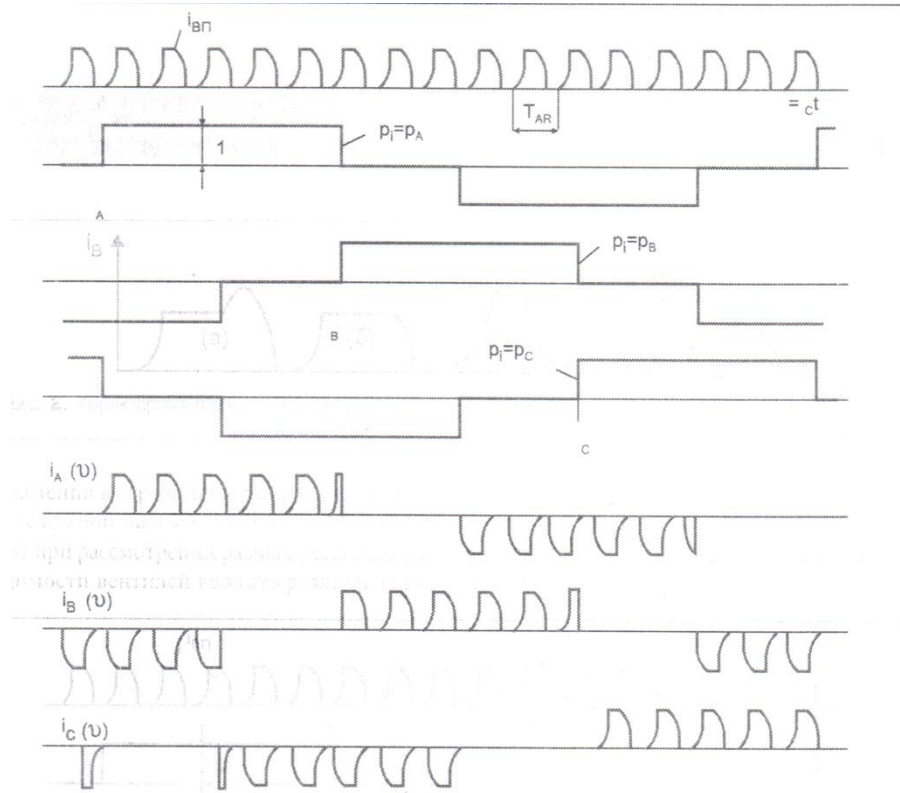


Рисунок 2.9.- Фазні струми трифазної мережі з мостовим випрямлювачем і модулятором (дозатором) на виході (при нехтуванні кутами між фазної комутації).

На рис. 2.9 показані аналогічні діаграми, які отримані в системі OrCAD 9.2. На рис. 2.9 T_R – період роботи дозуючого ключа (ланцюга підвищеної частоти) в радіанах, який визначається за формулою:

$$T_R = 2\pi / l \quad (2.3.)$$

$$l = \omega_R / \omega_C, \quad (2.4.)$$

де ω_R - кутова частота роботи дозуючого ключа;

ω_C - кутова частота мережі.

При аналізі прийнято, що відношення частот дозуючого ключа і мережі $\omega_R / \omega_C \geq 15$.

Оскільки $T_R \ll T_C$, то доцільно перейти від фазових здви́гів $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \dots$ до фазових здви́гів $\varphi_{1A}, \varphi_{1B}, \varphi_{1C} \dots \varphi_{1M}$.

$$\varphi_{1A} = \varphi_A - T_R \cdot \text{INT}\left(\frac{\varphi_A}{T_R}\right) \quad (2.5.)$$

$$\varphi_{1B} = \varphi_B - T_R \cdot \text{INT}\left(\frac{\varphi_B}{T_R}\right) \quad (2.6.)$$

$$\varphi_{1C} = \varphi_C - T_R \cdot \text{INT}\left(\frac{\varphi_C}{T_R}\right) \quad (2.7)$$

$$\varphi_{1M} = \varphi_M - T_R \cdot \text{INT}\left(\frac{\varphi_M}{T_R}\right) \quad (2.8)$$

де M — кількість фаз мережі; $\text{INT}(\varphi A/TR)$ — це ціла частина відношення (для випадку трифазної мережі $M = 3$).

Очевидно, що фазові зрушення не є однаковими, і це потрібно враховувати при розрахунку коефіцієнта спотворення фазних струмів. Однак, як показують аналізи, при симетричній послідовності фаз мережевої напруги і при частоті роботи модулятора, кратній числу фаз мережі (тобто при рівності середнього струму в окремих фазах), коефіцієнти спотворень у всіх фазах приблизно однакові.

При частоті роботи перетворювача, яка не кратна числу фаз мережі, і при співвідношенні $f (5 - 7) \cdot m_{fc}$ (де m — число фаз мережі; f і f_c — частота роботи перетворювача і живлячої мережі відповідно), враховувати відмінності в початкових зрушеннях не має сенсу, оскільки вони практично не впливають на результат обчислень.

Гармонійний склад мережевого струму у другому режимі, при прийнятих припущеннях, можна визначити за методикою, описаною в роботі [7]. Ясно, що вихідний струм випрямлювача можна виразити у вигляді:

$$i(\vartheta) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \sin\left(\frac{k}{\vartheta} + \varphi_k\right) \quad (2.9.)$$

За допомогою наступного виразу можна визначити спектр для комутаційної функції i -ої фази ($i = 1, 2, 3 \dots m$):

$$\rho_i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sum_{v=1,5,7,\dots}^{\infty} \frac{1}{v} \sin(v\vartheta) \quad (2.10)$$

Струм будь-якої фази мережі визначається:

$$i_i(\vartheta) = \rho_i \cdot i_i(\vartheta)$$

З врахуванням попередніх виразів отримуємо вираз струму i -ої фази у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} i_i(\vartheta) = I_0 2\sqrt{3} \sum_{v=1,5,7,\dots}^{\infty} \frac{1}{\pi v} \sin(v\vartheta) \\ + \sum_{k=i}^{\infty} \sum_{v=1,5,7,\dots}^{\infty} \frac{I_{mk}}{v} \{ \sin[(kl+v)\vartheta + \varphi_k] + \sin[(kl-v)\vartheta - \varphi_k] \} \end{aligned} \quad (2.11)$$

де S_c – спектр струму фаз мережі; $I_{mk} = I_{mk} e^{-j\varphi_k}$

$I_{mk} = I_{mk} e^{j\varphi_k}$, S_p – лінійний спектр комутаційної функції, яка визначається за виразом:

$$S_p = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sum_{v=1,5,7,\dots}^{\infty} \frac{1}{v} \quad (2.12)$$

З (2.3.) витікає, що в спектрі фазного струму, поряд з гармоніками v -го порядку, присутні ряди модульованих гармонік порядку $(kl+v)$ і $(kl-v)$. У кожній з цих лав амплітуди гармонік при $(k+1)$ або $(k-1)$ зменшуються від максимуму пропорційно v , а огинаючи ряди є гіперболою.

Незалежно від форми струму на виході випрямляча, фази струму мають схожі характеристики. У загальному випадку в спектрі вхідного струму паю гармоніка є сумою нескінченно великого числа членів із рядів з порядками v і $(kl \pm v)$, що мають гармоніки з номерами, рівними n .

На величину амплітуд гармонік спектру безпосередньо впливає форма і шпаруватість імпульсів струму $i_1(\vartheta)$ на виході випрямляча. Для точнішої оцінки коефіцієнта гармоніки (або коефіцієнта спотворення) мережевого струму скористаємося способом, наведені в роботах [7-9]. Аналіз спектру фазних струмів i_A , i_B , i_C проводиться при різних значеннях параметра $a = C_D/C_k$, робочої частоти f та напруги короткого замикання мережевого трансформатора $u_K = 2 \cdot \omega_C \cdot L_C / (E / I_{ном}) \cdot 100\%$, $E \approx U_{лин}$, тобто при різних значеннях індуктивностей L_S фаз мережі.

На рис. 2.10 приведені тимчасові діаграми, отримані за допомогою програми Harmonics, написаної в середовищі MATLAB. Як видно, отримані діаграми майже повністю збігаються з результатами, які отримані за допомогою компонента Pspice системи ORCAD 9.2 [9, 10, 12].

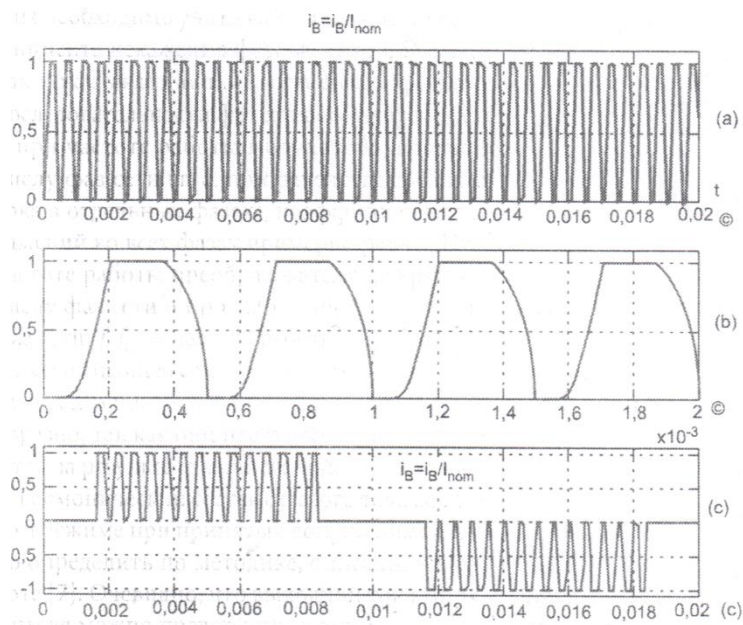


Рисунок 2.10.- Часові діаграми струму на виході випрямлювача і фази мережі, що живить, при номінальному струмі навантаженні, які отримані в програмі Harmonics.

