

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

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

О. КОЛЛАРОВ

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2023 р.

Кваліфікаційна робота
бакалавра

на тему Дослідження впливу гармонічних складових струму і напруги на роботу електричної мережі

Виконав студент 3 курсу, групи ЕЛКп-20
(шифр групи)

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

та електромеханіка»

Владислав СВИРИДОВ

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Керівник зав.каф., к.т.н., доц. О. КОЛЛАРОВ

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

(підпис)

Рецензент

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

(підпис)

Нормоконтроль:

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

Студент

(підпис)

(підпис)

(дата)

(дата)

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

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« _____ » _____ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Владиславу СВИРИДОВУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Дослідження впливу гармонічних складових струму і
напруги на роботу електричної мережі

керівник роботи Олександр КОЛЛАРОВ, к.т.н., доц.
(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 01.05.2023 № 168

2. Строк подання студентом роботи 06 червня 2023 року

Напруга в електричній мережі:

3. Вихідні дані до роботи:

660 В. частота напруги живлення – 50 Гц, падіння напруги у живлячій

мережі – 33 В, мінімальне значення кута керування тиристором – 5°,

напруга на навантаженні – 127 В, сумарне падіння напруги на опорах – 8

В, номінальний прямий струм – 700 А, коефіцієнт пульсацій – 0,0003.

Потужність навантаження: від 10 до 30 кВт. Гармоніки напруги: перша (50

Гц), друга, третя та четверта гармоніки, з амплітудами 2%, 1%, 0,5% та

0,3% від основної амплітуди напруги відповідно. Гармоніки струму: перша

(50 Гц), друга, третя та четверта гармоніки, з амплітудами 5%, 2%, 1% та

0,5% від основної амплітуди струму відповідно. Індуктивність кожного

навантаження у мережі: 0,1 Гн. Опір ліній передачі електроенергії: 0,1 Ом

на кілометр. Число навантажень в мережі: 12. Частота зміни навантаження:

10% від номінальної потужності.

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

1. Огляд принципів роботи електричних мереж.

2. Вплив гармонічних складових струму і напруги на роботу електричної мережі.

3. Розрахунок параметрів гармонічних складових.

4. Моделювання роботи системи електропостачання з дослідженням гармонійних складових.

5. Розробка заходів з охорони праці.

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

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 4	О. КОЛЛАРОВ, доц. каф.		
Нормоконтроль			

7. Дата видачі завдання 8 травня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	08.05.23 – 14.05.23	
2.	Розділ 2	15.05.23 – 21.05.23	
3.	Розділ 3	22.05.23 – 30.05.23	
4.	Розділ 4	31.05.23 – 03.06.23	
5.	Розділ 5	03.06.23 – 06.06.23	

Студент _____
(підпис)

Владислав СВИРИДОВ
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олександр КОЛЛАРОВ
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Владислав СВИРИДОВ. Дослідження впливу гармонічних складових струму і напруги на роботу електричної мережі / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2023.

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

У першому розділі здійснено огляд принципів роботи електричних мереж, визначено основні компоненти та перспективи їх розвитку, визначено вплив гармонічних складових струму і напруги на роботу електричної мережі.

У другому розділі були визначені методи управління та захисту від впливу гармонічних складових на роботу електричної мережі шляхом теоретичних досліджень.

У третьому розділі здійснено розрахунок параметрів гармонічних складових, виконано огляд схем пристроїв, що викликають виникнення гармонійних коливань.

У четвертому розділі було здійснено моделювання роботи системи електропостачання з дослідженням гармонійних складових і будови спектру гармонік.

Ключові слова: електрична мережа, гармонічні складові, несиметрія, якість електричної енергії, гармонійні коливання, випрямляч, спектр, пасивний фільтр, активний фільтр, моделювання, математична модель

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1 ОГЛЯД ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	9
1.1 Основні компоненти та принципи роботи електричних мереж	9
1.2 Перспективи розвитку електричних мереж	12
1.3 Гармонічні складові струму і напруги та їх вплив на роботу електричної мережі	14
2 ВПЛИВ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ СТРУМУ І НАПРУГИ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ	20
2.1 Методи управління та захисту від впливу гармонічних складових на роботу електричної мережі	20
2.2 Теоретичні основи впливу гармонічних коливань на параметри роботи електричної мережі	23
2.3 Визначення впливу роботи споживачів на появу несиметрії та якість електричної енергії	27
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ	32
3.1 Огляд роботи пристрою, що викликає виникнення гармонійних коливань	32
3.2 Розрахунок струмів та напруг гармонійних складових, що продукуються випрямлячем	34
4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ДОСЛІДЖЕННЯМ ГАРМОНІЙНИХ СКЛАДОВИХ	45
4.1 Принципи застосування методів моделювання для дослідження гармонійних коливань у електричній мережі	45
4.2 Складання моделі електричної мережі для дослідження спектру гармонік	46
ВИСНОВКИ	51

	6
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	52
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	56
ДОДАТОК Б. ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК	61
ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	77

ВСТУП

Проведення досліджень гармонічних складових струму і напруги та їх впливу на роботу електричних мереж є досить важливим для електроенергетики. Особливо, у контексті швидкого розвитку технологій, постійного зростання потреби в електричній енергії та впровадження нових типів електричного обладнання.

Поняття «гармонічні складові» означають періодичні відхилення значень струму і напруги від їх номінальних значень, що виникають через порушення нормальних режимів у електричних мережах і які можуть суттєво впливати на продуктивну роботу останніх. Виникнення гармонічних складових струмів і напруг призводять до підвищеного енергоспоживання, зниження ефективності роботи обладнання, виникнення перешкод для роботи засобів автоматизації та управління й інші негативні прояви.

Розвиток промислового виробництва та зростання вимог до параметрів стабільності та підвищення надійності роботи електричних мереж викликають необхідність глибокого розуміння проблем гармонічних складових, пошуку ефективних методів їх контролю та зменшення їх впливу на споживачі, що приєднано до мережі.

Наведені міркування вимагають здійснення комплексних наукових досліджень, що направлені на причину і характер виникнення гармонічних складових струму і напруги, оцінку їх впливу на роботу електричних мереж та розробку методів по їх нейтралізації.

Дана робота вимагає проведення теоретичних досліджень, основних принципів формування гармонічних складових, а також практичні рекомендації по зменшенню їх впливу на роботу електричних мереж і обладнання. Дану роботу рекомендується здійснювати шляхом застосування прикладного програмного забезпечення.

Мета роботи – здійснити дослідження впливу гармонічних складових на роботу електричної мережі.

Завдання роботи:

- здійснити огляд основних компонентів та принципів роботи електричних мереж,
- здійснити огляд гармонічні складові струму і напруги та їх вплив на роботу електричної мережі,
- визначити методи управління та захисту від впливу гармонічних складових на роботу електричної мережі,
- здійснити огляд теоретичних основ впливу гармонічних коливань на параметри роботи електричної мережі,
- дослідити вплив роботи споживачів на появу несиметрії та якість електричної енергії,
- розрахувати струми і напруги гармонійних складових, що продукуються,
- здійснити моделювання роботи системи електропостачання з дослідженням гармонійних складових.

Об’єкт досліджень – електричні мережі змінного струму.

Предмет досліджень – спектр гармонійних коливань у електричній мережі.

1 ОГЛЯД ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

1.1 Основні компоненти та принципи роботи електричних мереж

Основною ознакою електричних мереж є, здебільшого, їх складна структура, яка складається із засобів, що здійснюють генерацію, передачу та розподіл електричної енергії та містять різноманітні компоненти, що виконують різноманітні функції. Первинними елементами електропостачального ланцюга виступають генератори – машини, що перетворюють механічну енергію обертання турбіни на електричну. Генератори встановлюють на електричних станціях, де енергія води, вітру, пару або ядерного розщеплення використовується для створення обертального руху турбін, які в свою чергу індукують електричний струм. Отримана електрична енергія у вигляді струму подається на підвищуючі трансформатори, які підвищують значення напруги для подальшої передачі по високовольтних лініях електропередачі [1].

Лінії електропередачі можуть простягатися на сотні або тисячі кілометрів і вважається критичною інфраструктурою по доставці електричної енергії до споживачів. При досягненні місця призначення, напруга знижується завдяки понижуючому трансформатору перед її подачею до місцевих розподільчих мереж. Ця остання мережа складається з розподільчих трансформаторів, ліній та ліній, що розподіляють електричний струм по окремим споживачам [1].

На завершальному етапі електрична енергія потрапляє до кінцевих споживачів, які використовують її для різноманітних потреб: освітлення, опалення, для роботи електронних пристроїв і промислового обладнання (рис. 1.1) [2].

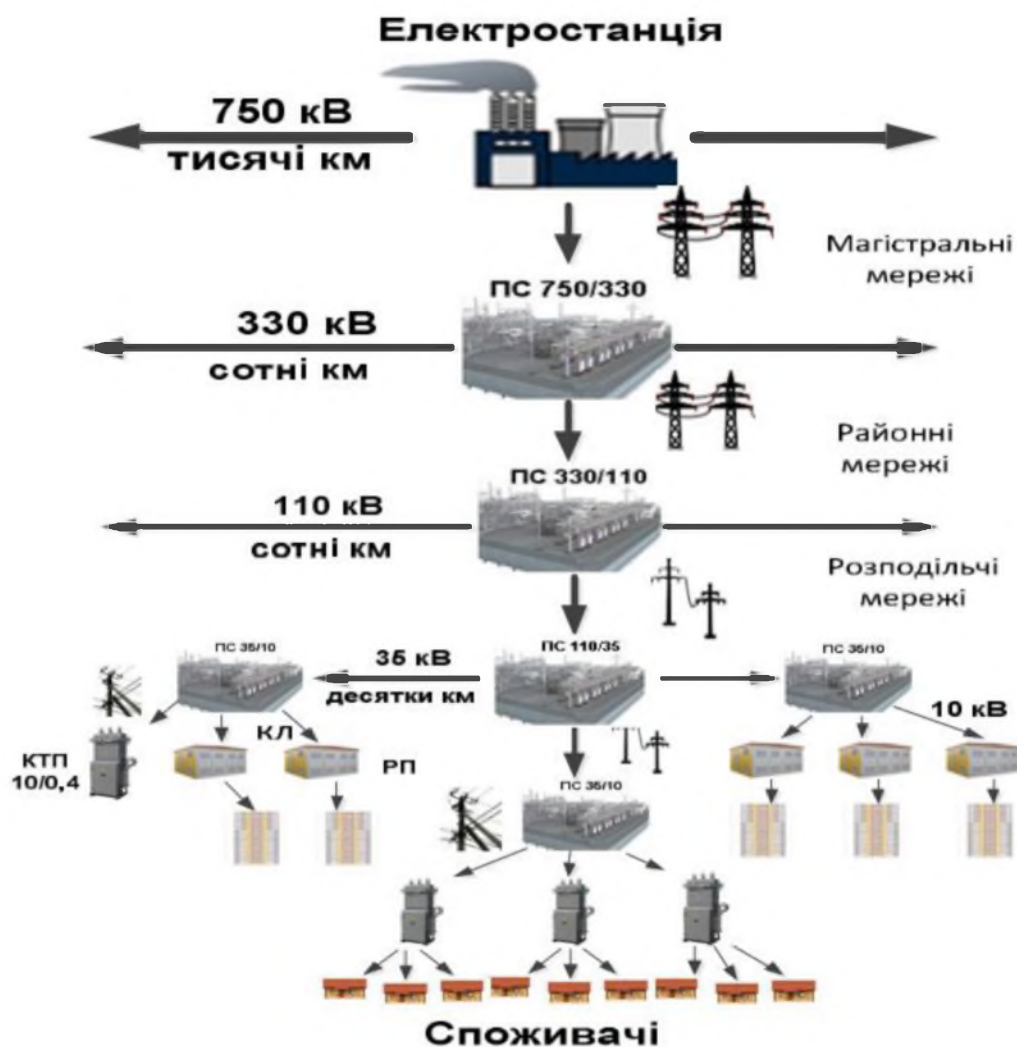


Рисунок 1.1 – Топологія електричної системи [2]

Електричні мережі є одним з найважливіших елементів електропостачання, а найважливішим аспектом функціонування даних мереж є їх надійність. Різка зміна погодних умови та технічні збої можуть поставити під загрозу стабільність постачання електричною енергією. З огляду на це, системи електропостачання повинні бути не лише ефективними, але й надійними та здатними витримати різноманітні аварійні стани та відновлюватися після таких подій [3].

Незважаючи на різноманітні виклики, електричні мережі продовжують розвиватися, еволюціонувати та удосконалюватися, стають все більш інтелектуальними, ефективними та надійними.

Електрична мережа — це складна система, що має на меті ефективну генерацію, передачу та розподіл електроенергії до кінцевих споживачів. Ця система базується на ряді фундаментальних електроенергетичних принципів. Процес генерації електричної енергії на електричних станціях відбувається у генераторах, що працюють на основі закону електромагнітної індукції. Отримана енергія зазвичай є трифазною, що дозволяє ефективніше передавати енергію на великі відстані і зменшує її втрати [4].

Для передачі електричної енергії на значні відстані використовують високовольні лінії. Втрати енергії в лініях її передачі пропорційні квадрату струму, що по них протікає, і їх можна мінімізувати, зменшуючи величину струму, а для підтримки значення потужності, що передається, завдяки трансформаторам здійснюють підвищення напруги при зниженні величини струму. Останнім елементом є використання електричної енергії споживачами. І тут важливими поняттями є активна та реактивна потужність. Активна потужність – це енергія, яка реально витрачається на виконання роботи, а реактивна потужність потрібна для створення магнітного поля в нелінійних навантаженнях. Комбінація цих двох складових утворюють повну потужність системи. Розуміння цих принципів допомагає здійснювати глибокий аналіз роботи електричних мереж та виявляти шляхи по їх удосконаленню [4].

Ефективне керування параметрами електричної потужності є важливим аспектом експлуатації електричних мереж. Надмірне значення реактивної потужності може призвести до зайвих втрат та небажаного нагрівання елементів обладнання.