Для якісної оцінки на рис. наводиться коефіцієнт спотворення мережевого струму залежно від напруги короткого замикання при різних значеннях параметра a , ($a = C_d/C_k$) і різних частотах роботи ТКП.

Як видно, найсильніше на мережу впливають гармоніки з номерами $(kl + 1)$, причому при збільшенні індуктивності L_S коефіцієнт спотворення струму збільшується (коефіцієнт гармоніки знижується), тобто збільшується відносна вага першої гармоніки мережевого струму.

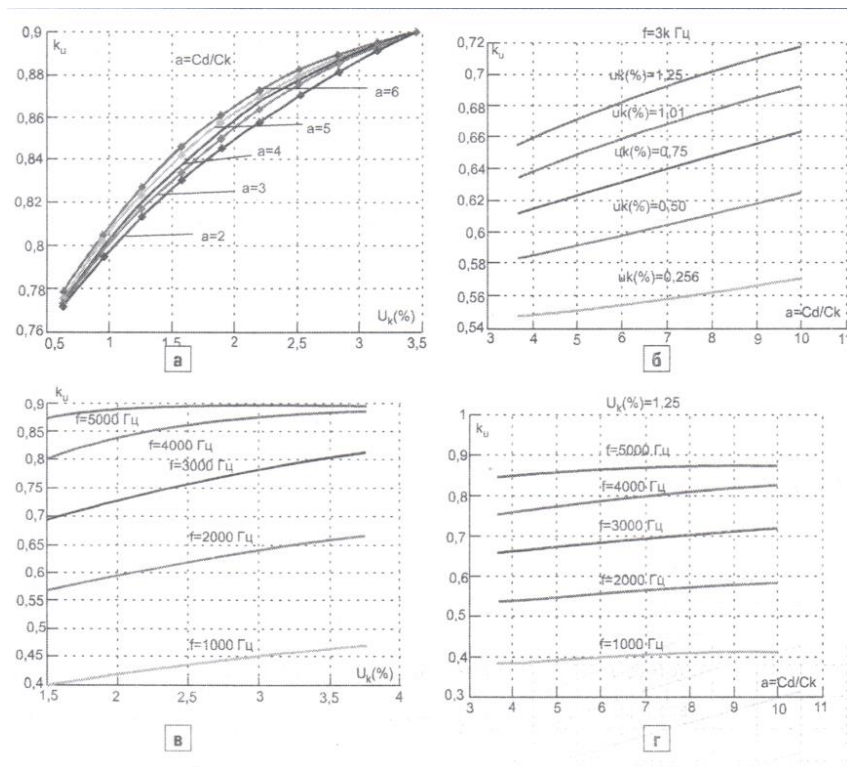


Рисунок 2.11. - Коефіцієнт спотворення мережевого струму K_U в залежності від а, в) від напруги короткого замикання U_k ; б) від параметра $a = C_d/C_k$; г) від частоти роботи перетворювача.

Збільшення коефіцієнта спотворення при підвищенні напруги (рис. 2.7) короткого замикання (U_k) пояснюється тим, що при збільшенні індуктивності L_S зростає тривалість фронтів окремих імпульсів на виході випрямлювача, а також зростає тривалість самих імпульсів.

При підвищенні частоти роботи перетворювача коефіцієнт спотворення також збільшується, що є природним, оскільки відносна вага

першої гармоніки мережевого струму зростає. Збільшення коефіцієнта спотворення також спостерігається при зростанні співвідношення ємностей демпфуючого та комутаційного конденсаторів. Однак співвідношення C_d/C_k вибирається з метою обмеження комутаційних перенапружень на елементах схеми ТКП [3-5].

На основі цього було розроблено силову схему та систему управління джерелом живлення для стикової зварювальної установки оплавленням потужністю до 100 кВт. Силова частина та основні блоки системи управління (СУ) макетного зразка вдосконаленого джерела живлення потужністю 100 кВт представлені на рисунку 2.12. (на основі цього модуля розроблено тримодульне джерело потужністю до 250 кВт).

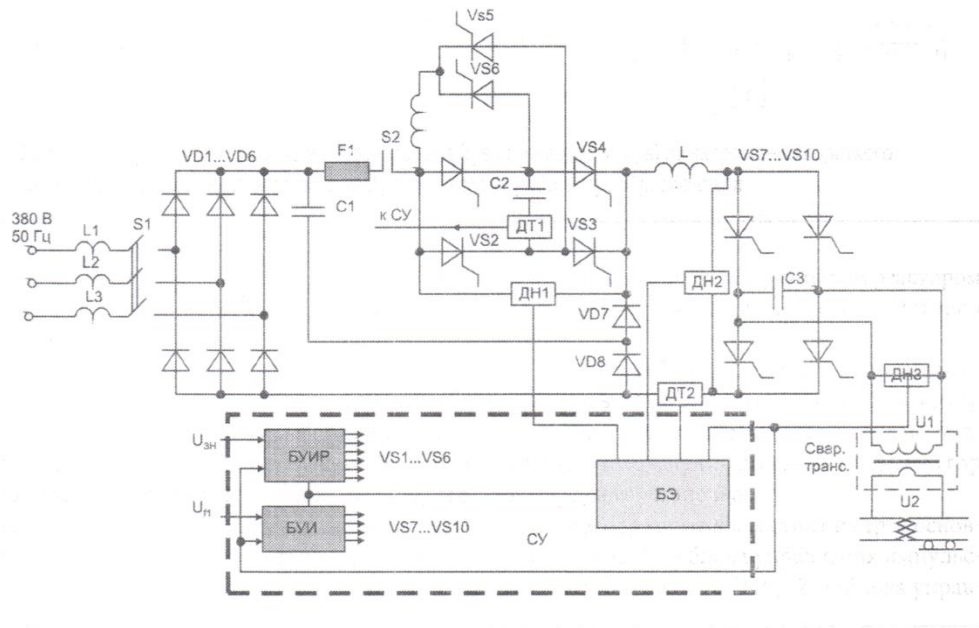


Рисунок 2.12.- Силова частина і основні блоки системи управління (СУ) макетного зразка удосконаленого джерела живлення потужністю 100 кВт.

Силовая частина джерела живлення включає некерований випрямляч на діодах $VD1-VD6$, демпфуючий конденсатор $C1$, підключений за допомогою діодів $VD7$ і $VD8$ за схемою на рис. 2.12, імпульсний регулятор (або дозуючий ключ), зібраний на тиристорах $VS1-VS4$ за мостовою схемою, з підключеним в діагональ дозуючим (комутуючим) конденсатором $C2$.

Для забезпечення режиму комбінованого регулювання дозуючий ключ доповнено індуктивним реактором LK , підключеним за допомогою тиристорів $VS5$ і $VS6$ [12]. На виході імпульсного регулятора через згладжуючий дросель L підключено паралельний інвертор (ПІ), на виході якого паралельно підключено комутаційний конденсатор і зварювальну установку.

Система управління (СУ) перетворювача складається з трьох основних блоків:

- ✓ Блок управління імпульсним регулятором (БУІР).
- ✓ Блок управління інвертором (БУІ).
- ✓ Блок захисту (БЗ).

Режими роботи ТКП і його вихідні параметри контролюються датчиками струму ДТ1, ДТ2 і датчиками напруги ДН1, ДН2, ДН3.

На рисунку 2.13 показана експериментальна схема вимірів, проведених під час зварювання. При живленні зварювального трансформатора $Tr2$ безпосередньо від мережі, перемикач $S1$ знаходиться в положенні 1 і 2, а перемикач $S2$ відключений. Якщо живлення зварювальної установки здійснюється через ТКП, то перемикач $S1$ знаходиться в положенні 1" і 2", а перемикач $S2$ включений.

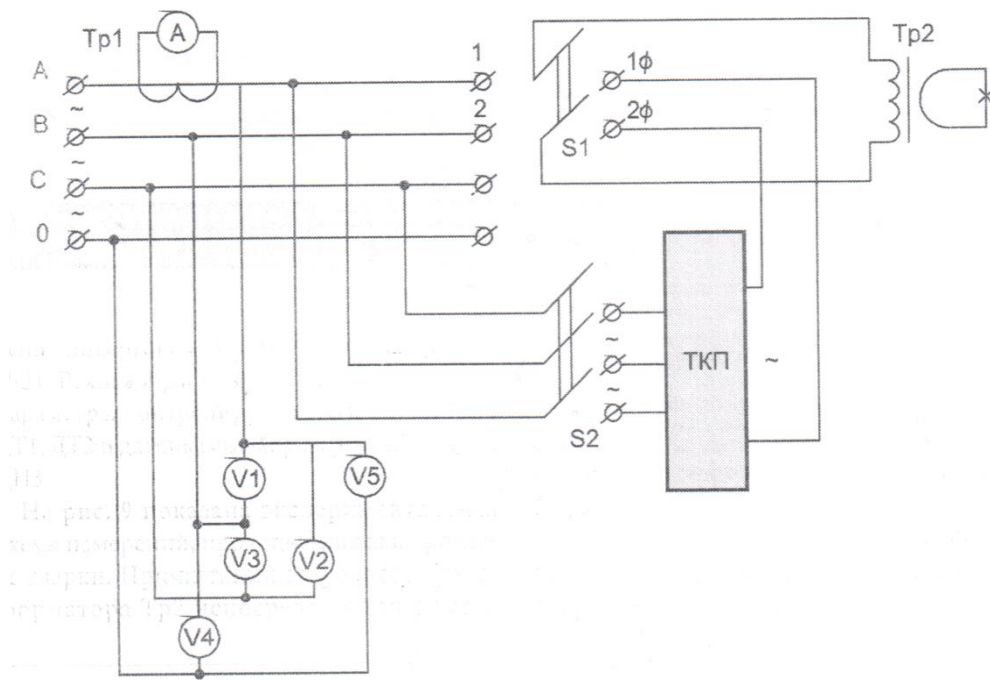


Рисунок 2.13. - Експериментальна схема вимірювань в процесі електроконтактного зварювання.