Важливою складовою є регулювання частоти напруги живлення. Більшість синхронних генераторів на електростанціях працює на стандартній частоті 50 Гц і у мережі дана величина повинна підтримуватися на цьому рівні – відхилення частоти можуть вказувати на дисбаланс між виробництвом і споживанням електричної енергії.

Для безперебійної і надійної роботи електричних мереж необхідно забезпечувати засобами захисту (автоматичні вимикачі та релейні апарати) та резервного живлення. Системи захисту повинні реагувати на виникнення коротких замикання або перевантаження в мережі, а резервні джерела живлення можуть забезпечити живлення в разі відмови основного джерела [4].

Отже, принципи роботи електричних мереж охоплюють широкий спектр принципів і факторів, від фізичних законів, які лежать в основі генерації та передачі електроенергії, до складних систем керування, які забезпечують надійність і стабільність постачання електричною енергією.

1.2 Перспективи розвитку електричних мереж

Конструкції та схеми сучасних електричних мереж стикаються з численними зовнішніми та внутрішніми впливами, вимагають здійснення адаптаційних дій до нових умов та впровадження новітніх наукових та технологічних досягнень. При цьому необхідно вирішити основні проблеми підвищення ефективності, надійності та безпеки під час експлуатації електричних мереж.

Під ефективністю розуміють потребу зменшення втрат енергії на всіх етапах її передачі та розподілу, починаючи від генерації до кінцевого споживання, шляхом здійснення оптимізації зазначених процесів.

Надійність роботи мереж полягає в забезпеченні стабільності постачання енергії до споживачів. Збої у роботі мережі можуть призвести до серйозних наслідків, починаючи від завдання «незручностей» для окремих споживачів через переривання живлення до катастрофічних відключень у промисловості [5].

Під безпекою електричних мереж розуміють питанням, що враховують витoki струму, короткі замикання та інші небезпеки, які можуть викликати важкі наслідки, включаючи травми, вибухи, пожежі та інше.

Одним із способів вирішення зазначених проблем є впровадження розумних електричних мереж, які отримали загальноприйняту назву «Smart Grid». Відмінною рисою цих мереж є використання цифрової технології моніторингу та управління транспортуванням і розподілом електричної енергії від місць її виробництва до кінцевих споживачів. Задані системи дозволяють здійснювати широку інтеграцію популярних на сьогодні відновлюваних джерел енергії (рис. 1.2) [6].



Рисунок 1.2 – Система інтелектуальних мереж «Smart Grid» [6]

Впровадження «розумних мереж» дозволяє реалізувати новітні концепції з покращення взаємодії споживачів, кількісних показників встановленої та спожитої енергії та іншого. У разі наявності розподільних джерел енергії у споживачів, останні можуть одночасно виступати і виробниками і споживачами енергії [7].

Застосування цифрових технологій при здійсненні моніторингу роботи електричних мереж відкриває нові можливості для використання принципів штучного нейронних мереж з метою оптимізації роботи других. Створені системи дозволяють прогнозувати попит на електричну енергію, виявляти аварійні режими та наявні недоліки при роботі мережі, що в кінцевому випадку покращує їх надійність та ефективність [7].

Однією з проблемних питань експлуатації електричних мереж є виникнення пікових навантажень. Використання «розумних мереж» дозволяє використовувати передові технології керування навантаженням, ефективно розподіляти навантаження в електричній мережі, знижуючи піки та покращуючи ефективність використання енергії.

У цілому, розвиток та модернізація електричних мереж – це складний процес, який потребує значних інвестицій, здійснення глибоких наукових досліджень та широкого використання статистичних даних. Перспективи функціонування сучасних електричних мереж дозволяють ефективно впроваджувати нові технології, матеріали, системи та засоби, які дозволяють досягти більшої ефективності, надійності та безпеки систем, що розглядаються.

1.3 Гармонічні складові струму і напруги та їх вплив на роботу електричної мережі

Сучасні електричні мережі мають значну кількість нелінійних споживачів, що викликають явище, відоме як гармонічні складові струму та напруги.

Гармоніки – це сигнали, частота яких є ціло-кратною до основної частоти мережі. Наприклад, друга гармоніка має частоту вдвічі вищу, ніж основна, третя гармоніка – утричі вищу і так далі. Нелінійні елементи

мережі можуть бути представлені пристроями, які побудовані на основі електронних перемикачів, дроселями, трансформаторами, електричними двигунами і т.п., які можуть виробляти зазначені гармоніки (рис. 1.3) [8].

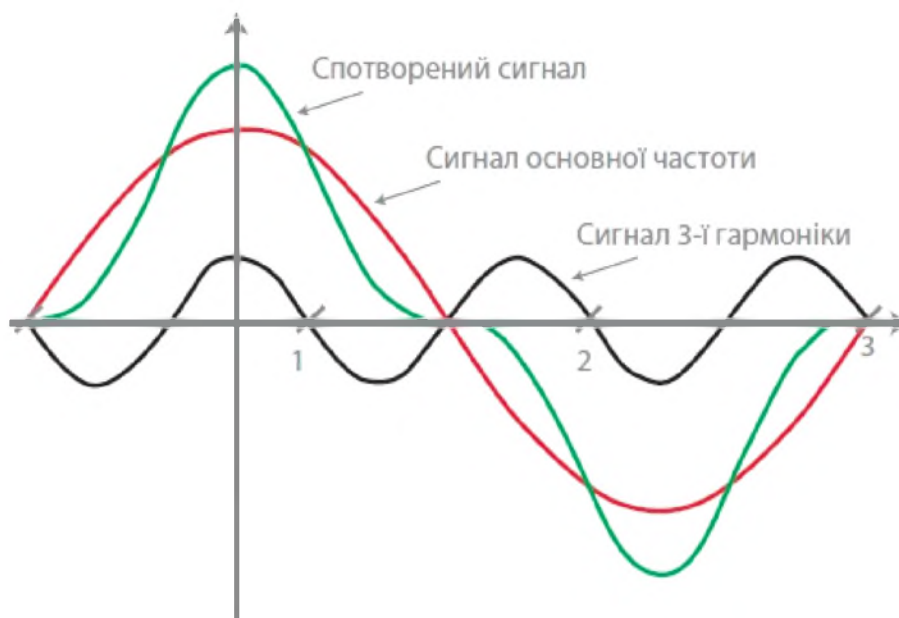


Рисунок 1.3 – Ілюстрація гармонійної складової у електричній мережі [8]

Гармонічні складові можуть викликати відчутний негативний вплив на роботу електричних мереж та споживачів, що приєднано до них. Серед негативних факторів можна відзначити [9]:

- перевантаження та прискорене старіння електроенергетичного обладнання,
- збільшення втрат енергії,
- помилки у роботі захисних пристроїв та систем автоматики,
- викривлення форми кривих струмів і напруг.

Особливої уваги заслуговує третя гармоніка, що виникає через роботу пристроїв з однофазними перемикачами, які здатні до сумування в нейтральному проводі (при його наявності), викликаючи значні додаткові навантаження.

Наявність гармонійних складових вимагає використання спеціальних методів їх виявлення та застосування пристроїв для їх компенсації.

Серед методів визначення наявності гармонійних складових струму і напруги можна виділити [10]:

- спектральний аналіз, який виконують за допомогою перетворення Фур'є, який дозволяє визначити гармонійні складові відносно основної частоти та їх амплітуди,
- використання спеціального обладнання, яке здатне вимірювати напругу та струм у різних точках мережі. Ці пристрої, зазвичай, мають вбудований аналізатор гармонік, який може у деталях відобразити гармонійну структуру сигналу,
- цифрові методи, які передбачають цифрову обробку сигналів у реальному часі, що є високопридатними для подальшого ретельного аналізу.

Пристрої для компенсації гармонійних складових струмів і напруг відіграють важливу роль у сучасних електричних мережах. Вони використовуються для зниження впливу гармонійних спотворень, які можуть викликати проблеми в роботі електричних приладів і знижувати ефективність енергосистеми. Серед цих пристроїв можна відзначити (рис. 1.4) [11]:

- гармонійні фільтри, що містять активні частини, складені на основі електронних компонентів, що створюють «антигармоніки», які протидіють небажаним гармонікам; та пасивні частини, які використовують у своїй конструкції індуктивні та ємнісні елементи для створення резонансу на певних частотах, знижуючи гармонічні спотворення,
- активні фільтри, що зазвичай є більш гнучкими та можуть компенсувати широкий спектр гармонік, є більш складними в обслуговуванні і дорожчі,
- пасивні фільтри, що є менш гнучкими, але є простішими в експлуатації та дешевшими.

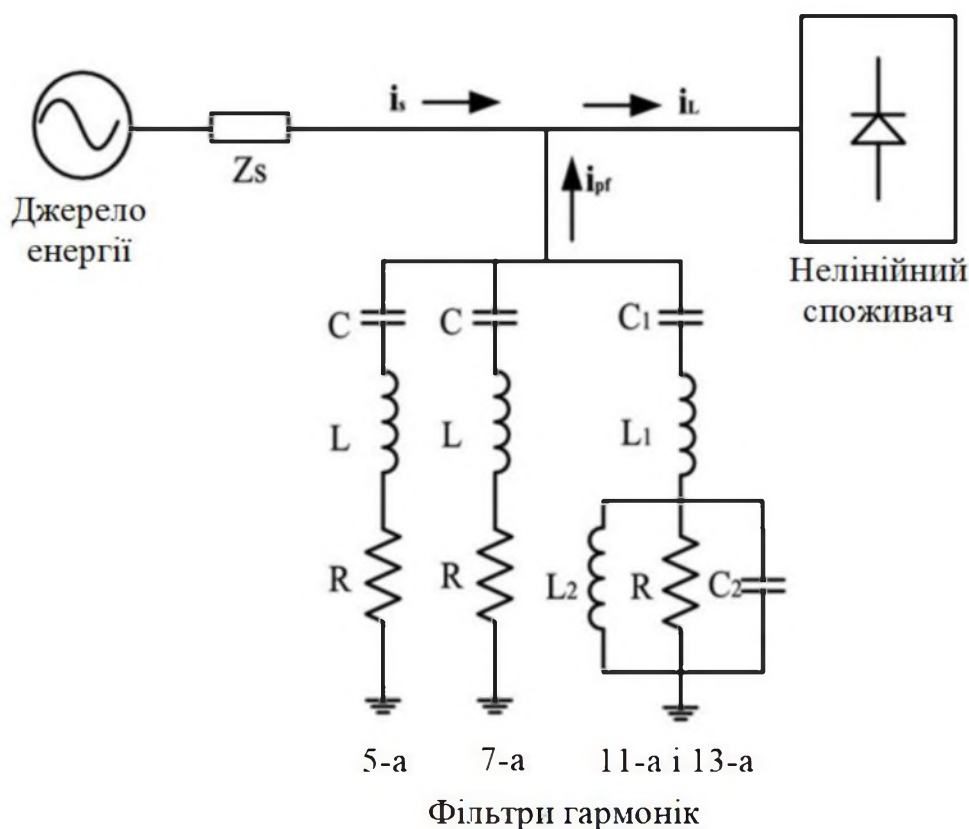


Рисунок 1.4 – Компенсація гармонійних коливань у електричному ланцюзі за допомогою фільтруючих елементів [11]

Без належного ступеня компенсації гармонійних складових виникають проблеми з якістю електричної енергії, що може призвести до збоїв при роботі обладнання і непродуктивних втрат енергії.

У цілому, явище гармонік є важливим аспектом, який варто враховувати при проектуванні та експлуатації сучасних електричних мереж. Використання передових методів діагностики та управління гармонійними коливаннями може значно покращити надійність та ефективність роботи електричних мереж, зменшити втрати енергії та збільшити термін служби електричного обладнання.

Нелінійні властивості мереж та їх вплив на гармонічні складові можна мінімізувати за допомогою правильного проектування, зокрема:

- використовувати багатофазні системи,
- балансувати навантаження між фазами,

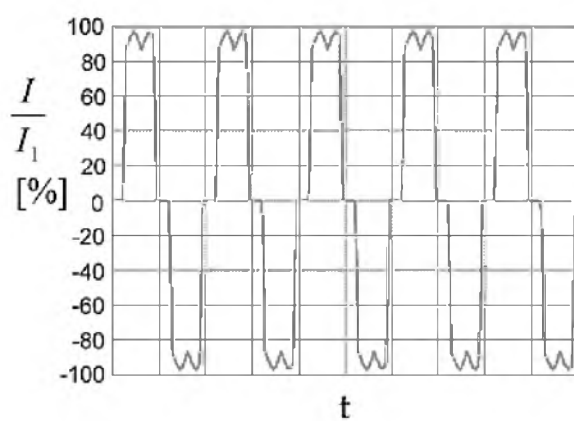
- використовувати спеціальне обладнання для фільтрації гармонік,
- розробляти та застосовувати спеціальні методики керування для зменшення генерації гармонік.

Для упорядкування цього питання існує низка стандартів та рекомендацій, які на правовому рівні регулюють допустимі рівні гармонічних складових у мережах. Зазначене дозволяє забезпечити безпечну та ефективну роботу обладнання і привести у відповідність його роботу нормам якості електричної енергії та вимогам електричної безпеки.