Для виміру фазних струмів використовувався трансформатор струму Тр1. Вимір фазної напруги вироблявся вольтметрами V4 і V5, а вольтметрами V1, V2 і V3 вимірювалися лінійна напруга. Для виміру відхилення напруги використовувався самопишущий прилад Н390, а при реєстрації швидких змін напруги — шлейфовий осцилограф типа Н117. Для того, що відповідно до входів осцилографа з мережею були використані магазин опорів Р156 і магазин шунтів Р156.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

В цьому розділі «Вплив вищих гармонік в мережах електропостачання напругою до 1 кВ» досліджено вплив вищих гармонік у мережах електропостачання напругою до 1 кВ. Виявлено ряд негативних наслідків, пов'язаних із присутністю гармонік у мережі, а також проведено аналіз гармонійних складових первинних струмів.

Гармоніки спричиняють додаткові втрати в трансформаторах через збільшення активного опору їхніх обмоток. Це призводить до перегріву трансформаторів, що скорочує їхній термін служби та знижує загальну ефективність системи.

Несинусоїдальні струми спричиняють зростання теплових втрат в елементах електроустаткування, що призводить до прискореного теплового та електричного старіння ізоляційних матеріалів. Це зменшує їхній ресурс і вимагає частішої заміни або ремонту.

Додатковий нагрів внутрішніх елементів захисних пристроїв, спричинений протіканням несинусоїдальних струмів, може призвести до необґрунтованих спрацьовувань запобіжників та автоматичних вимикачів. Це може порушити стабільність роботи всієї системи.

Протікання несинусоїдальних струмів призводить до підвищеного нагріву зовнішньої поверхні жил кабелю через поверхневий ефект та ефект близькості, що сприяє прискореному старінню ізоляції.

Високочастотні гармоніки струму, що протікають у силових кабелях, можуть створювати перешкоди в кабелях телекомунікацій, особливо коли вони прокладені близько один до одного. Це негативно впливає на якість передачі даних у телекомунікаційних мережах.

Існує багато методів для визначення гармонійних складових несинусоїдальних періодичних функцій, які дозволяють точно оцінити спектр гармонік в мережі. Для різних видів навантаження, таких як вентильні перетворювачі, установки дугового та контактного зварювання, газорозрядні лампи тощо, проводиться аналіз гармонійних складових.

При використанні проміжного високочастотного ланцюга (модулятора) між випрямлювачем і навантаженням, оцінка несинусоїдальності мережевого струму стає складнішою, але метод комутаційних функцій дозволяє отримати точні результати.

Підвищення частоти роботи перетворювача призводить до збільшення коефіцієнта спотворення, що обумовлено зростанням відносної ваги першої гармоніки мережевого струму. Збільшення коефіцієнта спотворення також спостерігається при зміні співвідношення ємностей демпфуючого та комутаційного конденсаторів.

Фазові зрушення і їхні впливи повинні враховуватися при розрахунку коефіцієнта спотворення фазних струмів. При симетричній послідовності фаз мережевої напруги та частоті роботи модулятора, кратній числу фаз мережі, коефіцієнти спотворень у всіх фазах приблизно однакові.

Таким чином, вплив вищих гармонік у мережах електропостачання напругою до 1 кВ є суттєвим фактором, який вимагає ретельного аналізу та врахування при проектуванні та експлуатації електроустаткування.

РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ РІВНІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК: МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ

3.1. Автоматизація розрахунку вищих гармонік в електричних мережах промислових підприємств з нелінійним навантаженням

Підвищення якості електричної енергії є важливим народногосподарським завданням, вирішення якого дозволить підвищити економічну ефективність виробництва за рахунок зниження втрат електроенергії, збільшення терміну служби електрообладнання та підвищення надійності електропостачання.

На сучасному етапі розвитку електроенергетики вирішення цієї проблеми стало можливим на новому технічному рівні. Створено приладові засоби вимірювання показників та розроблено систему обліку та контролю якості електричної енергії. На всіх рівнях управління режимами в енергосистемах активно впроваджуються інтелектуальні автоматизовані системи диспетчерського управління на базі сучасних засобів інформаційної та комп'ютерної техніки. У зв'язку з цим актуального значення набуває розробка ефективних методів і програм розрахунку показників якості електроенергії.

Оцінка впливу джерел вищих гармонік на несинусоїдальності напруги мережі, обумовленого застосуванням тих чи інших засобів або методів обмеження несинусоїдальності напруги (наприклад, активних фільтро-компенсуючих пристроїв) і вибір параметрів цих засобів вимагають розрахунку рівнів вищих гармонік в електричних мережах.

Результатами розрахунку несинусоїдальності струмів і напруг є амплітудні спектри напруг у вузлах і струмів у гілках схеми заміщення системи електропостачання, а також коефіцієнти несинусоїдальності напруги у вузлах схеми заміщення та еквівалентні діючі значення струмів вищих гармонік її гілках.

Ці результати отримують на підставі розрахунку встановленого режиму вищих гармонік. При цьому приймають такі припущення:

- система електропостачання передбачається симетричною та лінійною, тобто всі фази мають однакові однойменні параметри;
- опір елементів системи електропостачання струмам вищих гармонік прямий та зворотній послідовностей приймаються однаковими;
- джерела гармонік представляються симетричними трифазними навантаженнями, що генерують в мережу струми вищих гармонік.

Прийняті припущення дозволяють розглядати режим кожної гармоніки незалежно від іншого режиму і використовувати для визначення амплітудних спектрів струмів і напруг принцип накладання.

Розрахунки рівнів вищих гармонік у мережах підприємства, що відрізняються складною конфігурацією та містять значну кількість елементів, практично можливі лише при застосуванні ЕОМ.

Для реалізації даного розрахунку вищих гармонік в системах електропостачання підприємств у середовищі Delphi була розроблена програма «Sigma», що дозволяє виконувати розрахунки несинусоїдальності струмів і напруг у системах електропостачання промислових підприємств та коефіцієнта несинусоїдальності напруги, джерелом струму вищих гармонік яких є вентиляльний перетворювач 6-, 12-пульсний), а також те чи інше джерело, що задається амплітудою і кутом кожної гармоніки.

Розрахунок проводиться для канонічних гармонік ($v = 5; 7; 11; 13; \dots$). Якщо в системі електропостачання є перетворювачі тільки з 6-пульсною схемою випрямлення, то проводиться розрахунок для восьми гармонік ($v = 5; 7; 11; 13; 17; 19; 21; 25$). За наявності тільки перетворювачів з 12-пульсною схемою випрямлення розрахунок проводиться для чотирьох гармонік ($v = 11; 13; 23; 25$).

Алгоритм розрахунку програми ґрунтується на методі вузлових потенціалів та реалізується у такому порядку:

1. Складається схема заміщення системи електропостачання струмів вищих гармонік. Схема заміщення складається на одну фазу і має нейтраль, до якої приєднуються нульові точки схем заміщення генераторів, узагальнених навантажень, двигунів, батарей конденсаторів та ємнісних провідностей кабельних та повітряних ліній великої протяжності.

Вентильні перетворювачі та інші джерела гармонік замінюють джерелами струмів вищих гармонік нескінченної потужності. Якщо однієї секції (системі шин) підключено кілька джерел вищих гармонік, проводиться їх еквівалентування.

2. Розрахунок параметрів схем заміщення елементів систем електропостачання для кожної гармоніки. Кількість гармонік, котрим розраховуються параметри схем заміщення, визначається відповідно до вихідними даними тип джерела вищих гармонік.

3. Визначається спектральний склад струмів джерел вищих гармонійних складових.

4. За заданою інформацією (парами вузлів та опорів для кожної гілки схеми заміщення мережі) формується матриця провідностей вузлів $[Y_v]$ та комплексна стовпцева матриця еквівалентних вузлових струмів джерел вищих гармонік $[J_v]$. Діагональний елемент Y_{vii} дорівнює сумі провідностей тих гілок, які є інцидентними вузлу схеми. Недіагональний елемент Y_{vij} дорівнює провідності гілки, що з'єднує вузли i та j схеми, взятої з протилежним знаком.

5. Вирішується система вузлових рівнянь у матричній формі для v -х гармонік:

$$|Y_{vii}| \cdot |\varphi_{vi}| = |I_{vi}| \quad (3.1.)$$

6. Визначається еквівалентне значення напруги v -ї гармоніки в i -му вузлі схеми:

$$U_{vi} = \sqrt{|\varphi_{vi}|^2} \quad (3.2.)$$

7. За результатами розрахунку еквівалентних значень гармонік напруги у вузлах визначаються коефіцієнти несинусоїдальності напруги.

8. Розраховується чинне значення струмів v -ї гармоніки у гілках схеми заміщення:

$$I_{vi} = \frac{|\varphi_{vi} - \varphi_{vj}|}{Z_{vi}} \quad (3.3)$$

9. Визначається еквівалентне значення струмів вищих гармонік у гілках схеми заміщення:

$$I_{ei} = \sqrt{\sum_{v=vl}^n I_{vi}^2} \quad (3.4.)$$

Будь-яку конфігурацію схеми електропостачання промислового підприємства програмі можна подати у вигляді певного набору гілок та вузлів. Кожна гілка має початковий та кінцевий вузол, що використовується у програмі для введення конфігурації схеми електропостачання. Як приклад розглянемо розрахунок рівнів найвищих гармонік для системи електропостачання підприємства, однолінійна схема якої представлена на рис. 3.1.

Вихідні дані до рисунку 3.1.

Система: $S_{кз} = 2000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$;

вузол 1: трансформатор $S_{т1} = 63 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_k = 12 \%$, $\Delta P_k = 250 \text{ кВт}$;

вузол 2: кабельна лінія $L_1 = 2 \text{ км}$, 4 кабеля, $r_0 = 0,028 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 0,075 \text{ Ом/км}$, трансформатор $S_{т3} = 2500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $U_k = 10 \%$, $\Delta P_k = 10 \text{ кВт}$; кабельна лінія $L_2 = 4,8 \text{ км}$, 4 кабелі, $r_0 = 0,028 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 0,075 \text{ Ом/км}$, навантаження $S_{н3} = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\cos(\varphi) = 0,8$; 12-пульсний перетворювач $S_{п3} = 5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\varphi = 30^\circ$; БК $Q_{бкз} = 15 \text{ Мвар}$; ТЕЦ $S_{тец} = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $X_d = 0,15$;

вузол 3: навантаження $S_{H1} = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\cos(\varphi) = 0,8$; 6-пульсний перетворювач $S_{П1} = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\varphi = 10^\circ$; БК $Q_{БК1} = 15 \text{ Мвар}$;

вузол 4: навантаження $S_{H4} = 2 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\cos(\varphi) = 0,8$; БК $Q_{БК4} = 1 \text{ Мвар}$;

вузол 5: трансформатор $S_{Т2} = 2500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $U_k = 10 \%$, $\Delta P_k = 10 \text{ кВт}$;

вузол 6: навантаження $S_{H2} = 1,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\cos(\varphi) = 0,8$; 6-пульсний преобразователь $S_{П2} = 200 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $\varphi = 20^\circ$; БК $Q_{БК2} = 800 \text{ квар}$.

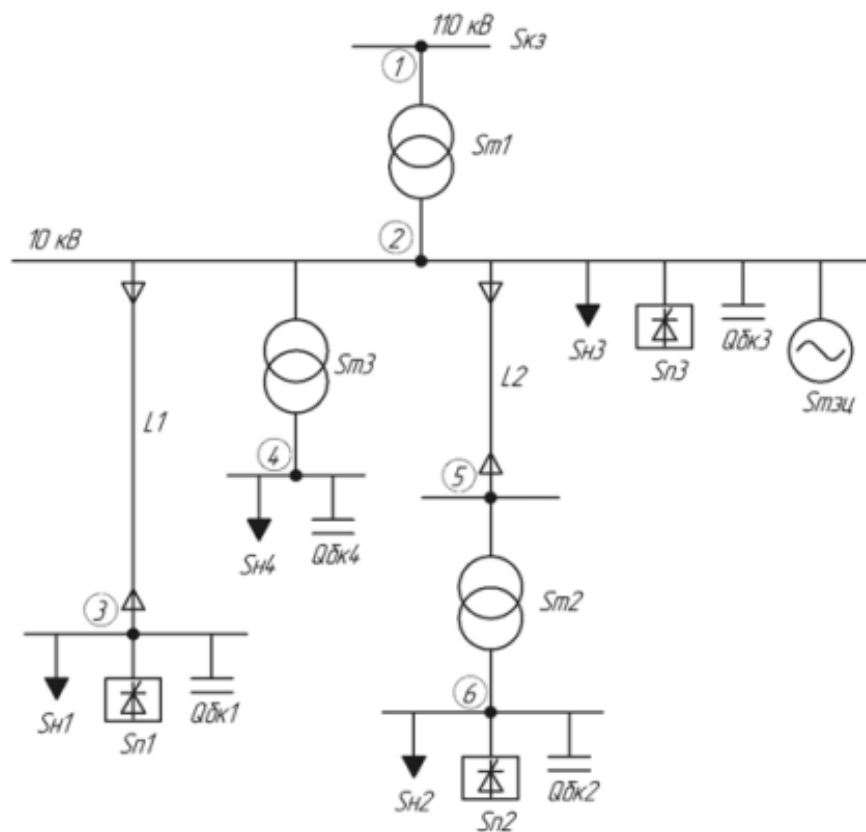


Рисунок 3.1. – Однолінійна схема електропостачання підприємства

Схема заміщення системи електропостачання підприємства для розрахунку струмів вищих гармонік представлено на рисунку 3.2.

Схема заміщення має 15 гілок і 6 вузлів, а також два 6-пульсні та один 12-пульсний перетворювач, отже, розрахунок будемо проводити для восьми гармонік (5; 7; 11; 13; 17; 19; 23; 25).

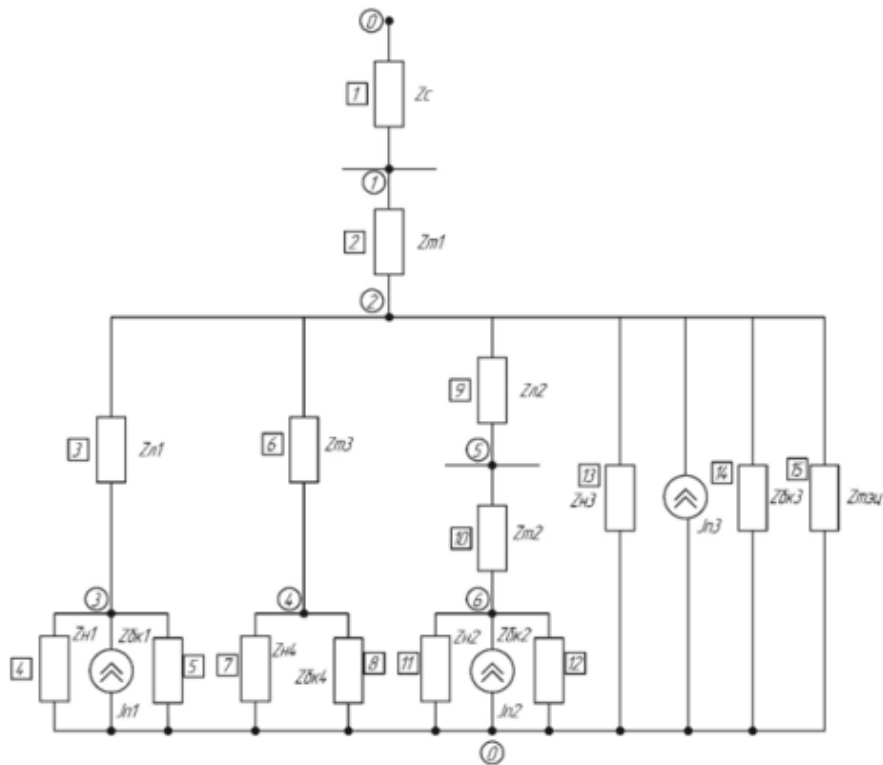


Рисунок 3.2. – Схема заміщення системи електропостачання підприємства

Для введення у програму відомостей про параметри гілок схеми електропостачання передбачена форма в головному вікні програми (рис. 3.3. а), при цьому кожен рядок відповідає одній гілці, де вказується початковий і кінцевий вузол, що з'єднує цю гілку, а також тип елемента схеми заміщення. Введення параметрів елементів схеми заміщення передбачене в окремому вікні програми (рис. 3.3., б).

номер	узел 1	узел 2	Элемент
ветвь 1	1	0	Система
ветвь 2	1	2	Трансформатор
ветвь 3	2	3	ЛЭП
ветвь 4	3	0	Нагрузка
ветвь 5	3	0	БК
ветвь 6	2	4	БК
ветвь 7			Трансформатор
ветвь 8			БК
ветвь 9			ЛЭП
ветвь 10			Хс ЛЭП
ветвь 11			Генератор ТЭЦ
ветвь 12			Нагрузка
ветвь 13			Система

а)



Трансформатор

Мощность

МВА

Напряжение КЗ

%

Потери КЗ

МВт

Ок

б)

Рисунок 3.3. – Форма вводу даних в таблицю: а – гілок; б – параметрів елементів схеми заміщення.

Для введення в програму відомостей про параметри джерел найвищих гармонік 3.4. передбачено таблицю вузлів у головному вікні програми (рис. 3.4, а). У кожному рядку таблиці можна встановити одне джерело вищих гармонік, розташований у даному вузлі. Якщо в цьому вузлі немає джерела вищих гармонік струму, то зі списку слід вибрати параметр «ні».

Для таблиці вузлів введення параметрів джерел вищих гармонік передбачено окремому вікні програми (рис. 3.4., б).

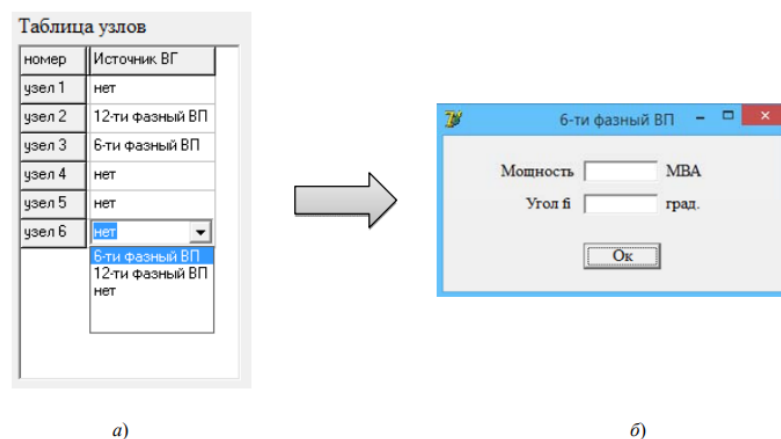


Рисунок 3.4. – Форма вводу даних в таблицю: а –вузлів; б – параметрів джерел вищих гармонік.

У програмі передбачено введення кількості та номерів гармонік, для яких слід здійснити розрахунок.

Програма розраховує послідовно для кожної гармоніки струм у гілках та напруга у вузлах схеми.

Результати розрахунку програми виводяться у вигляді таблиць (рис. 3.5).

Отримані результати розрахунку вищих гармонік у відносних одиницях подаються у вигляді трьох таблиць:

- таблиці діючих значень напруг кожної гармонійної складової, а також діючих значень несинусоїдальних напруг у вузлах схеми;
- Коефіцієнта несинусоїдальності кривої напруги у вузлах схеми;

– таблиці діючих значень струмів кожної гармонійної складової, а також діючих значень несинусоїдальних струмів у гілках схеми.