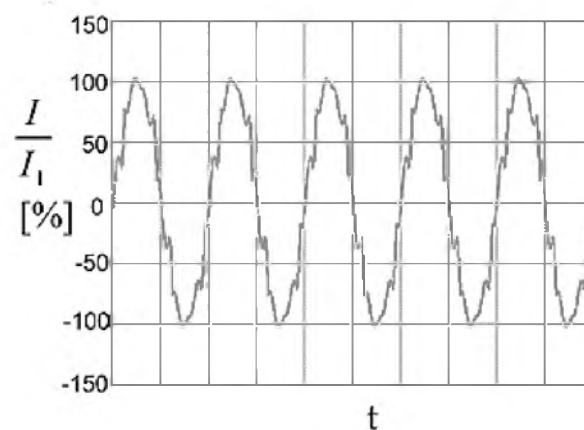
Результатом небажаних високочастотних гармонік, особливо вищих порядків, можуть бути (рис. 1.5, 1.6) [12]:

- проблеми для роботи радіо- та телекомунікаційного обладнання через виникнення електромагнітних перешкод та погіршення електромагнітної сумісності,
- погіршення стабільності та ефективності роботи електричних мереж,
- перегрівання компонентів обладнання,
- збільшення частоти відмов та збоїв, а також прискорене старіння елементів,
- відхилення від номінальних значень напруги і струму, внаслідок чого робота обладнання стає менш ефективною,
- поява резонансу у системі, що призводить до додаткових втрат енергії, а у крайніх випадках – до аварій,
- некоректна робота вимірювального та захисного обладнання, що спотворює отримані дані.

З огляду на зазначене, контроль та фільтрація гармонійних складових в електричних мережах має одне з вирішальних значень для забезпечення їх надійної і ефективної роботи. А розробка нових технологій та методів управління для оптимізації роботи електричних мереж та зменшення впливу гармонік є одним з важливих напрямків сучасних досліджень в галузі електроенергетики.

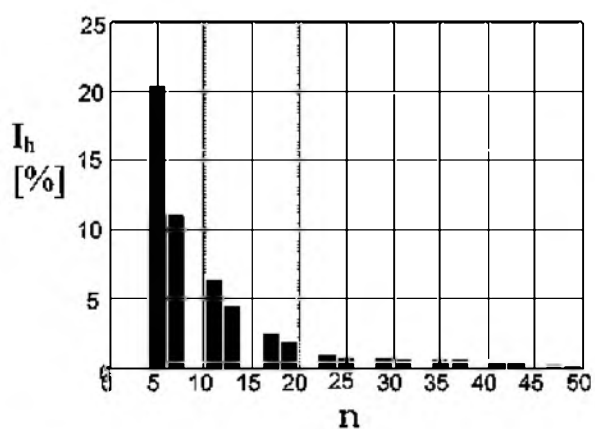


a)

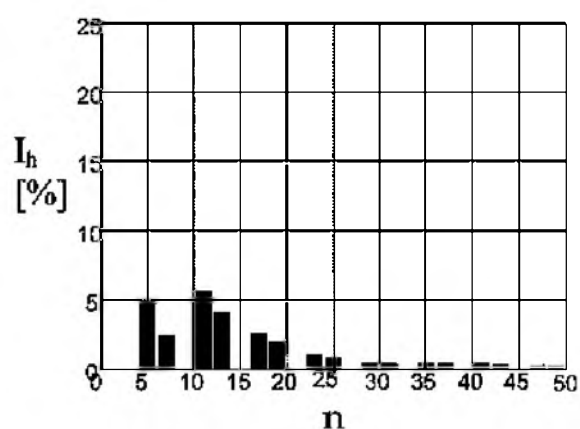


б)

Рисунок 1.5 – Осцилограми струму до (а) та після (б) підключення фільтрів [12]



a)



б)

Рисунок 1.6 – Спектри струму (а) та після (б) підключення фільтрів [12]

2 ВПЛИВ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ СТРУМУ І НАПРУГИ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

2.1 Методи управління та захисту від впливу гармонічних складових на роботу електричної мережі

У електричній мережі усі компоненти взаємодіють між собою та створюють цілісний механізм перетворення, передачі та споживання електричної енергії. При вивченні впливу гармонічних складових струму і напруги на роботу електричної мережі необхідно враховувати взаємодію всіх елементів мережі тому, що вплив гармонік може бути різним та мати різні наслідки для різних її компонентів. Такий підхід передбачає необхідність розробки різноманітних розвинених рішень керування та захисту від негативного впливу гармонійних коливань [13].

Ефективне керування продукуванням гармонік є необхідною умовою не тільки для визначення їх наявності та кількісної оцінки, але і для розуміння їх взаємодії з іншими впливаючими факторами. Такий аналіз може бути органічно вбудований у загальну систему моніторингу і управління якістю електричної енергії. Системний підхід дозволяє враховувати вплив гармонік на різні аспекти роботи електричної мережі та розробляти ефективні стратегії для їх контролю та управління. Врахування цього дозволяє збільшити ефективність таких заходів та забезпечити стабільність і надійність роботи мережі в умовах присутності гармонічних складових. Управління та захист електричних мереж є важливою складовою їх ефективною та безпечною роботи. Ці дії можуть бути реалізовані завдяки сучасним технологічним розробкам у сфері інформаційних систем та засобів релейного захисту і автоматики. Завдяки своїй швидкодії та своєчасному реагуванню на зміни в режимах роботи мережі, вони дозволяють запобігти виникненню аварійних ситуацій та мінімізувати наслідки таких подій [13].

Методи управління електричними мережами можна поділити на дві великі групи [13]:

- методи оперативного управління, що базуються на постійному або періодичному нагляді за поточним станом мережі: управлінням режимами засобів генерації, переключеннями, регулюванням величини навантаження і т.п.

- методи планування, що зосереджуються на довгострокових стратегіях оптимізації роботи мережі з огляду планування об'ємів виробництва та споживання енергії, впровадження нових генеруючих потужностей, огляд питань модернізації обладнання і т.п.

Захист електричних мереж полягає у застосуванні систем, роботи яких спрямована на виявлення та недопущення несправностей і відмов під час виробничої експлуатації. Серед режимів, на які повинні реагувати системи захисту, можна виділити: короткі замикання ланцюгів, перевантаження, зростання або падіння понад припустимих меж значення напруги, надмірне підвищення температури й інші. Зам захист полягає в автоматичному відключенні пошкоджених ділянок мережі з можливістю або заборону автоматичного відновлення після відключення.

Завдяки більш широкому впровадженню штучних нейронних мереж і способів машинного навчання, сучасні системи управління та захисту електричних мереж можуть бути переналаштовані на повну автоматичну роботу з періодичним контролем їх стану. Для ефективної реалізації зазначеного можуть бути використані алгоритми оптимізації та моделі, робота яких базується на аналізі великого обсягу статистичних даних. Це дозволяє виявляти аномалії, передбачати виникнення проблем, виконати автоматичні дії для запобігання аварійним станам та оптимізувати роботу мережі з метою забезпечення максимальної надійності та ефективності.

Функції контролю у таких системах можуть бути покладені на засоби телемеханізації та автоматизації, засоби забезпечення комунікації та збирання оперативних даних у різних точках електричної мережі.

Зазначені функції дозволять операторам електричних мереж отримати реальну поточну інформацію про стан електричної мережі й швидко реагувати на наявні зміни та виконувати необхідні керуючі дії. У загальному розумінні, методи управління та захисту в електричних мережах не повинні «застигати», а повинні постійно розвиватися, забезпечуючи високий ступінь надійності, ефективності електричних перетворень та безпеку роботи мереж [14].

Вплив гармонічних складових у електричних мережах при їх наявності може бути зменшений шляхом використання спеціальних пристроїв. Перед цим корисним є застосування принципів, що реалізують безперервний моніторинг стану електричної мережі, що може визначити зміну гармонічних складових струму і напруги, які зазнають змін у залежності від різноманітних чинників (коливання величини напруги під дією різних факторів, зміна споживання, підключення та від'єднання нелінійних навантажень й інше).

Для здійснення безперервного моніторингу наявності та рівня гармонічних складових струму і напруги можна застосувати різні системи автоматичного моніторингу, завданням яких є вимірювання та аналіз рівня гармонік у реальному часі. Зазначені системи зазвичай містять спеціальні прилади – гармонічні аналізатори, що здатні вимірювати амплітуду, фазовий кут та складати спектральну картину гармонік у мережі. Так системи, у залежності від масштабу та вартості, мають змогу працювати як в автоматичному, так і в ручному режимі контролю параметрів. Дані системи в останніх модифікаціях вимагають розробки та використанні спеціалізованого програмного забезпечення, функції якого як раз і полягають у збиранні, аналізі та візуалізації зібраних даних. Означене дозволяє операторам електричних мереж у реальному часі отримати поточні звіти про рівень гармонійних складових та вжити необхідних заходів для їх зменшення [15].

2.2 Теоретичні основи впливу гармонічних коливань на параметри роботи електричної мережі

Електрична енергія, а саме – її параметри: струми, напруги та їх частота, через наявність нелінійних споживачів, може включати додаткові частотні впливи в своєму спектрі. Ці частотні спотворення змінюють форму вихідного сигналу зазначених параметрів і призводить до деформації синусоїдних форм кривої напруги та струму – у результаті додавання цих частотних компонентів. Наприклад, миттєве значення струму може бути представлено залежністю [16]:

$$i(t) = i_{oc}(t) + \sum i_{zap.}(t) \quad (2.1)$$

де $i_{oc}(t)$ – струм на основній частоті мережі, А,

$\sum i_{zap.}(t)$ – сума струмів вищих гармонік, А.

Зазначене призводить до модуляції сигналу і таким чином спотворює синусоїду форму кривої струму (рис. 2.1).

Якщо в мережі спостерігаються гармонійні коливання напруги з амплітудою U частотою f , то миттєві значення напруги визначаються за наступною формулою, [16]:

$$\begin{aligned} i(t) &= A_0 \cdot \left[\sin \omega_{oe} t + \frac{k_{mod.}}{2} (\cos(\omega_{oe} - \omega_{zap.})t - \cos(\omega_{oe} + \omega_{zap.})t) \right] = \\ &= A_0 \cdot (1 + k_{mod.} \sin \omega_{zap.} t) \cdot \sin \omega_{oe} t \end{aligned} \quad (2.1)$$

де A_0 – середнє значення охоплюючої амплітудних значень струмів за період, що визначається значенням частоти гармоніки, що розглядається [16]:

$$A_0 = 1 / f_{\text{гар}}, \quad (2.1)$$

де $f_{\text{гар}}$ – частота гармоніки, що спотворює форму струму, Гц.

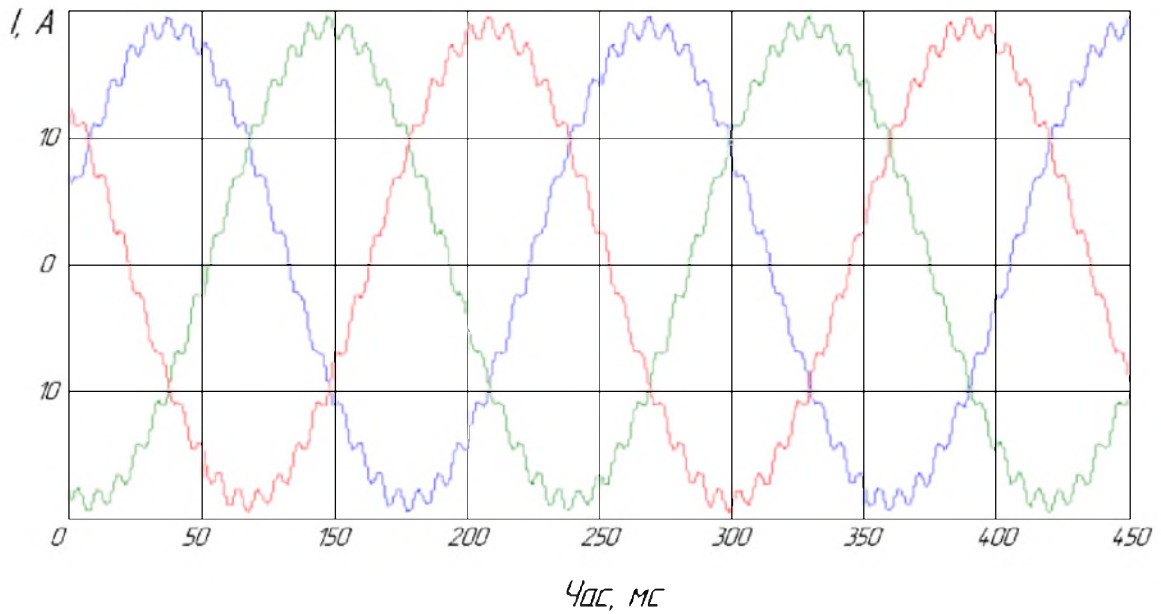


Рисунок 2.1 – Карина викривлення струмів у фазах при наявності гармонік у електричному ланцюзі

$\omega_{\text{ог}}$ – циклічна частота основної гармоніки [16]:

$$\omega_{\text{ог}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{ог}}, \quad (2.1)$$

де $f_{\text{ог}}$ – частота основної гармоніки, Гц.

$k_{\text{мод}}$ – коефіцієнт модуляції [16]:

$$k_M = \frac{\Delta i}{\sqrt{2} \cdot A_0}, \quad (2.1)$$

де Δi – приріст величини струму, А,

$\omega_{\text{гар}}$ – циклічна частота зміни відхилення струму під дією гармоніки [16]:

$$\omega_{zap} = 2 \cdot \pi \cdot f_{zap} \quad (2.1)$$

Данні теоретичні міркування пояснюють викривлення форми кривої струму при наявності гармоніки.

Гармонійна частота може бути не одною – їх може бути кілька, що зображується розподілом амплітудних спектрів гармонік, відмінних від основної частоти (рис. 2.2).