Розрахунок вищих гармонійних складових для наведеної схеми електропостачання показав, що коефіцієнти несинусоїдальності кривої напруги у вузлах 3 та 4 становлять відповідно 5,63 та 7,69 %, що перевищує допустиме значення 5 % (рис. 3.5).

З таблиці діючих значень напруг кожної гармонічної складової видно, що коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги у вузлах 3 і 4 збільшився через 11-й і 13-й гармонійних складових. Тому для зниження коефіцієнта несинусоїдальності кривої напруги до допустимого значення необхідно встановити в цих вузлах фільтри 11-ї та 13-ї гармонік.

Таблицы расчетов

Напряжение в узлах схемы

№ узла	узел 1	узел 2	узел 3	узел 4	узел 5	узел 6
5	0.000	0.000	0.007	0.007	0.001	0.032
7	0.000	0.000	0.008	0.008	0.000	0.015
11	0.000	0.001	0.019	0.020	0.002	0.002
13	0.001	0.003	0.051	0.066	0.012	0.002
17	0.000	0.001	0.007	0.013	0.004	0.001
19	0.000	0.001	0.004	0.011	0.004	0.001
23	0.001	0.005	0.005	0.026	0.016	0.001
25	0.000	0.002	0.003	0.009	0.007	0.000
Искв	0.001	0.006	0.056	0.077	0.022	0.035

Коефициент Kис

№	Kис
узел 1	0.14
узел 2	0.64
узел 3	5.63
узел 4	7.69
узел 5	2.20
узел 6	3.55

Токи в ветвях схемы

№ ветвь	ветвь 1	ветвь 2	ветвь 3	ветвь 4	ветвь 5	ветвь 6	ветвь 7	ис
5	0.000	0.000	0.035	0.000	0.005	0.000	0.000	0.1
7	0.000	0.000	0.030	0.000	0.008	0.000	0.000	0.1
11	0.000	0.000	0.043	0.000	0.031	0.000	0.000	0.1
13	0.001	0.002	0.097	0.001	0.099	0.001	0.000	0.1
17	0.000	0.000	0.013	0.000	0.018	0.000	0.000	0.1
19	0.000	0.000	0.008	0.000	0.012	0.000	0.000	0.1
23	0.001	0.001	0.011	0.000	0.017	0.000	0.000	0.1
25	0.000	0.001	0.005	0.000	0.011	0.000	0.000	0.1
Искв	0.001	0.002	0.117	0.001	0.108	0.001	0.000	0.1

Рисунок 3.5. – Результаты розрахунку програми

Таблиця діючих значень струмів кожної гармонійної складової у гілках схеми показує, які гілки найбільш завантажені струмами вищих гармонік. З аналізу отриманих розрахунків випливає, що найбільш завантаженими є 3-

я та 5-та гілки. У спектральному складі струмів цих гілок сильно виражені 11 і 13 гармоніки.

Таким чином, розроблене програмне забезпечення дозволяє:

- оцінити ступінь впливу джерел вищих гармонік на несинусоїдальності напруги мережі;
- скоротити час виконання розрахунків за рахунок автоматизації;
- розрахувати чинне значення напруги (струму) кожної гармонійної складової у вузлах (гілках) схеми, а також їх еквівалентне значення;
- визначити коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги у вузлах схеми;
- прогнозувати значення вищих гармонік струму та напруги в системах електропостачання промислових підприємств із нелінійним навантаженням.

3.2. Засоби зниження гармонічних спотворень

3.2.1. Оптимізація кривої мережевого струму

Одним з перспективним способів зниження несинусоїдальності в електричних мережах є поліпшення форми кривою мережевого струму перетворювачів. Цього можна досягти компенсацією вищих гармонік магнітного потоку трансформатора перетворювача, накладенням струмів 3; 9; 15-й і гармонік вищих порядків на струми обмоток трансформатора або забезпеченням спеціальних законів управління перетворювачами.

У першому випадку в третинній обмотці трансформатора перетворювача створюється магніторушійна сила (МШС) вищих гармонік (рис. 3.1).

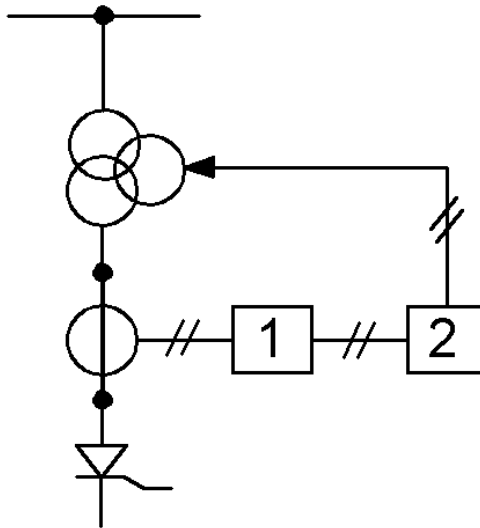
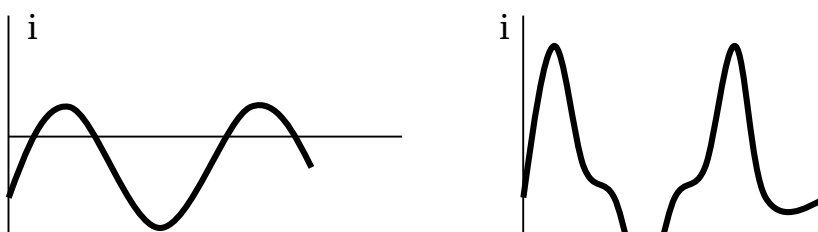


Рисунок 3.6.- Схема компенсації ВГ магнітного потоку трансформатора випрямлюваного перетворювача.

Магнітний потік, обумовлений цій МДС, має напрям, протилежний до напрямку основного потоку в трансформаторі. В результаті вищі гармоніки магнітного потоку компенсуються. Фільтр 1 є таким, що загороджує для першої гармоніки. Підсилювач 2 підсилює струми вищих гармонік. При реалізації схеми, приведеної на рис 3.1, можуть бути пригнічені канонічні і аномальні гармоніки потоку і мережевих струмів перетворювача [7, 8, 9].

Вживання описаної схеми в деяких випадках (наприклад, для ліній електропередавання) може бути зв'язане з меншими витратами, чим в разі використання звичайних перетворювачів і резонансних фільтрів. Недоліками схеми є її складність, необхідність вживання трьохмоткових трансформаторів, а швидкодія, щонайменше, на порядок менше, чим звичайних схем автоматичного управління частотою обертання електроприводу.

Схема може виявитися доцільною для потужних перетворювачів, що працюють в «спокійному» режимі. Ведення струму 3-ою або кратною трьома непарної гармоніки можливо в нульових і мостових схемах перетворювачів.



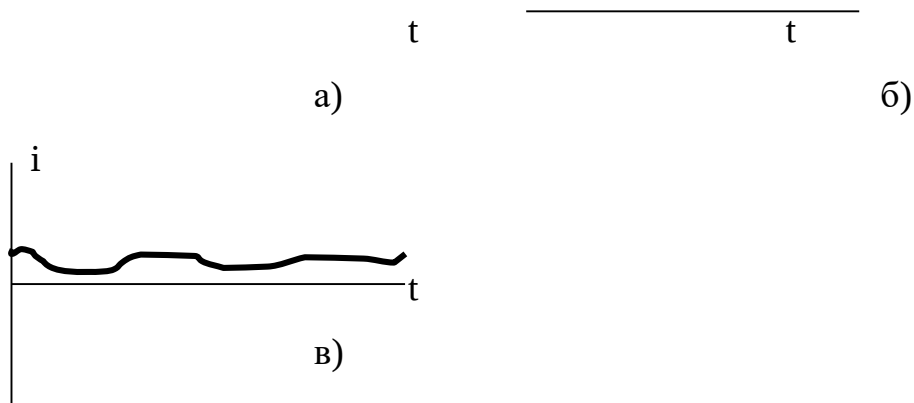


Рисунок 3.7. - Осцилограми струмів у вентильних та мережевих обмотках та в навантаженні мостового перетворювача при накладенні струму 3-ї гармоніки.

На рис. 3.6. показані осцилограми струмів у вентильних і мережевих обмотках і в навантаженні мостового перетворювача при накладенні струму 3-ої гармоніки. Крива мережевого струму виявляється вельми близькою до синусоїди. Змінюючи значення і фазу накладеного струму, можна понизити до нуля ту або іншу гармоніку мережевого струму (наприклад, 5-у, 7-у) при одночасному істотному зменшенні значень останніх гармонік канонічних порядків.

Джерелом накладеного струму для перетворювача невеликої потужності служить зазвичай генератор низькочастотних коливань з підсилювачем. Для потужних перетворювачів використовуються синхронні генератори. При роботі перетворювача лише в режимі випрямляча джерело струму може бути замінений резистором.

Проте для реверсивних перетворювачів використання резисторів не представляється можливим, оскільки при інвертуванні джерело струму повинне працювати в генераторному режимі [22].

Вживання спеціального джерела струму або резистора зв'язане з додатковими втратами, що досягають 10% енергій, споживаною перетворювачем. Це обставина, а також додаткове ускладнення схеми

послужило причиною того, що на практиці перетворювачі з накладенням струму поширення не отримали.

Розроблені схеми, що дозволяють здійснювати введення додаткових струмів гармонік за допомогою спеціальних схем безпосередньо від перетворювача. З цією метою використовуються також мікропроцесорні схеми управління перетворювачами.

У складних перетворювальних пристроях, що складаються з послідовно або паралельно сполучених одно- або двохмостових перетворювачів, принципово можливе управління гармонійним складом мережевого струму. З цією метою має бути забезпечена певна різниця значень кутів управління анодними і катодними групами вентилів.