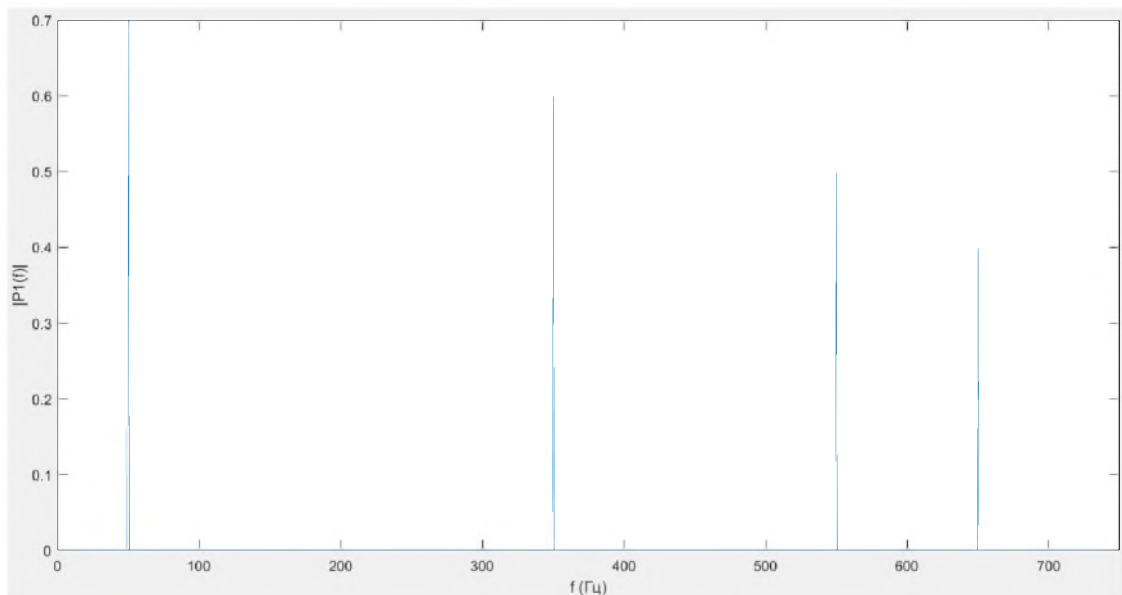


Рисунок 2.2 – Спектр розподілу частот у електричній мережі: основна частота 50 Гц, додатково маємо 7, 11 і 13 гармоніку

Наявність періодичних відхилень призводить до виникнення паразитної модуляції та появи додаткових спектральних складових на частотах, близьких до основної гармоніки. Розподільна мережа може містити різноманітні елементи, що мають нелінійний характер, споживати або продукувати реактивну потужність і тому робота даних елементів залежить від частоти мережі. У системах електропостачання досить суттєвим є вплив обладнання на якість електричної енергії, що виражається у продукуванні вищі гармонік від роботи цього обладнання [17].

Газорозрядні лампи та флуоресцентні освітлювальні прилади характеризуються різкою нелінійною характеристикою та здатні генерувати до мережі реактивну потужність та істотні гармонійні коливання вищих порядків (рис. 2.3) [17].

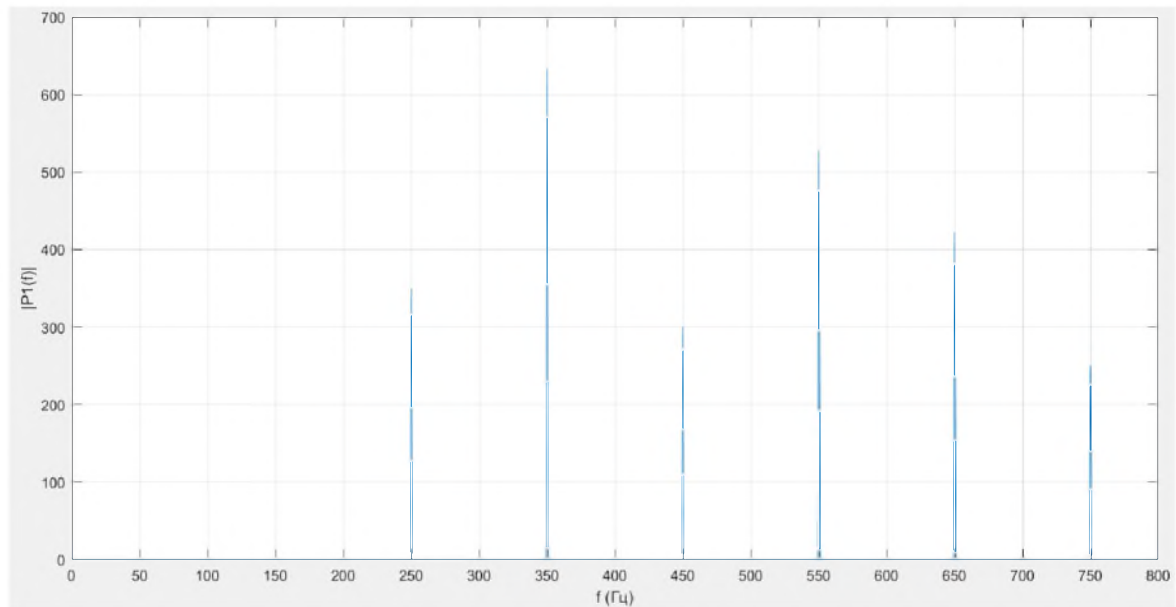


Рисунок 2.3 – Спектр розподілу частот у електричній мережі від роботи газорозрядних ламп та флуоресцентних освітлювальних приладів

Високий рівень непарних гармонік можна пояснити роботою напівпровідникового регулятора, який генерує зазначені гармоніки через його нелінійні властивості. Для можливостей регулювання освітлювального навантаження частіше за інші способи використовують тиристорні регулятори потужності.

При роботі асинхронних двигунів також можуть бути виплески гармонійних коливань через наявність магнітного поля, що обертається. Кількість гармонійних виплесків залежить від числа пар полюсів – основних (реальних) і тимчасових (віртуальних).

Кількість і амплітуда тимчасових гармонік асинхронних двигунів визначається гармонійним вмістом магніторушійної сили та частоти обертання двигуна. Виникнення гармонік може бути пояснено

електричний небаланс через наявність їх зв'язку з електричною несиметричністю обмотки ротора або статора. У роторі індукуються електрорушійна сила, яка обертається з частотою, що залежить від ковзання. Через незбалансованість ротора струми прямої і зворотної послідовності зміщуються, створюючи поля, що обертаються у прямому та зворотному напрямках. Частоти ЕРС статора, що індукуються такими полями, дорівнюють основній частоті (f) і з гармонійною частотою $f(1-2s)$. Взаємодія струмів двох зазначених частот до появи биття у двигуні, крім того, вважається, що асинхронні двигуни є споживачами струму вищих гармонік [17].

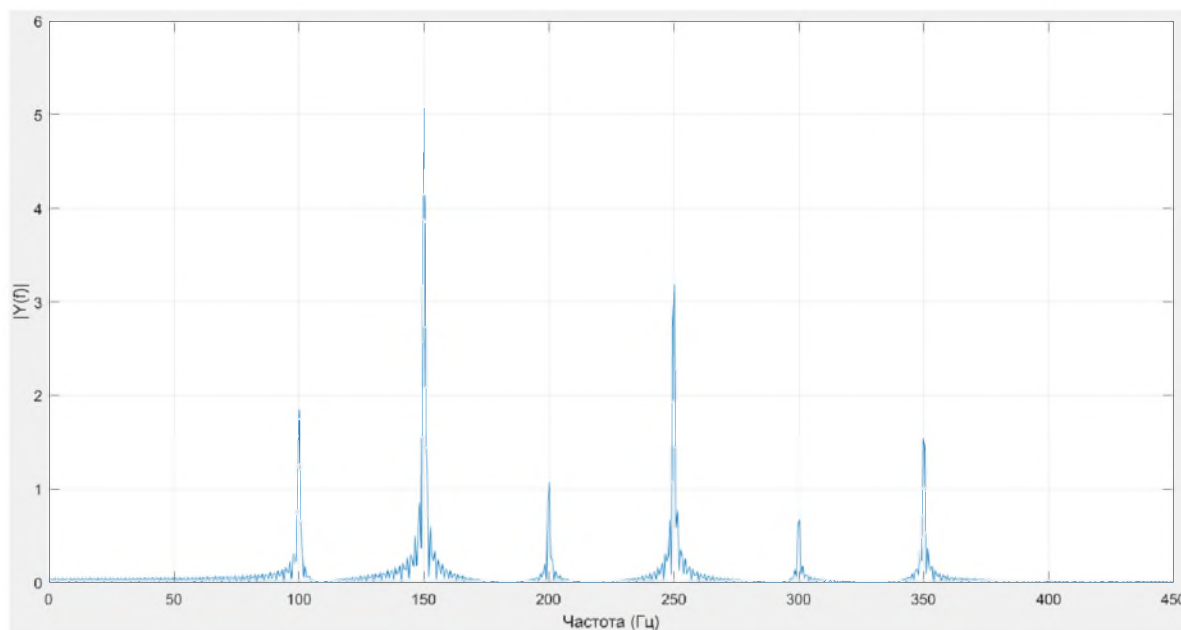


Рисунок 2.4 – Спектр розподілу частот асинхронних двигунів

2.3 Визначення впливу роботи споживачів на появу несиметрії та якість електричної енергії

Головною причиною наявності несиметрії струмів і напруг є нерівність навантажень по фазам, при цьому розрізняють систематичну та

ймовірнісну несиметрію. При систематичній несиметрії вирівнювання навантажень між фазами здійснюють шляхом перемикавання навантажень між фазами. Ймовірнісна несиметрія може бути схарактеризована поперемінним перевантаженням то однієї, то іншої фази. У високовольтних мережах несиметрія напруг викликається наявністю потужних однофазних навантажень (рис. 2.5) [18].

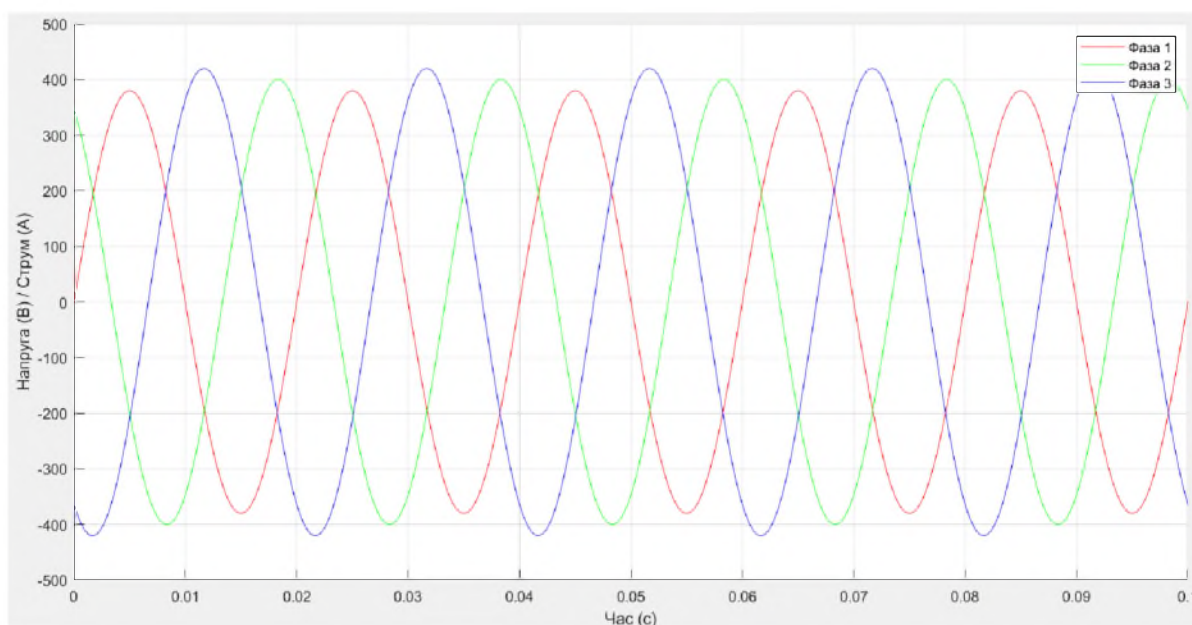


Рисунок 2.5 – Несиметрія напруг/струмів, викликаних наявністю потужних однофазних навантажень

Серед показників, що характеризують якість електричної енергії, можна виділити: відхилення напруги та частоти напруги, несинусоїдність та несиметрія напруг і струмів, електричні втрати. Погіршення якості електричної енергії призводить до додаткових втрат, які обмежуються значеннями, які зазначено у нормативній документації.

Державні стандарти встановлюють припустиме відхилення напруги на затискачах електроприймачів у межах $\pm 5\%$ при гранично-припустимих значеннях на рівні $\pm 10\%$ від номінального значення цієї напруги у мережі. Збільшення значення напруги призводить до зниження втрат напруги та збільшення втрат потужності, але при цьому скорочується термін служби

устаткування. Зниження напруги позначається на погіршенні продуктивності, збільшенні втрат напруги та зниженні втрат потужності [19].

Вплив відхилень напруги на величину споживання потужності характеризують за допомогою статичних характеристик лише на незначному проміжку, а у загальному випадку ці залежності є нелінійними. Вигляд статичної характеристики напруги може бути використана для визначення регулюючого ефекту навантаження, тобто зміну спожитої активної та реактивної потужності навантаження при зміні величини напруги. Так, при зниженні напруги регулюючий ефект навантаження сприяє підтримці напруги через зниження спожитої потужності, що у свою чергу призводить до втрат. Це вважається позитивним ефектом від впливу регулювання навантаження (рис. 2.6).

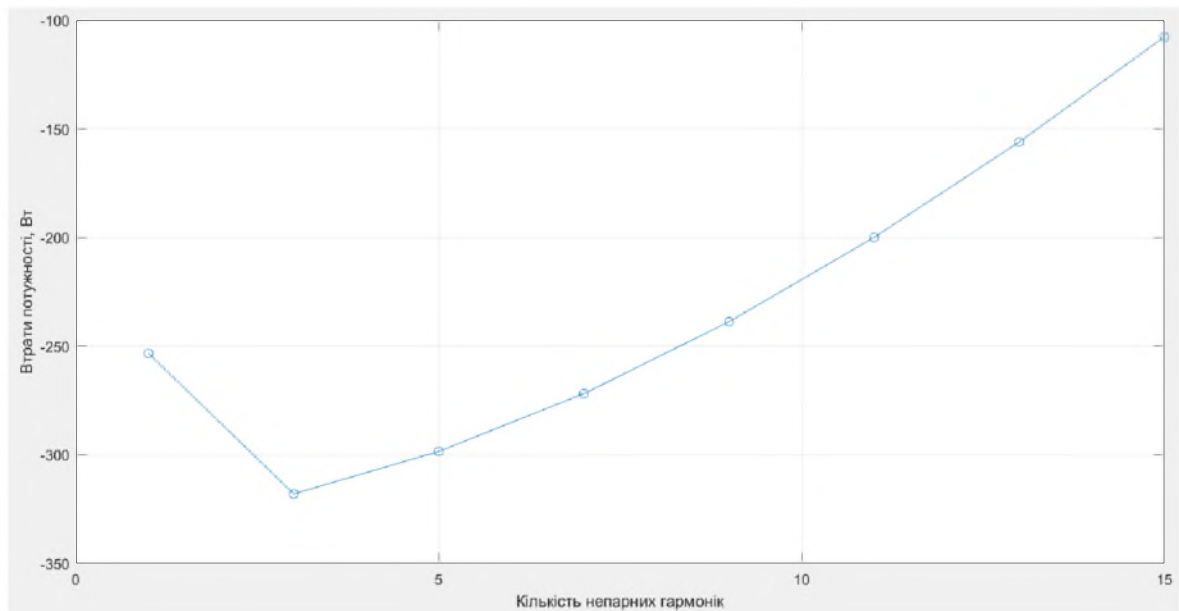


Рисунок 2.6 – Зміна втрат потужності при зростанні кількості непарних гармонік

Щоб визначити сутність та об'єм технологічних втрат у несинусоїдних та несиметричних режимах розглядають баланс потужності в системі. Споживачі, що спотворюють навантаження, споживають

енергію на основній частоті прямої послідовності і перетворює її частину на енергію спотворень, що здатна спродувати вищі гармоніками струму зі складовими зворотної та нульової послідовності та виплескує їх у мережу. Втрати від вищих гармонік можуть досягати 11% сумарних втрат потужності, причому найбільші втрати від гармонійних коливань в елементах електричних мереж виникають у резонансних режимах [20].

Несиметрія напруг призводить до збільшення втрат потужності, що обумовлено протіканням струмів зворотної та нульової послідовностей. Таким чином, для того щоб оцінити ефективність передачі та розподілу електричної енергії при погіршеній якості електроенергії необхідно враховувати додаткові втрати при виникненні гармонійних коливань. Несинусоїдність форми напруги впливає на роботу всіх споживачів через їх додаткове нагрівання від наявності вищих гармонік струму та від впливу складових прямої, зворотної та нульової послідовності через виникнення додаткового негативного впливу електромагнітних явищ. Вищі гармоніки напруги складаються з основною гармонікою та сприяють підвищенню діючого значення напруги на затискачах споживачів. Несиметрія напруги в електричних мережах підприємств обумовлена наявністю потужних однофазних навантажень, у якості яких виступають індукційні печі, зварювальні апарати; та трифазні, які працюють у несиметричному режимі, такі як дугові сталеплавильні печі [20].

Наявність вищих гармонік створюють додаткові втрати в споживачах електричної енергії, скорочують термін служби їх ізоляції, підвищує вірогідність виходу з ладу електричних апаратів, викликає збої у роботі систем захисту та автоматики. Іншим негативним моментом при наявності вищих гармонік є зниження значення коефіцієнта потужності, що викликає додаткові втрати активної енергії, що можуть сягати до 15% основних технічних втрат. Деякий опір проникненню струмам вищих гармонік створюють обмотки електричних машин, а сам опір тим більший, чим більшим є порядок гармонічного коливання.

Показники якості електричної енергії повинні задовольняти вимогам стандартів та нормам якості електричної енергії у системах електропостачання. При наявності відхилень показників якості від встановлених нормативних значень можуть виникати додаткові втрати енергії та зниження коефіцієнта корисної дії. Джерелами таких спотворень та причиною виникнення коливань напруги і несиметрії струмів та напруг й несинусоїдності є потужні електричні установки енергосистем.

Зазначене вимагає здійснення аналізу впливу коефіцієнтів гармонійних складових напруги та коефіцієнтів несиметрії напруги на величину втрат енергії в електроустановках. Дані втрати, що виникають в наслідок наявності вищих гармонік та несиметрії напруг знаходяться у квадратичній залежності від коефіцієнтів гармонійних складових та коефіцієнтів несиметрії. А для більш повного вирішення цих завдань можна впровадити автоматизовану інформаційно-вимірювальну систему, яка дозволяє здійснити моніторинг якості електропостачання.

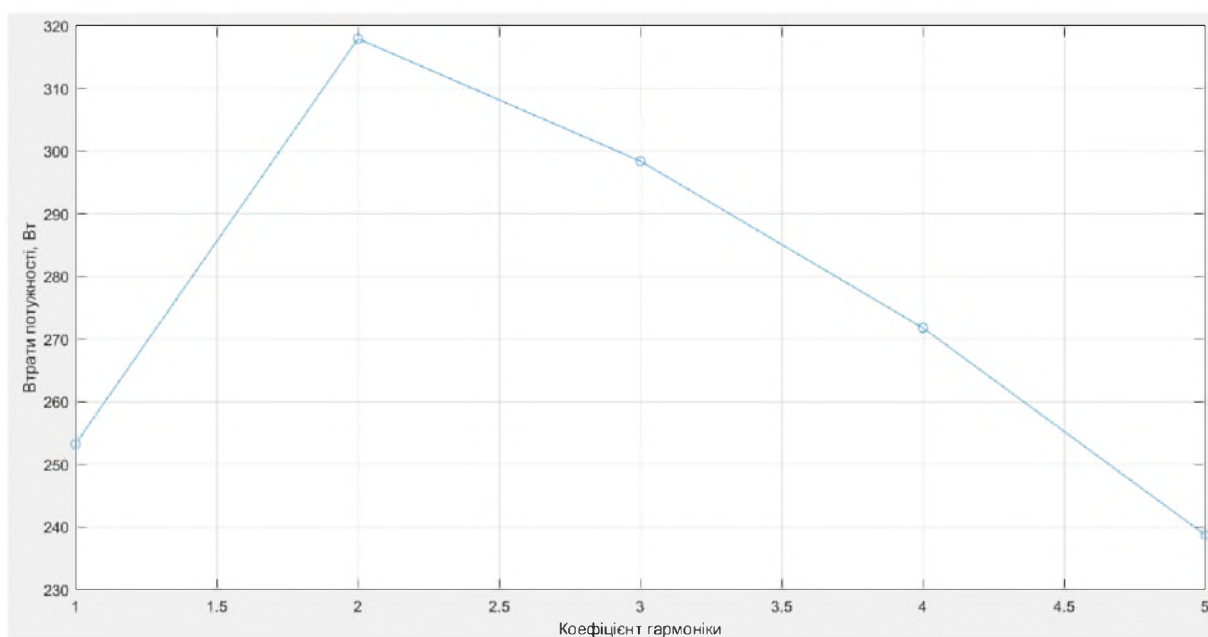


Рисунок 2.7 – Вплив коефіцієнтів гармонійних складових напруги на величину втрат енергії

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ

3.1 Огляд роботи пристрою, що викликає виникнення гармонійних коливань

У якості пристрою, що продукує гармонійні коливання, розглянемо трифазний мостовий випрямляч при активно-індуктивному навантаженні (рис. 3.1) [21].

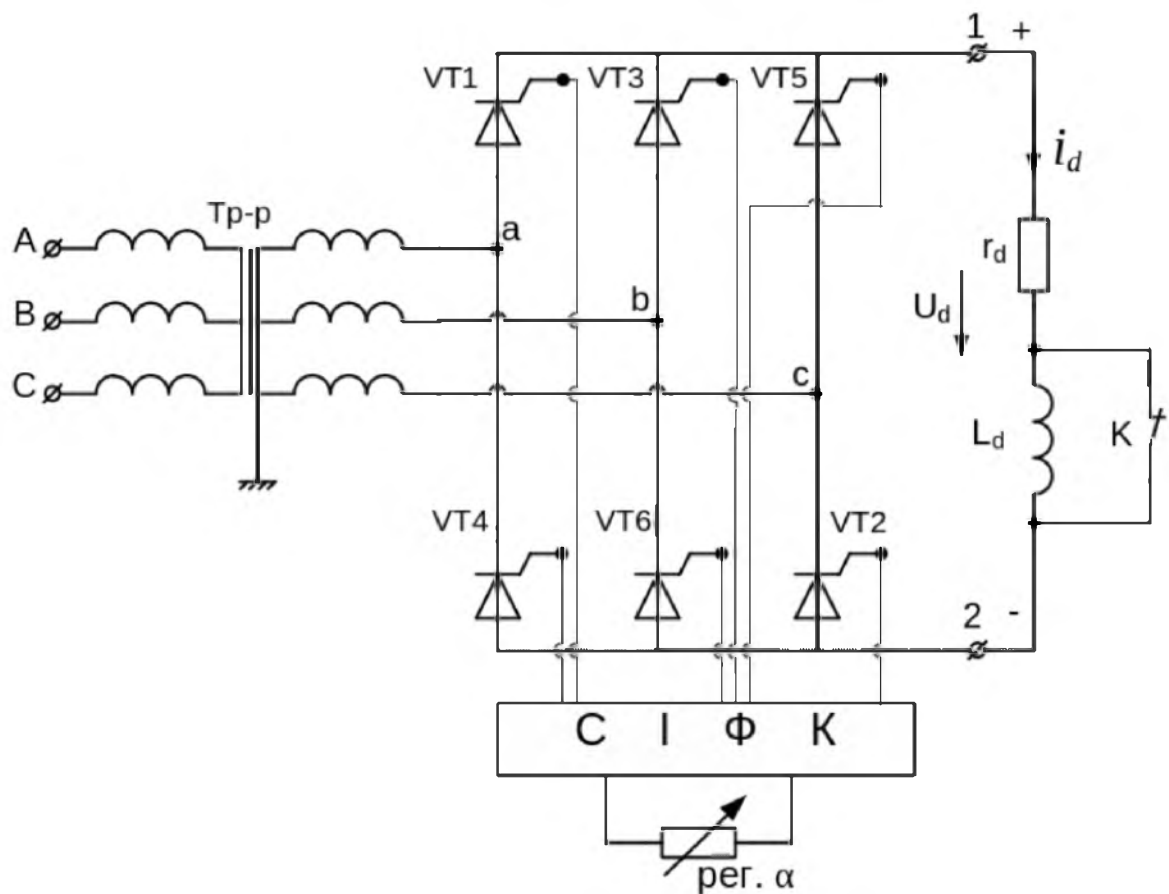


Рисунок 3.1 – Схема трифазного мостового керованого випрямляча при роботі на активно-індуктивне навантаження [21]

Часові діаграми роботи трифазного мостового керованого випрямляча наведено на рис. 3.2 [21].

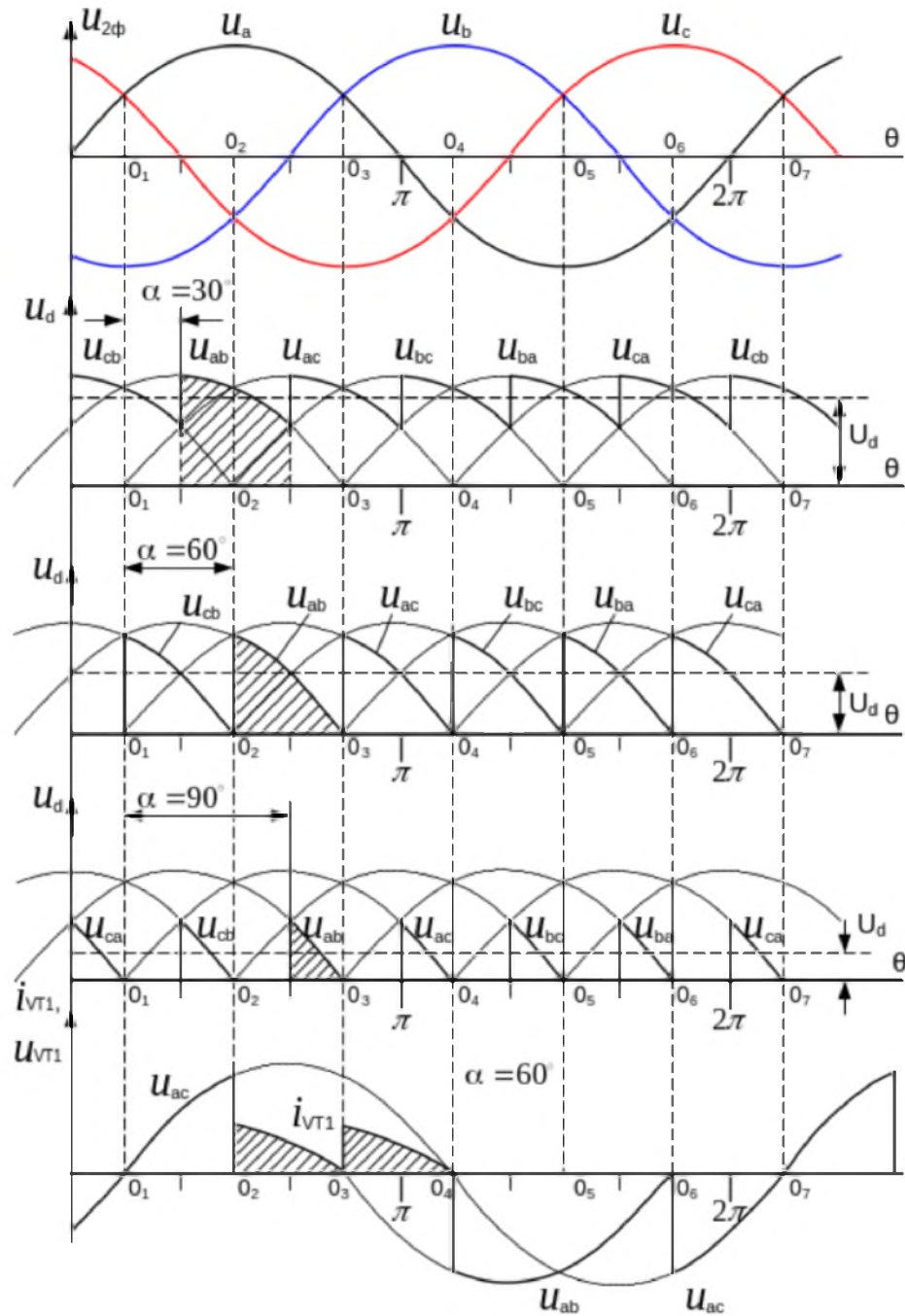


Рисунок 3.2 – Часові діаграми роботи трифазного мостового керованого випрямляча [21]

Момент вмикання кожного з тиристорів зсувається в бік запізнення відносно точок природної комутації на визначений кут α .