3.2.2. Поліпшення якості електропостачання через зниження гармонік

Зниження рівнів вищих гармонік засобами живлячої мережі досягається в основному раціональною побудовою схеми електропостачання, при якому забезпечується допустимий рівень гармонік напруги на шинах споживача. Найбільш поширеними засобами є [23]:

- Використання трансформаторів перетворювачів з підвищеною напругою 110-220 (330) кВ.
- Живлення нелінійних навантажень від окремих трансформаторів або підключення їх до окремих обмоткам трьохобмоткових трансформаторів.
- Підключення паралельне нелінійним навантаженням синхронних і асинхронних двигунів.

Вживання в перетворювальних агрегатах трансформаторів з первинною напругою 110-220 кВ виключає вплив різкозмінних навантажень на споживачів розподільних мереж 0,4-10 кВ. Перешкодою до використання таких трансформаторів може бути поява недопустимої напруги гармонік в основних мережах живлячої енергосистеми. Розглянемо це питання детальніше [23].

Вхідний опір лінії для гармоніки:

$$X_{\text{вхв}} = Z_c \operatorname{tg}(\nu l + \operatorname{arctg} \frac{X_{\text{нв}}}{Z_c}), \quad (3.5)$$

де

Z_c - хвильовий опір лінії ($Z_c = 400 \text{ Ом}$);

α - коефіцієнт фази ($\alpha = 0,06 \text{ град/км}$);

l - довжина лінії, км.

Приймаючи опір навантаження тупиковій лінії пропорційним опору узагальненого навантаження:

$$X_{\text{нв}} = 0,45 \frac{U^2}{S_{\text{ном}}} \nu; S_{\text{ном}} \approx (0,1 \div 0,2) S_{\kappa}, \quad (3.6)$$

Отримаємо з похибкою не більше 2% для $\nu \geq 5$:

$$X_{\text{вхв}} = -Z_c \operatorname{ctg} \nu l, \quad (3.7)$$

Опір генераторних гілок:

$$X_{\text{зв}} = k_{\text{вz}} \nu X_{\kappa}, \quad (3.8)$$

де

X_{κ} - опір короткого замикання на шинах підстанції;

$k_{\text{вz}}$ - коефіцієнт, який враховує нелінійність характеристики $X_{\text{вz}}$.

Умова виникнення резонансу струмів:

$$\operatorname{tg} \frac{\nu l}{Z_c} = \frac{1}{k_{\text{вz}} \nu X_{\kappa}}, \quad (3.9)$$

звідси:

$$l = \frac{1}{\nu \alpha} \operatorname{arctg} \frac{Z_c}{k_{\text{вz}} \nu X_{\kappa}}. \quad (3.10)$$

В потужних енергосистемах ($S_{\kappa} \geq 3000 MB \cdot A$) резонанс струмів на частотах 11-13-й гармонік може бути при довжині живлячої лінії більше 60-80 кілометрів.

Напруга ν -й гармоніки на паралельному резонансному контурі:

$$\frac{U_{\nu}}{U_{ном}} \approx \frac{S_{np}}{S_{\kappa}} \frac{k_{\nu}}{k_R} \nu \sqrt{\nu}, \quad (3.11)$$

де

S_{np} - потужність споживача

$k_R = \frac{R}{X_R}$ - для мереж 110-220 кВ, у середньому $k_R \approx 0,1$. При $\nu = 13$,

$$S_{np} = 20 MB \cdot A \text{ та } S_{\kappa} = 2000 MB \cdot A; \quad \frac{U_{\nu}}{U_{ном}} \approx 0,28.$$

При виникненні резонансу, як відомо, комутація вентилів відбувається теоретично миттєво. В цьому випадку можливе пошкодження вентилів. Резонансні підвищення напруги на частотах вищих гармонік можливі також у вузлах основних мереж електричних систем, до яких не підключені перетворювачі.

Таким чином, вживання трансформаторів перетворювачів з вищою напругою 110-220 кВ за певних умов може привести до виникнення значної напруги 11-13-й гармонік (у меншій мірі 17-19-ої) і в загальному випадку таке рішення неприйнятне. Якщо на підприємстві є блок-станція або синхронний компенсатор, підключений через трансформатор до шин 110-220 кВ, і відсутні споживчі приєднання 110-220 кВ значної довжини, підключення трансформатора перетворювача до шинам 110-220 кВ сповна допустимо.

При виділенні нелінійних навантажень (зокрема, перетворювачів) на одну секцію (систему шин), підключену до двохобмоточного трансформатора, виникає випадок, аналогічний попередньому. За

відсутності батарей конденсаторів і підключенні синхронного компенсатора (двигуна) до шин 10 кВ опір навантаження ν -ої гармоніки:

$$X_{\nu\nu} = \frac{17}{S_{\delta}} \nu, \quad (3.12)$$

де S_{δ} - потужність двигуна компенсатора.

Відносне значення напруги ν -ї гармоніки при резонансі:

$$U_{\nu} = \frac{U_{\nu}}{U_1} \approx 0,3 \frac{S_{np}}{S_{\delta}} \nu k_{\nu}. \quad (3.13)$$

При $S_n \geq S_{np}$ і $k_{11(13)} \approx 0,05$ виявляється $U_{\nu*} \leq 0,03$. Проте, якщо $S_n \approx S_{np}$, відносна напруга 11-13-ої гармоніки на частоті резонансу може скласти 10-20%. Установка фільтру 11-ої гармоніки виключить це явище. Відзначимо, що при виникненні режиму резонансу напруги в мережах 110-220 кВ можливі значні (до 7-8%) підвищення напруги на частотах вищих гармонік в цих мережах і в мережі підприємства. Тому, якщо від шин 110-220 кВ живляться споживчі приєднання, доцільно в мережі підприємства встановлювати фільтри.

3.3. Резонансні фільтри для енергетичних систем

Зниження рівнів вищих гармонік в електричних мережах є частиною загального завдання зменшення впливу нелінійних навантажень на живлячу мережу і поліпшення якості електричної енергії в електромережах підприємств. Комплексне рішення цієї задачі, засноване на вживанні багатофункціональних пристроїв, опиняється в економічних відносинах доцільнішим, ніж, наприклад, використання мережевого струму перетворювача [10, 11].

Прикладом таких багатофункціональних пристроїв є силові резонансні фільтри (СРФ) вищих гармонік, інакше звані фільтрокомпенсуючі пристрої, які поряд із зниженням рівнів вищих гармонік генерують в живлячу мережу

реактивну потужність. За певних умов такі фільтри можуть використовуватися також для симетрування системи лінійної напруги в електромережі. Фільтри можуть встановлюватися для розділення лінійних і нелінійних навантажень (загороджувальні фільтри) або для шунтування (поглинання) струмів вищих гармонік. Розглянемо доцільність вживання фільтрів різних типів.

Розділення лінійних і нелінійних навантажень може здійснюватися за допомогою фільтрів нижчих частот (ФНЧ) або смугових фільтрів. Останні складніші, ніж ФНЧ. Тому далі вживання їх розглядати не будемо. Простим ФНЧ є Г-подібний фільтр, контур якого утворюється індуктивністю трансформатора перетворювача (ЕДСП) і ємкістю батареї конденсаторів, підключеній до шин підстанції [7].

Щоб уникнути резонансних підвищень напруги на частотах гармонік резонансна частота контуру мережа – батарея конденсаторів має бути менше частоти найменшої гармоніки амплітудного спектру струму (ЕДС) нелінійного навантаження. Відношення опорів батареї і мережі для ν -ої гармоніки:

$$\frac{X_{cv}}{X_{nv}} = \frac{S_{\kappa}}{Q_{\nu}^2}. \quad (3.14)$$

Звичайне відношення потужності короткого замикання за живлячим трансформатором до потужності цього трансформатора знаходиться в межах:

$$\frac{S_{\kappa}}{S_{mp}} = 5 \div 10. \quad (3.15)$$

Позначимо відношення струмів ν -ої гармоніки після фільтру і до фільтру таким чином:

$$k = \frac{I_{2\nu}}{I_{1\nu}}. \quad (3.16)$$

За допомогою описаних формул співвідношення між потужністю живлячого трансформатора і реактивною потужністю батареї

конденсаторів, при якому забезпечується задане (бажане) значення коефіцієнта, записується у вигляді:

$$\frac{Q_{\delta}}{S_{mp}} \geq \frac{(5 \div 10) S_{mp} (1 - k)}{k v^2}. \quad (3.17)$$

Останнє вираження дозволяє укласти, що для ефективного зниження рівнів гармонік за допомогою Г-подібного фільтру потрібна потужність батареї конденсаторів того ж порядку, що і потужність живлячого трансформатора. Очевидно, що таке рішення нераціональне. Аналогічний результат виходить і при використанні мостових ФНЧ. У даному випадку вживання Т-подібного фільтру менш доцільно, чим П-образного, оскільки Т-подібний фільтр менш надійний із-за наявності двох послідовно включених реакторів. Крім того, вхідний опір Т-подібного фільтру на частотах гармонік відносно невеликого порядку вищий, ніж П-образного, тому спотворення кривої напруги на затисках нелінійного навантаження будуть також великими. У зв'язку з цим далі розглядатимемо П-образні ФНЧ (рис. 3.4).

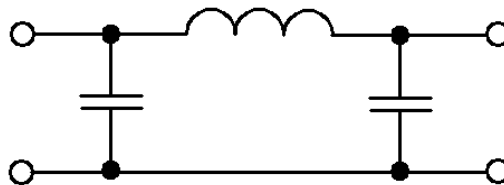


Рисунок 3.8. - П-образний фільтр низьких частот

При визначенні параметрів реакторів і конденсаторів фільтрів нехтуватимемо активними опорами фільтру і систем електропостачання. Передавальна функція по струму схеми, приведеної на рис.3.5.

$$I(p) = \frac{i_2(p)}{i_1(p)} = \frac{1}{p^4 C^2 L_n L + p^2 C(L + 2L_n) + 1}; \quad (3.18)$$

$$k = \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{v^4 \frac{X_p X_n}{X_c^2} + v^2 \frac{X_p + 2X_n}{X_c} + 1}, \quad (3.19)$$

де

X_p , X_n , X_c - реактивні опори фільтру, навантаження та поперечного плеча фільтру.