Наведена конструкція трифазного мостового керованого випрямляча з використанням тиристорів дозволяє перетворювати змінний трифазний струм у постійний. В основі роботи лежить принцип комутації тиристорів,

що керуються зовнішніми сигналами і при активно-індуктивному навантаженні, випрямляч забезпечує згладжування коливань струму та напруги. За рахунок комутації тиристорів, вихідний струм стає майже постійним, а максимальна величина випрямленої напруги збігається з максимальною величиною фазної напруги. Крім цього, система дозволяє змінювати величину випрямленої напруги, що дозволяє ефективно адаптуватися до вимог навантаження.

Особливістю роботи цього пристрою на таке навантаження є те, що струм через індуктивність, на відміну від напруги, не може змінюватись миттєво. Кут керування α відраховується від точок природного відмикання вентилів. Імпульси управління подаються на відповідні тиристори, режим роботи яких визначається значення напруги на аноді, що у даний момент часу має найбільше значення по відношенню до напруги на анодах інших напівпровідникових приладів.

3.2 Розрахунок струмів та напруг гармонійних складових, що продукуються випрямлячем

Перед розрахунком струмів та напруг гармонійних складових необхідно визначити вихідні параметри роботи випрямляча.

Значення номінального кута управління тиристором, град [22]:

$$\alpha_{ном} = \arccos(k_1 \cdot \cos \alpha_{кер.}) \quad (3.1)$$

де k_1 – коефіцієнт, що визначає нижню межу падіння напруги [22]:

$$k_1 = \frac{U_H - \Delta U}{U_H}, \quad (3.2)$$

де U_H – номінальна напруга мережі, $U_H = 660$ В,

ΔU – падіння напруги у живлячій мережі $\Delta U = 33$ В,

$$k_1 = \frac{660 - 33}{660} = 0,95,$$

$\alpha_{кер.}$ – мінімальне значення кута керування тиристором, $\alpha_{кер.} = 5^\circ$.

$$\alpha_{ном} = \arccos(0,95 \cdot \cos 5^\circ) = 23,07^\circ, \quad (3.3)$$

Значення максимального кута управління тиристором, град [22]:

$$\alpha_{max} = \arccos\left(\frac{k_1}{k_2} \cdot \cos \alpha_{кер.}\right) \quad (3.4)$$

де k_2 – коефіцієнт, що визначає верхню межу падіння напруги [22]:

$$k_2 = \frac{U_H + \Delta U}{U_H} = \frac{660 + 33}{660} = 1,05, \quad (3.5)$$

$$\alpha_{max} = \arccos\left(\frac{0,95}{1,05} \cdot \cos 5^\circ\right) = 27,75^\circ$$

Середнє значення випрямленого струму (в.о.) [22]:

$$I_{dp}^* = \sqrt{3} \cdot (\cos \alpha_{ном} - U_{dp}^*), \quad (3.6)$$

де U_{dp}^* – сумарне падіння напруги на активному опорі обмотки дроселя та активному опорі тиристора, $U_d^* = 0,75$ в.о.

$$I_{\partial p}^* = \sqrt{3} \cdot (\cos 23,07^\circ - 0,75) = 0,294 \text{ в.о.}$$

Значення ЕРС випрямляча, тобто випрямленої напруги на холостому ході, В [22]:

$$E_{\partial p.} = \frac{U_{нав.} + \Delta U_{\partial p.}}{U_{\partial p.}^*}, \quad (3.7)$$

де $U_{нав.}$ – напруга на навантаженні, $U_{нав.} = 127 \text{ В}$,

$\Delta U_{\partial p.}$ – сумарне падіння напруги на активному опорі обмотки дроселя та активному опорі тиристора, $\Delta U_{\partial p.} = 8 \text{ В}$.

$$E_{\partial p.} = \frac{127 + 8}{0,75} = 180 \text{ В}$$

Амплітудне значення фазної електрорушійної сили на вторинній обмотці трансформатора при відповідному з'єднанні обмоток [22]:

$$E_{2mp} = \frac{\pi \cdot E_{\partial p.}}{3 \cdot \sqrt{3}} = \frac{\pi \cdot 180}{3 \cdot \sqrt{3}} = 108,83 \text{ В.} \quad (3.8)$$

Індуктивний опір вторинної обмотки трансформатора, Ом [22]:

$$x_{2mp} = I_{\partial p}^* \cdot \frac{E_{2mp}}{I_{\partial p}}, \quad (3.9)$$

де $I_{\partial p}$ – номінальне значення струму через дросель, що дорівнює номінальному прямому струму: $I_{\partial p} = I_H = 700 \text{ А}$.

$$x_{2mp} = 0,294 \cdot \frac{108,83}{700} = 0,0457 \text{ Ом.}$$

Значення кута комутації [22]:

$$\begin{aligned} \lambda &= \arccos \left(\cos \alpha_{\text{ном}} - \frac{2 \cdot x_{2mp} \cdot I_{\partial p}}{\sqrt{3} \cdot E_{2mp}} \right) - \alpha_{\text{ном}} = \\ &= \arccos \left(\cos 23,07^\circ - \frac{2 \cdot 0,0457 \cdot 700}{\sqrt{3} \cdot 108,83} \right) - 23,07 = 31,44^\circ = 0,5487 \text{ рад.} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Максимальне значення випрямленого струму короткого замикання [22]:

$$I_{\text{max } K3} = \frac{E_{2mp}}{x_{2mp}} = \frac{108,83}{0,0457} = 2381,4 \text{ А.} \quad (3.11)$$

Величина першої гармоніки вторинного струму [22]:

$$I_{2(1)}^* = \sqrt{(I_{2(1)}^{*1})^2 + (I_{2(1)}^{*2})^2} \quad (3.12)$$

де $I_{2(1)}^{*1}, I_{2(1)}^{*2}$ – ортогональні складові першої гармоніки вторинного струму:

$$\begin{aligned} I_{2(1)}^{*1} &= \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} \cdot \sin(2\alpha_{\text{ном}} + \lambda) \cdot \sin \lambda = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} \cdot \sin(2 \cdot 23,07^\circ + 31,44^\circ) \cdot \sin 31,44^\circ = 0,172 \text{ в.о.} \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} I_{2(1)}^{*2} &= \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} \cdot [\lambda - \cos(2\alpha_{\text{ном}} + \lambda) \cdot \sin \lambda = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{4\pi} \cdot [0,5487 - \cos(2 \cdot 23,07^\circ + 31,44^\circ) \cdot \sin 31,44^\circ] = 0,0208 \text{ в.о.} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$I_{2(1)}^* = \sqrt{(I_{2(1)}^{*1})^2 + (I_{2(1)}^{*2})^2} = \sqrt{0,172^2 + 0,0208^2} = 0,173 \text{ в.о.}$$

Діюче значення струму першої гармоніки у вторинній обмотці трансформатора [22]:

$$I_{2mp(1)} = I_{2(1)}^* \cdot \frac{E_{2mp}}{x_{2mp}} = 0,173 \cdot \frac{108,83}{0,0457} = 411,98 \text{ A.} \quad (3.15)$$

Діюче значення струму у вторинній обмотці трансформатора [22]:

$$I_{2\phi} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{2\pi}\right)} \cdot I_H = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \left(1 - \frac{0,5487}{2\pi}\right)} \cdot 700 = 546,01 \text{ A.} \quad (3.16)$$

Значення коефіцієнта трансформації трансформатора [22]:

$$k_{mp} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{U_H}{E_{2mp}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{660}{108,83} = 4,95. \quad (3.17)$$

Дійсне значення струму в первинній обмотці трансформатора [22]:

$$I_{1\phi} = \frac{I_{2\phi}}{k_{mp}} = \frac{546,01}{4,95} = 110,3 \text{ A} \quad (3.18)$$

Повна потужність трансформатора [22]:

$$S = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot E_{2mp} \cdot I_{2\phi} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot 108,83 \cdot 546,01 = 126,05 \text{ кВА.} \quad (3.19)$$

Кут зсуву першої гармоніки первинного струму відносно фазної ЕРС [22]:

$$\varphi_{(1)} = \arctg \frac{I_{2(1)}^{*2}}{I_{2(1)}^{*1}} = \arctg \frac{0,0208}{0,172} = 6,9^\circ = 0,120 \text{ рад.} \quad (3.20)$$

Значення активної потужності на вході випрямляча [22]:

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot E_{2mp} \cdot I_{2mp(1)} \cdot \cos \varphi_{(1)} = \\ &= \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot 108,83 \cdot 411,98 \cdot \cos 6,9^\circ = 93,69 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 93,69 \text{ кВт} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Значення коефіцієнта потужності випрямляча [22]:

$$k_\epsilon = \frac{P}{S} = \frac{93,69}{126,05} = 0,743. \quad (3.22)$$

Дійсне значення анодного струму [22]:

$$I_{ан} = \frac{I_{dp}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\lambda}{2\pi}} = \frac{700}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,5487}{2\pi}} = 386,09 \text{ А.} \quad (3.23)$$

Швидкість падання анодного струму в момент вимикання тиристора [22]:

$$\begin{aligned} \frac{di_{ан}}{dt} &= - \frac{\sqrt{3} \cdot E_{2mp}}{2 \cdot x_{2mp}} \cdot \sin (\alpha_{ном} + \lambda) = \\ &= - \frac{\sqrt{3} \cdot 108,83}{2 \cdot 0,0457} \cdot \sin (23,07^\circ + 31,44^\circ) = -1679,2 \text{ А/с.} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Анодна напруга в момент включення тиристора [22]:

$$U_{ан}^{екл} = \sqrt{3} \cdot E_{2mp} \cdot \sin \alpha_{ном} = \sqrt{3} \cdot 108,83 \cdot \sin 23,07^\circ = 73,86 \text{ В.} \quad (3.25)$$

Анодна напруга в момент вимкнення тиристора [22]:

$$\begin{aligned} U_{ан}^{вимк} &= \sqrt{3} \cdot E_{2mp} \cdot \sin (\alpha_{ном} + \lambda) = \\ &= \sqrt{3} \cdot 108,83 \cdot \sin (23,07^\circ + 31,44^\circ) = 153,48 \text{ В.} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Максимальне значення зворотної анодної напруги [22]:

$$U_{ан \max} = -\sqrt{3} \cdot E_{2mp} = -\sqrt{3} \cdot 108,83 = -188,5 \text{ В.} \quad (3.27)$$

Діюче значення напруги першої гармоніки анодної напруги [22]:

$$\begin{aligned} U_{ан(1)} &= \frac{E_{2mp}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{3}{\pi} \cdot \left[\left(1 - \frac{3\lambda}{4\pi}\right) \cdot \lambda - \frac{3}{4\pi} \cdot \sin^2 \lambda - \left(1 - \frac{3\lambda}{4\pi}\right) \cdot \sin \lambda \cdot \cos (2\alpha_{ном} + \lambda) \right]} = \\ &= \frac{108,83}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{3}{\pi} \cdot \left[\left(1 - \frac{3 \cdot 0,5487}{4\pi}\right) \cdot 0,5487 - \frac{3}{4\pi} \cdot \sin^2 31,44^\circ - \right.} \\ &\quad \left. - \left(1 - \frac{3 \cdot 0,5487}{4\pi}\right) \cdot \sin 31,44^\circ \cdot \cos (2 \cdot 23,07 + 31,44) \right]} = 64,38 \text{ В} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Діюче значення напруги n-ї гармоніки випрямленої напруги [22]:

$$U_{дв(n)} = \frac{E_{дп}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{c_1^2 + c_2^2 - 2 \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot \cos (2 \cdot \alpha_{ном} + \lambda)} \quad (3.29)$$

де n – номер гармоніки.

c_1, c_2 – косинусні складові гармонік [22]:

$$c_1 = \frac{\cos \left[\frac{\lambda \cdot (n+1)}{2} \right]}{n+1} \quad (3.30)$$

$$c_2 = \frac{\cos \left[\frac{\lambda \cdot (n-1)}{2} \right]}{n-1} \quad (3.31)$$

Результати розрахунків за формулами (3.29) – (3.31) зводимо до табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Діюче значення напруги n-ї гармоніки випрямленої напруги

Номер гармоніки, n	5	7	9	11	13
Косинусні складові:					
c_1	-0,0124	-0,0729	-0,0921	-0,0824	-0,0547
c_2	0,1141	-0,0124	-0,0729	-0,0921	-0,0824
Діюче значення напруги n-ї гармоніки випрямленої напруги, $U_{\partial \text{в}}, \text{В}$	14,94	9,07	13,29	13,94	11,27

Діюче значення напруги n-ї непарної гармоніки анодної напруги [22]:

$$U_{\partial \text{ан}(n)} = \frac{3E_{\partial p}}{\sqrt{2}\pi} \cdot \sqrt{s_1^2 + s_2^2 - 2 \cdot s_1 \cdot s_2 \cdot \cos (2 \cdot \alpha_{\text{ном}} + \lambda)} \quad (3.32)$$

де s_1, s_2 – синусні складові гармонік [22]:

$$s_1 = \frac{\sin \left[\frac{\lambda \cdot (n+1)}{2} \right]}{n+1} \quad (3.33)$$

$$s_2 = \frac{\sin \left[\frac{\lambda \cdot (n-1)}{2} \right]}{n-1} \quad (3.34)$$

Результати розрахунків за формулами (3.32) – (3.34) зводимо до табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Діюче значення напруги n-ї гармоніки анодної напруги

Номер гармоніки, n	5	7	9	11	13
Синусні складові:					
s_1	0,1662	0,1015	0,0389	-0,0124	-0,0459
s_2	0,2224	0,1662	0,1015	0,0389	-0,0124
Діюче значення напруги n-ї гармоніки анодної напруги, $U_{\partial an}$, В	18,18	12,87	7,39	3,18	3,30

Першою гармонікою джерела живлення є гармоніка напруги живлення при частоті $f_{(1)} = 50$ Гц. Частота основної гармоніки випрямленої напруги залежить від номера гармоніки. Для згладжування пульсацій випрямленої напруги доцільно використання індуктивно-ємнісний фільтр з послідовним включенням та фільтра-дроселя з паралельним включенням до навантаження.

Коефіцієнт пульсації на вході згладжувачого фільтра [22]:

$$k_{пульс(n)} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\partial в (n)}}{U_H} \quad (3.35)$$

Індуктивність згладжувачого фільтра повинна бути більше значення, Γ_H [22]:

$$L_{зф} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\partial в (n)}}{n \cdot \omega \cdot I_H}, \quad (3.36)$$

де ω – колова частота [22]:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314 \text{ c}^{-1} \quad (3.37)$$

Коефіцієнт фільтрації [22]:

$$k_{\phi} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\partial \epsilon (n)}}{k_n \cdot U_H}, \quad (3.38)$$

де k_n – коефіцієнт пульсацій, $k_n = 0,0003$.

Ємність конденсатора згладжуючого фільтра, Φ [22]:

$$C_{\phi} = \frac{|1 - k_{\phi}|}{n^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{\phi}} \quad (3.39)$$

Індуктивність дроселів, Гн [22]:

$$L_{\partial p} = \frac{L_{\phi}}{2}. \quad (3.40)$$

Усі розрахунки за формулами (3.35) – (3.40) заносимо до табл. 3.3.

Комутація тиристорів у перетворювачах є важливою процедурою, яка впливає на ефективність та якість вихідної хвилі напруги. Для комутації тиристорів у перетворювачі використовується система управління, яка може бути як одноканальною, так і багатоканальною. У системах управління одноканальної комутації, один канал управління здійснює контроль всіма тиристорами. Вони зазвичай є простішими за багатоканальні системи та менш чутливі до помилок синхронізації. Їх використання може бути обмежено при застосуванні значної кількості напівпровідників або необхідності високої швидкості комутації [23].

Таблиця 3.3 – Значення параметрів фільтруючих пристроїв для n -ї гармоніки

Номер гармоніки, n	5	7	9	11	13
Коефіцієнт пульсації на вході згладжуючого фільтра, $k_{пульс}$	0,166	0,101	0,148	0,155	0,126
Індуктивність згладжуючого фільтра, $L_{зф}$ Гн	19,23	8,34	9,50	8,16	5,58
Коефіцієнт фільтрації, $k_{ф}$	554,6	336,8	493,4	517,6	418,4
Ємність конденсатора згладжуючого фільтра, $C_{зф}$ Ф	11,68	8,33	6,49	5,31	4,49
Індуктивність дроселів, $L_{др}$ Гн	9,61	4,17	4,75	4,08	2,79

Багатоканальні системи управління використовують кілька каналів для керування різними групами тиристорів. Зазначене дозволяє більш гнучко налаштовувати режими роботи перетворювачів та оптимізувати їх роботу в залежності від умов навантаження та необхідно форми вихідного сигналу. Такі схеми потребують більш складної системи управління та вимагає синхронізацію між окремими каналами. Дана схема забезпечує кращу якість вихідної форми напруги та високу швидкість комутації.

4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ДОСЛІДЖЕННЯМ ГАРМОНІЙНИХ СКЛАДОВИХ

4.1 Принципи застосування методів моделювання для дослідження гармонійних коливань у електричній мережі

Для вимірювання параметрів гармонік, як було зазначено вище, можна використати спеціальні прилади – аналізатори спектра. Означені прилади дозволяють визначити амплітуди та фазові кути гармонічних складових, що дають змогу зрозуміти розподіл гармонічних складових у мережі та передбачити вплив на різні елементи електричної мережі. У даному випадку фактично проводяться натурні експериментальні дослідження. Іноді такий підхід є досить ускладненим або взагалі неможливим, що викликає необхідність розглянути можливість здійснювати моделювання на основі створених математичних моделей.

Моделювання проводиться з використанням спеціального програмного забезпечення, які дозволяють створювати детальні моделі електричних мереж з наступним проведенням віртуальних експериментів для з'ясування взаємозв'язків між режимами роботи мережі та параметрами гармонічних складових, що при цьому виникають у даній мережі за даних обставин. Під час моделювання можна змінювати параметри мережі у широких межах, а їх аналіз дозволяє вивчити вплив гармонік на різні параметри електричної мережі. Крім того, маємо можливість визначити ефект від впровадження засобів по компенсації гармонік й оцінити ступінь впливу різних методів компенсації на роботу електричної мережі шляхом моніторингу параметрів стану – коливання величин напруг, струмів, частот, потужностей та інших; здійснити пошук можливих проблем якості енергопостачання, передбачити можливість виходу з ладу обладнання та визначити параметри надійності і безпеки роботи електричних мереж [24].

4.2 Складання моделі електричної мережі для дослідження спектру гармонік

Гармонійні струми негативно впливають на продуктивність електричних ліній електропередачі через втрати в них та продукування блукаючих струмів, перевантажує нейтральні провідники, призводить до перегріву окремих вузлів електрообладнання, хибні спрацьовування засобів автоматики та релейного захисту й інше [25].

Для аналізу і прогнозування рівня спотворення при генеруванні гармонік здійснимо розробку моделі, яка імітує поведінку електричної мережі та визначає спектр гармонік при її роботі.

У подальшому складена модель дозволить дослідити вплив різних фільтруючих пристроїв, робота яких направлена на придушення гармонійних коливань. Складена модель також дозволяє визначати оптимальне розташування фільтрів у розподільчій системі та ефективність їх застосування.

Спочатку складаємо модель некомпенсованої лінії (рис. 4.1) [26].

Для однозначності продукування гармонійних коливань схема містить модель регульованих приводів. Зазначені приводи складаються з двигуна, що живиться напругою від перетворювача. Сам перетворювач складається з імпульсного випрямляча, інвертора і фільтруючого пристрою для згладжування пульсацій. Модель перетворювача, що входить до складу розподільчої мережі, і є джерелом гармонійних коливань представлена на рис. 4.2 [26].

У інверторі перетворена зі змінної постійна напруга відповідає за регулювання частоти і зміни напруги для керування частотою обертання двигуна. Даний пристрій через частий процес перемикання продукує в мережу гармонійні струми змінного струму. Згенеровані пульсації проникають у мережу живлення і сприяє виникненню гармонік. Для того,

щоб більш точно врахувати вплив гармонік на спотворення роботи системи, складену модель будемо розглядати у часовій області. Гармоніки від роботи перетворювача залежать від структури цього пристрою та характеристик споживача, у якості якого виступає асинхронний двигун.

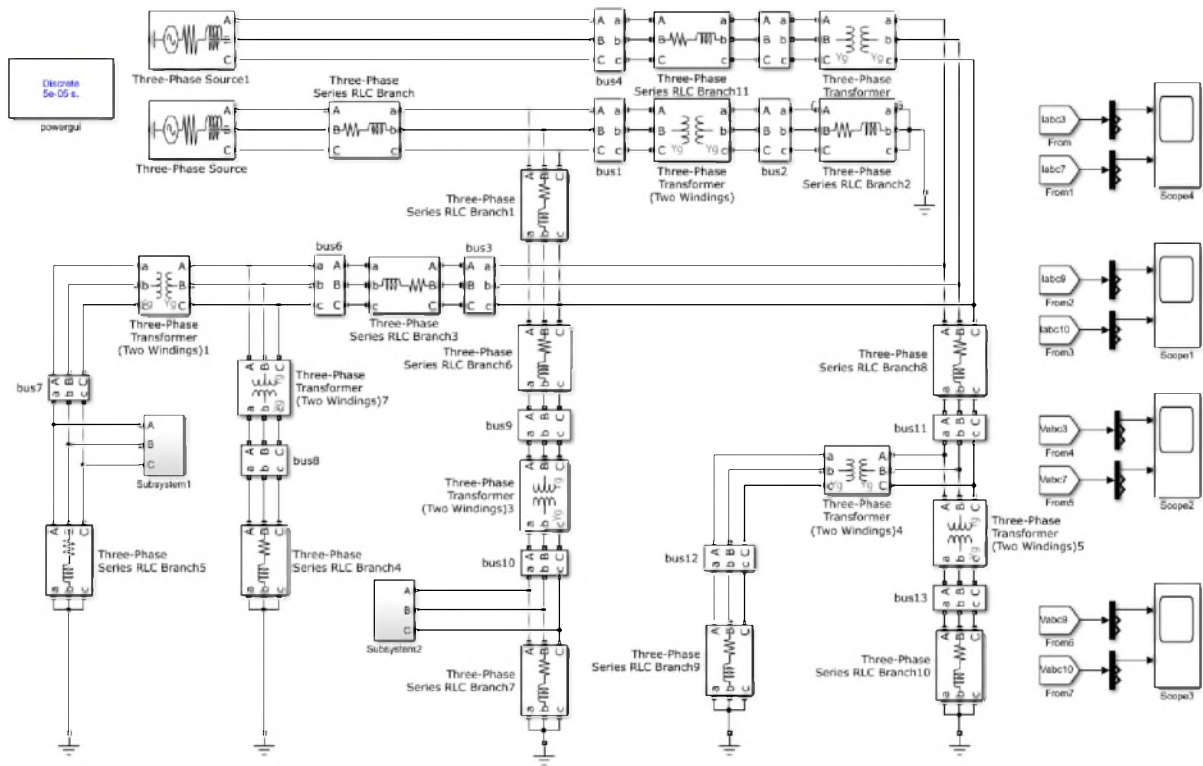


Рисунок 4.1 – Модель розподільчої мережі без застосування фільтруючих пристроїв

Для зменшення впливу гармонік і спотворення форми напруги і струму використовують пасивні та активні фільтри.

Пасивні фільтри проектують таким чином, щоб їх ємнісна складова «працювала» на основній частоті, і паралельно продукують реактивну потужність для збільшення значення коефіцієнта потужності. Найчастіше у шунтуючих пасивних фільтрах відбувається фільтрація низькочастотних спотворень. Основним при проектуванні таких фільтрів є вибір потужності конденсатора у залежності від номінальної напруги, основної частоти напруги живлення, номера гармоніки, на який фільтр налаштовується [27].

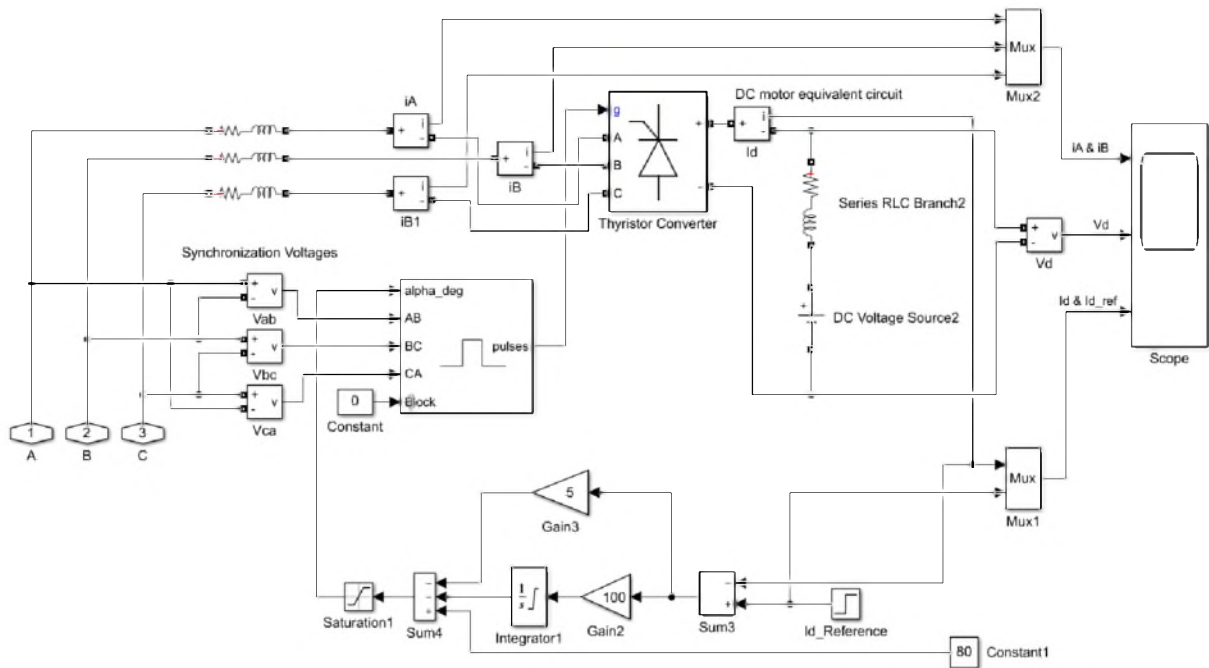


Рисунок 4.2 – Модель перетворювача, що входить до складу розподільчої мережі

Спектральний аналіз у розподільчій мережі без застосування фільтруючих засобів представлено на рис. 4.3.