Позначимо $\frac{X_p}{X_n} = k_n$ и $\frac{X_n}{X_c} = k_{p1}$, вираз для k при заданому значенні коефіцієнта знайдемо з рівняння:

$$k_{p1} = -\frac{k_n v^2}{2(k_n v^2 + 2)} + \sqrt{\frac{1-k}{\alpha(k_n v^2 + 2)v^2} + \left[\frac{k_n}{2(k_n v^2 + 2)}\right]^2}; \quad (3.20)$$

для $k_n = 1$, $k = 0,5$ і $v = 5$ отримаємо $k_{p1} = 0,025$. Слід, сумарна потужність батареї конденсаторів фільтра:

$$Q_{\Sigma} = 2 \cdot 0,025(5 \div 10)S_{mp} = (0,25 \div 0,5)S_{mp}. \quad (3.21)$$

Таким чином, як і в разі Г-подібного фільтру, для ефективності зниження рівнів гармонік напруги в мережі потрібна встановлена потужність батареї конденсаторів, близька до потужності живлячого трансформатора.

При паралельному з'єднанні LC-ланцюгів, налаштованих на частоти окремих гармонік, реалізується ланцюговий СРФ. Дефіцит реактивної потужності на шинах підстанції в цьому випадку може бути повністю покритий за допомогою конденсаторів фільтрів, причому встановлена потужність конденсаторів використовується на 80-90%. Таким чином, СРФ є найбільш простими і економічними фільтрами, що забезпечило їх широке вживання.

Розглянемо питання про СРФ детальніше.

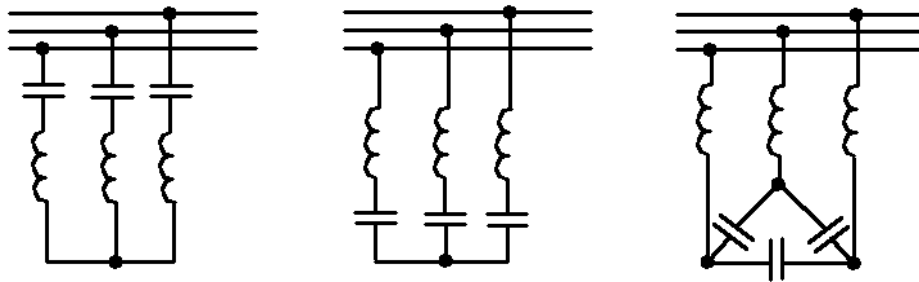


Рисунок 3.9.- Спрощені схеми СРФ

Спрощені схеми СРФ показані на рисунку 3.5. У схемі, приведений на рисунку, ізоляція конденсаторів відносно землі знаходиться під напругою, що не перевищує фазну напругу мережі. Таким чином, підвищується надійність використання батареї. Найбільшого поширення набула схема, приведена на рисунку 3.5 а.

Технічними умовами на експлуатацію конденсаторів передбачається обмеження перевищень напруги і струму понад номінальні значення деякими величинами c_u і c_i (у долях номінальних значень). При роботі конденсаторів в мережах з гармоніками інколи висувається додаткова вимога, що обмежує потужність батареї в робочих режимах номінальним значенням. При цьому приймається $c_u=1$ і $c_i=1,3$ [19, 22].

Знайдемо вираження для потужності батареї конденсаторів СРФ ν -ої гармоніки, вважаючи, що в ланцюзі СРФ проходять струм лише 1-ої і ν -ої гармонік. Напруга на батареї конденсаторів не перевищує допустимого (номінального) значення, якщо дотримується умова:

$$a_p^2 k_u^2 \leq c_u, \quad (3.22)$$

де

$$a_p = \frac{\nu_p^2}{\nu_p^2 - 1} \quad (3.23)$$

ν_p - гармоніка, на частоту якої налаштований СРФ.

$$k_u = \frac{U_m}{k_c U_{ном,р}} \quad (3.24)$$

де

U_m - найбільш можливе в експлуатації значення лінійної напруги на шинах підстанції.

$U_{ном,р}$ - номінальна лінійна напруга батареї конденсаторів СРФ.

При з'єднанні конденсаторів в трикутник або зірку значення коефіцієнта береться рівним одиниці або $\sqrt{3}$. Недопустимі перевантаження конденсаторів СРФ по струму не мають місця, якщо:

$$\sqrt{I_{1p}^2 + \sum I_{vp}^2} \leq c_i I_{ном,р} \quad (3.25)$$

де

I_{1p} и I_{vp} - лінійні струми 1-й і ν_p -й гармонік в ланцюзі СРФ

$I_{ном,р}$ - номінальний струм батареї.

Якщо в ланцюзі встановлено декілька СРФ, то в першому наближенні можна вважати, що через кожен СРФ проходять струми 1-ої гармоніки і гармоніки, на частоту якої він налаштований. В цьому випадку вираження для потужності батареї конденсаторів фільтру ν_p -ої гармоніки з допомогою може бути представлено у вигляді:

$$Q_p \geq \frac{\sqrt{3} U_{ном,р} I_{vp}}{\sqrt{c_i^2 - a_p^2 k_u^2}} \quad (3.26)$$

Спрощений вираз для Q_p , який використовується на практиці, має вигляд:

$$Q_p \geq 1,2 k_c U_{ном,р} I_{vp} \quad (3.27)$$

$k_c = \sqrt{3}$ при з'єднанні конденсаторів у трикутник, при з'єднанні їх у зірку $k_c = 3$.

Для врахування обмежень потужності батареї необхідно також дотримання умови:

$$Q_p \geq Q_{1p} + Q_{vp} \quad (3.28)$$

де

Q_{1p} та Q_{vp} - реактивна потужність, яка видається батареєю на частотах 1-й і ν_p -й гармонік.

У перехідних режимах перетворювача ефективність роботи СРФ знижується порівняно із сталим режимом. При цьому термін служби СРФ зменшується. Зростання коефіцієнта несинусоїдальності в мережах з 12-фазними перетворювачами виявляється більшим, ніж в мережах з 6-фазними перетворювачами. Кількість встановлених СРФ практично не впливає на значення коефіцієнта несинусоїдальності. Вибір потужності батарей конденсаторів СРФ слід виробляти з врахуванням особливостей

роботи їх в перехідних режимах. В розрахунок повинні вводитися середньоквадратичне значення струмів вищих гармонік [11].

На закінчення розглянемо випадок паралельної роботи два СРФ, налаштованих на частоту однієї гармоніки. Можна представити наступні варіанти.

1. Один з двох живлячих трансформаторів відключається, і все навантаження живиться від одного трансформатора. При цьому очевидно, потужність короткого замикання на шинах 10 кВ не змінюється (або змінюється трохи). Коефіцієнти k_{p1} і k_{p2} , а також k_{i1} і k_{i2} для кожного СРФ також не змінюються (або змінюються мало).

2. Два живлячі двохобмоточні трансформатори (або дві обмотки одного або двох різних трьохобмоткових трансформаторів) включаються паралельно за допомогою секційного вимикача. За відсутності секційного реактора потужність короткого замикання на шинах 10 кВ значно зростає, коефіцієнти і фільтрів зменшуються.

При аналізі нехтуватимемо активними опорами СРФ. Коефіцієнти завантаження першого (другого) СРФ представляються у вигляді:

$$k_{i1(2)} = \frac{1}{1 \pm x_{1(2)} \pm \frac{x_{1(2)}}{x_{2(1)}}} \quad (3.29)$$

При роздільній роботі фільтрів і описане вираження приймає наступний вигляд:

$$k_{ip} \approx \frac{1}{1 + x_p} \quad (3.30)$$

де
$$x_p = \frac{\alpha_p}{k_1 k_p v_p^2} \quad (3.31)$$

Вираз для коефіцієнта завантаження першого (другого) фільтру характеризує завантаження кожного СРФ еквівалентним струмом v -ої гармоніки при паралельній роботі перетворювача по варіанту 1 або 2.

У першому випадку при, як впливає з вираження для знаходження коефіцієнта завантаження першого (другого) фільтру, один з СРФ розвантажиться по струму вищих гармонік майже повністю, інший СРФ виявиться завантаженим цим струмом повністю або навіть дещо більше, ніж сумарний струм вищих гармонік. Тому при нагоді паралельної роботи силових резонансних фільтрів по першому варіанту слідуює кожен з них вибирати по еквівалентному струму вищих гармонік перетворювачі, що живляться від обох трансформаторів [7, 15, 18].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

В цьому розділі «Оптимізація рівнів вищих гармонік: методи та підходи» було розглянуто різні методи та підходи до оптимізації рівнів вищих гармонік у електричних мережах. Проаналізовано автоматизацію розрахунку вищих гармонік для промислових підприємств з нелінійним навантаженням, засоби зниження гармонічних спотворень та використання резонансних фільтрів у енергетичних системах.

Автоматизація розрахунку дозволяє значно підвищити точність і швидкість визначення гармонічних складових у промислових мережах з нелінійними навантаженнями. Це сприяє ефективному плануванню і оптимізації електропостачання, мінімізуючи негативний вплив вищих гармонік на обладнання та мережу в цілому.

Різні методи і технології зниження гармонічних спотворень дозволяють покращити якість електроенергії та зменшити вплив вищих гармонік на роботу електроустаткування. Використання пасивних і активних фільтрів, корекція форм кривих мережових струмів, а також інтеграція інноваційних технологій забезпечують зниження рівнів гармонічних спотворень у мережах.

Резонансні фільтри відіграють важливу роль у зниженні гармонічних спотворень в енергетичних системах. Вони дозволяють ефективно ізолювати і фільтрувати гармоніки, тим самим підвищуючи стабільність і надійність роботи електричних мереж. Використання резонансних фільтрів забезпечує зниження теплових втрат, покращує ефективність електропостачання і сприяє довговічності обладнання.

В підсумку, оптимізація рівнів вищих гармонік є важливим аспектом у сучасних електричних мережах. Використання автоматизованих розрахунків, різноманітних засобів зниження гармонічних спотворень та резонансних фільтрів дозволяє забезпечити надійне і ефективне електропостачання, мінімізуючи негативні впливи вищих гармонік на мережі та обладнання.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ:

В розділі «Вимірювання та моніторинг якості електроенергії» було розглянуто сучасні дослідження та практики, пов'язані з проблемами вищих гармонік (ВГ) в системах електропостачання (СЕР). На основі аналізу літературних джерел та проведених досліджень зроблено такі висновки:

Аналіз літературних джерел виявив, що проблема вищих гармонік є актуальною для сучасних електроенергетичних систем. ВГ спричиняють значні спотворення у формі сигналу напруги і струму, що негативно впливає на роботу електрообладнання та загальну якість електропостачання. Значна увага приділяється дослідженню джерел ВГ та методам їх зниження.

Вищі гармоніки мають суттєвий вплив на ефективність роботи електричних мереж, зокрема, на підвищення втрат в електричних мережах, зниження коефіцієнта потужності, прискорення зносу обладнання, а також на зниження надійності роботи систем. Вони можуть спричиняти перегрів трансформаторів і кабельних ліній, а також збої в роботі електронного обладнання.

Для розподільчих мереж 0,4 кВ було запропоновано кілька методів зниження впливу ВГ, включаючи використання фільтрів гармонік, активних компенсаторів та оптимізацію роботи джерел навантаження. Ефективне застосування цих методів сприяє підвищенню якості електропостачання та зменшенню негативного впливу ВГ на обладнання та мережі.

Загалом, забезпечення високої якості електроенергії вимагає комплексного підходу, що включає аналіз причин виникнення ВГ, дослідження їх впливу на електроенергетичні системи та впровадження ефективних методів зниження гармонічних спотворень.

В розділі «Вплив вищих гармонік в мережах електропостачання напругою до 1 кВ» досліджено вплив вищих гармонік у мережах електропостачання напругою до 1 кВ. Виявлено ряд негативних наслідків, пов'язаних із присутністю гармонік у мережі, а також проведено аналіз гармонійних складових первинних струмів.

Гармоніки спричиняють додаткові втрати в трансформаторах через збільшення активного опору їхніх обмоток. Це призводить до перегріву трансформаторів, що скорочує їхній термін служби та знижує загальну ефективність системи.

Несинусоїдальні струми спричиняють зростання теплових втрат в елементах електроустаткування, що призводить до прискореного теплового та електричного старіння ізоляційних матеріалів. Це зменшує їхній ресурс і вимагає частішої заміни або ремонту.

Додатковий нагрів внутрішніх елементів захисних пристроїв, спричинений протіканням несинусоїдальних струмів, може призвести до необґрунтованих спрацьовувань запобіжників та автоматичних вимикачів. Це може порушити стабільність роботи всієї системи.

Протікання несинусоїдальних струмів призводить до підвищеного нагріву зовнішньої поверхні жил кабелю через поверхневий ефект та ефект близькості, що сприяє прискореному старінню ізоляції.

Високочастотні гармоніки струму, що протікають у силових кабелях, можуть створювати перешкоди в кабелях телекомунікацій, особливо коли вони прокладені близько один до одного. Це негативно впливає на якість передачі даних у телекомунікаційних мережах.

Існує багато методів для визначення гармонійних складових несинусоїдальних періодичних функцій, які дозволяють точно оцінити спектр гармонік в мережі. Для різних видів навантаження, таких як вентильні перетворювачі, установки дугового та контактного зварювання, газорозрядні лампи тощо, проводиться аналіз гармонійних складових.

При використанні проміжного високочастотного ланцюга (модулятора) між випрямлювачем і навантаженням, оцінка несинусоїдальності мережевого струму стає складнішою, але метод комутаційних функцій дозволяє отримати точні результати.

Підвищення частоти роботи перетворювача призводить до збільшення коефіцієнта спотворення, що обумовлено зростанням відносної ваги першої

гармоніки мережевого струму. Збільшення коефіцієнта спотворення також спостерігається при зміні співвідношення ємностей демпфуючого та комутаційного конденсаторів.

Фазові зрушення і їхні впливи повинні враховуватися при розрахунку коефіцієнта спотворення фазних струмів. При симетричній послідовності фаз мережевої напруги та частоті роботи модулятора, кратній числу фаз мережі, коефіцієнти спотворень у всіх фазах приблизно однакові.

Таким чином, вплив вищих гармонік у мережах електропостачання напругою до 1 кВ є суттєвим фактором, який вимагає ретельного аналізу та врахування при проектуванні та експлуатації електроустаткування.

В розділі «Оптимізація рівнів вищих гармонік: методи та підходи» було розглянуто різні методи та підходи до оптимізації рівнів вищих гармонік у електричних мережах. Проаналізовано автоматизацію розрахунку вищих гармонік для промислових підприємств з нелінійним навантаженням, засоби зниження гармонічних спотворень та використання резонансних фільтрів у енергетичних системах.

Автоматизація розрахунку дозволяє значно підвищити точність і швидкість визначення гармонічних складових у промислових мережах з нелінійними навантаженнями. Це сприяє ефективному плануванню і оптимізації електропостачання, мінімізуючи негативний вплив вищих гармонік на обладнання та мережу в цілому.

Різні методи і технології зниження гармонічних спотворень дозволяють покращити якість електроенергії та зменшити вплив вищих гармонік на роботу електроустаткування. Використання пасивних і активних фільтрів, корекція форм кривих мережевих струмів, а також інтеграція інноваційних технологій забезпечують зниження рівнів гармонічних спотворень у мережах.

Резонансні фільтри відіграють важливу роль у зниженні гармонічних спотворень в енергетичних системах. Вони дозволяють ефективно ізолювати і фільтрувати гармоніки, тим самим підвищуючи стабільність і

надійність роботи електричних мереж. Використання резонансних фільтрів забезпечує зниження теплових втрат, покращує ефективність електропостачання і сприяє довговічності обладнання.

В підсумку, оптимізація рівнів вищих гармонік є важливим аспектом у сучасних електричних мережах. Використання автоматизованих розрахунків, різноманітних засобів зниження гармонічних спотворень та резонансних фільтрів дозволяє забезпечити надійне і ефективне електропостачання, мінімізуючи негативні впливи вищих гармонік на мережі та обладнання

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Boteler D. H. Geomagnetic effects on the pipe-to-soil potentials of a continental pipeline / D. H. Boteler // Advances in Space Research - ADV SPACE RES, 26. — 2000. — С. 15—20.
2. IEEE/PES technical report on Geomagnetic Disturbance and its impacts on the Power Grids // IEEE Power & energy so98 ISSN 1997-9266. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017. № 6 99 ciety technical council Geomagnetic Disturbance task Force, Piscataway. — nJ. — may 2013.
3. Price P. R. Geomagnetically Induced Current Effects on Transformers / P. R. Price // Power Delivery, IEEE Transactions on. — 2002. — Vol. 17, Issue 4. — P. 1002—1008.
4. <https://electrocontrol.com.ua/ua/stati-sxemy-i-spravochnaya-informaciya/1846.html>
5. Harmonic Trend in the USA: A Preliminary Survey. I.M. Nejdawi, A.E.Emanuel, D.J. Pileggi, M.J. Corridori, R.D. Archambeault//IEEETransactions on Power Delivery, Vol. 14, 4, 1999, pp. 1488 - 1494
6. IEEE STD 1100—1999, IEEE Recommended Practice for Powering andGrounding Electronic Equipment (IEEE Emerald book) (ANSI).
7. Harmonic Mitigating Transformer Energy Saving Analysis. MIRUSInternational Inc. Oct., 1999.
8. Evaluating Harmonic Concerns With Distributed Loads, MarkMcGranaghan, Electrotek Concepts, Knoxville, Tenn., Nov. 2001.
9. Treating Harmonics in electrical distribution system, Victor A. RamosJR. Computer Power & Consulting, January, 1999.
10. Хайнеман Р. Р. Spise. Моделирование работы электронных схем / Пер. с нем. М.: ДМК Пресс, 2002. (Серия проектирование).
11. Олійник Ю.С. Вплив вищих гармонійних складових на роботу електрообладнання/Научно-практическаяконференция «Наука без границ» - 2015http://www.rusnauka.com/13_NBG_2015/Tecnic/5_190200.doc.htm

12. Олійник Ю.С. Аналіз спектру вищих гармонік в системі випрямлювач-інвертор/Ю.С. Олійник//Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. - 2015.- Вип. 2.-С.93-100. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2015_2_23
13. <http://inmad.vntu.edu.ua/portal/static/0561A26E-916A-4DD1-8312-E809F041A432.pdf>
24. Harmonic Trend in the USA: A Preliminary Survey. I.M. Nejdawi, A.E. Emanuel, D.J. Pileggi, M.J. Corridori, R.D. Archambeault//IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 14, | 4, 1999, pp. 1488—1494.
25. IEEE STD 1100—1999. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment (IEEE Emerald book) (ANSI).
26. Harmonic Mitigating Transformer Energy Saving Analysis. MIRUS International Inc. Oct., 1999.
27. Evaluating Harmonic Concerns With Distributed Loads. Mark McGranaghan. Electrotek Concepts. Knoxville, Tenn., Nov. 2001.
28. Treating Harmonics in Electrical Distribution System. Victor A. Ramos JR. Computer Power & Consulting. January, 1999.