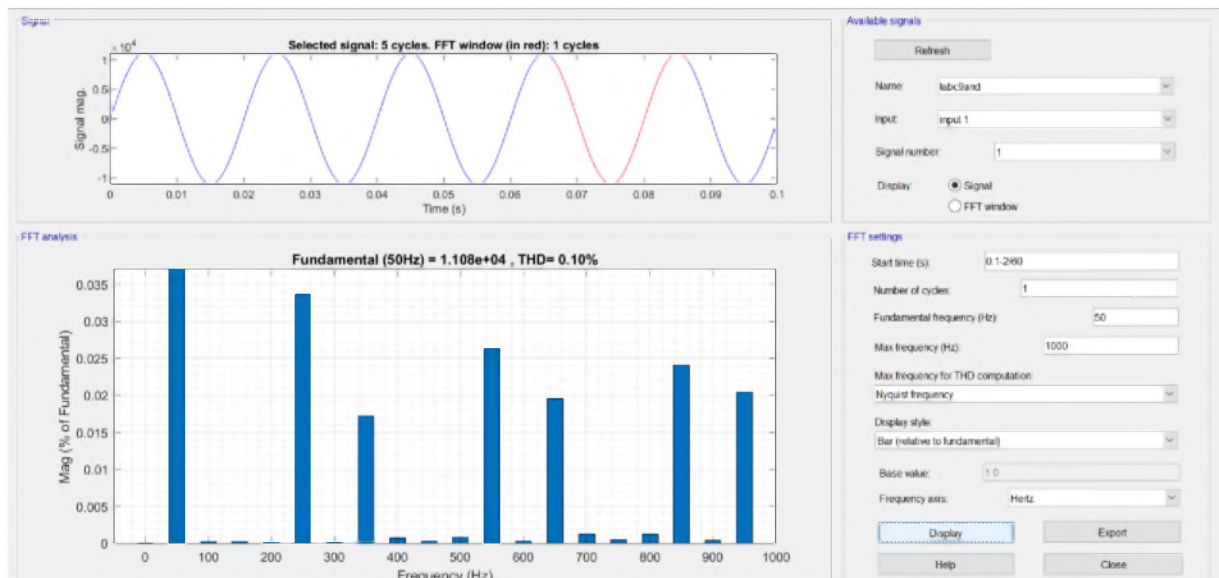


Рисунок 4.3 – Спектральний аналіз у розподільчій мережі без застосування фільтруючих засобів

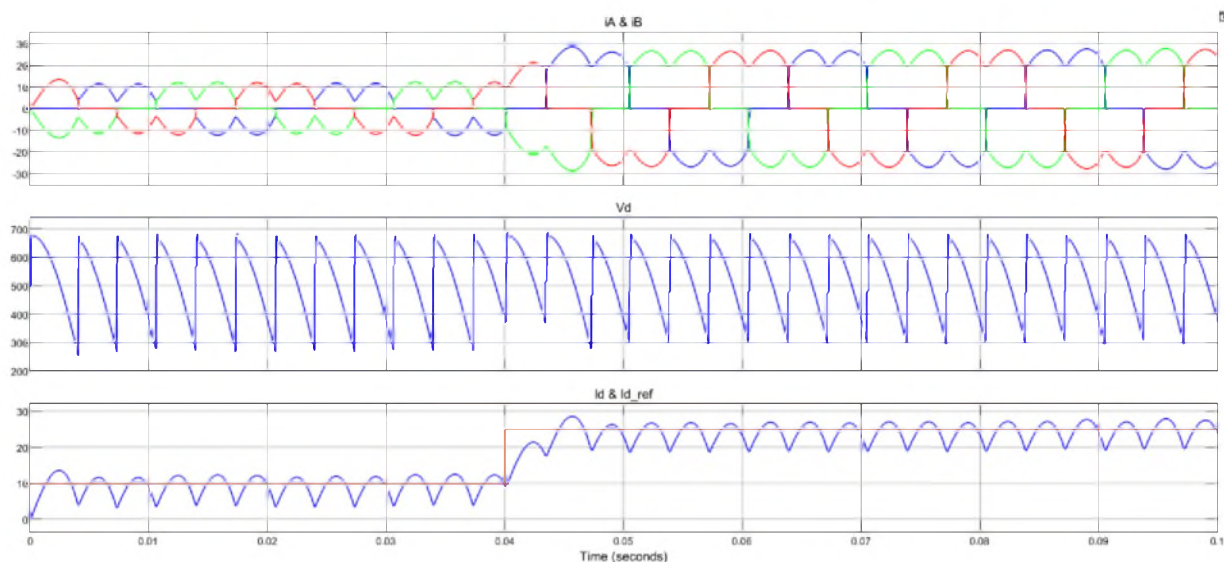


Рисунок 4.4 – Форми струмів і напруг у перетворювачі

Система, що містить фільтруючий пристрій, представлена на рис. 4.5.

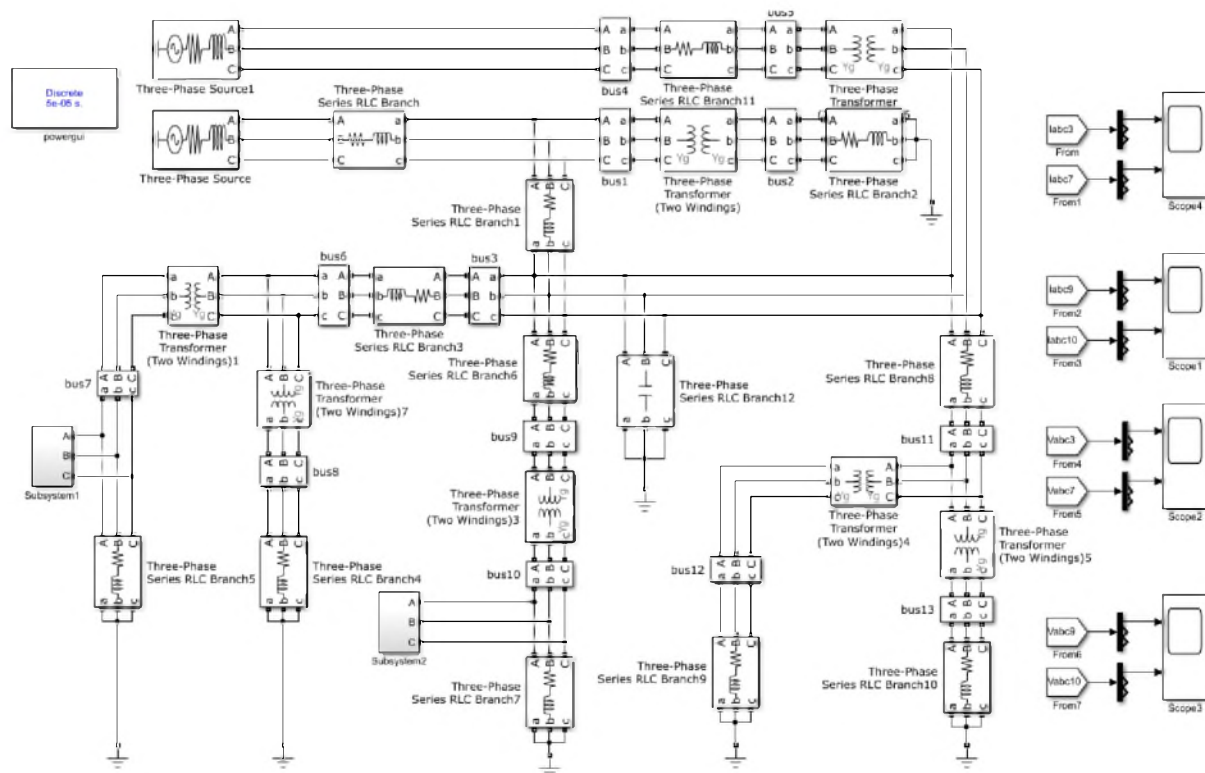


Рисунок 4.5 – Модель розподільчої мережі із застосуванням фільтруючих пристроїв

Результати моделювання представлено на рис. 4.6.

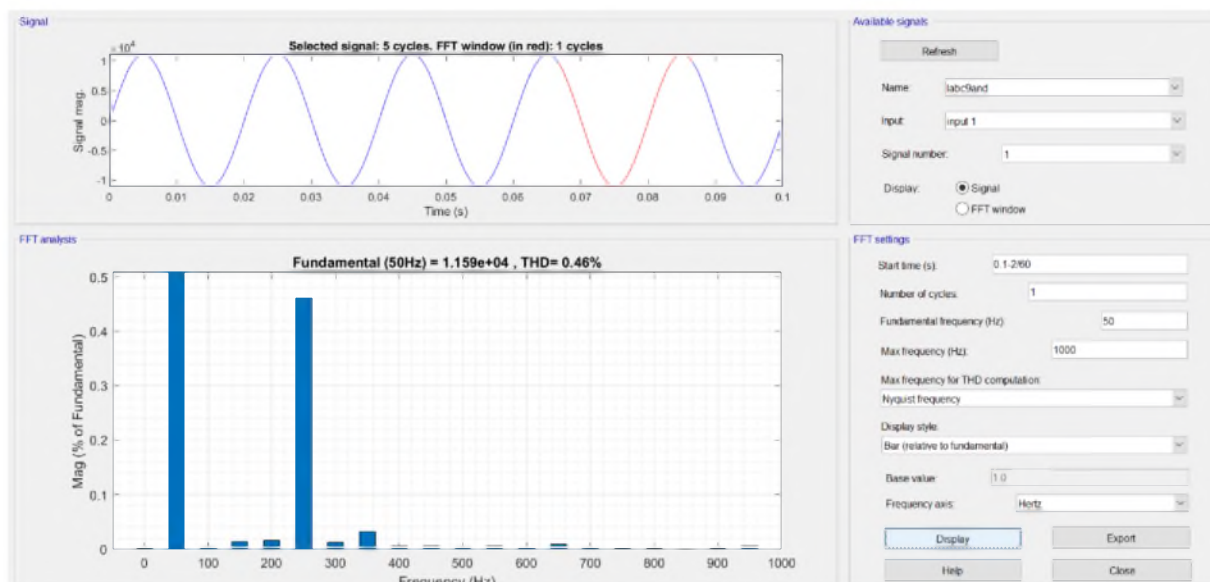


Рисунок 4.6 – Спектральний аналіз у розподільчій мережі при застосуванні фільтруючих засобів

Більш складною є конструкція фільтра, що являє собою послідовний індуктивно-ємнісний контур та/або паралельний активно-індуктивно-ємнісний контур. Обидва контури налаштовуються на середньгеометричну частоту, які здатні здійснити фільтрацію двох гармонійних складових.

Результати моделювання говорять про те, що застосування фільтруючого пристрою у розподільчій електричній мережі дозволяє мінімізувати гармонійні коливання у цій мережі.

ВИСНОВКИ

Здійснена робота дозволила визначити вимоги до основних показників якості електричної енергії. У ході досліджень було визначено ступінь впливу вищих гармонік на елементи розподільчої електричної мережі і залежить від її складу та конструктивних особливостей.

Наявність у мережі нелінійних споживачів та керованих перетворювачів призводить до зростання числа спектральних складових та викривлення синусоїдної форми кривих струмів і напруг.

Вплив несинусоїдної форми струмів і напруг негативно позначається практично на всіх споживачах, тому досить важливо застосовувати засоби боротьби з несинусоїдністю шляхом використання фільтрів вищих гармонік; знижувати рівень вищих гармонік, що генеруються перетворювачами; більш раціонально конструювати схеми електричних мереж. Зменшення несинусоїдності дозволить зменшити втрати електричної енергії.

Було розроблено комп'ютерну модель роботи трифазної електричної мережі при наявності у ній гармонійних коливань, що призводить до несинусоїдності струмів і напруг. Складена модель дозволяє визначити спектральний аналіз у розподільчій мережі без та при застосуванні фільтруючих засобів та визначити додаткові втрати, що обумовлені несинусоїдністю основних параметрів роботи електричної мережі.

Моделювання показало, що при наявності будь-якої асиметрії можуть з'являються додаткові гармонійні коливання, які впливають на роботу приєднаних до мережі споживачів. Оцінка форми зміни струмів і напруг на навантаженні та продукування гармонік може слугувати для оцінки стану споживачів та виявити можливу наявність несправності. У якості способу діагностики роботи споживача можна використати аналіз кривих миттєвих значень струмів і напруги на споживачі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі: навч. посібник / Ю.Ф. Романюк. – К.: Знання, 2007. – 292 с.
2. Електричні мережі та системи. Режим роботи розімкнених мереж: Навчальний посібник з дисципліни для всіх форм навчання та студентів іноземців напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»/Уклад. В.В.Кирик. – К.: НТУУ «КПІ». 2014. – 130 с.
3. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015 Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. Київ: Мінрегіон, 2016. – 79 с.
4. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: Підручник / М. С. Сегеда. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.
5. Журахівський А.В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник / А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, О. Р. Пастух. – Київ. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 456 с.
6. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/hfsdq>
7. Colak I. Introduction to Smart Grid. 3rd International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP), Istanbul. Turkey, 2016. pp. 30-34.
8. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://powercontrol.at.ua/publ/jakist_elektroenergiji/1-1-0-29
9. Arrillaga J., Watson N.R. Power System Harmonics. – John Wiley & Sons, Ltd, – 2004. – 399 p.
10. Wakiler G. Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design. – Berlin: Springer, 2001. – 506 p.

11. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/341599618_Adaptive_fuzzy_controlled_hybrid_shunt_active_power_filter_for_power_quality_enhancement/figures?lo=1
12. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.intechopen.com/chapters/44197>
13. Півняк Г.Г., Шидловський А.К., Кігель Г.А., Рибалко А.Я., Хованська О.І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
14. Денисюк С.П., Стшелецькі Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2019, № 3. С. 8-22.
15. Стогній, Б. С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення [Текст] / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2010. – №6. – С. 44-50.
16. A. Ujile „Harmonic Estimation and Source Identification in Power Distribution Systems Using Observers,” A Thesis Submitted to the University of Manchester for the Degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences, Manchester, England, 2015.
17. Лагутін Г.І. Вищі гармоніки в системах електропостачання / Г.І. Лагутін, А.М. Панченко, А.І. Гарагуля // Системи озброєння і військова техніка, № 2(30), 2012.
18. Girgis A. A. Optimal Estimation of Voltage Phasors and Frequency Deviation Using Linear and Non-Linear Kalman Filtering: Theory and Limitations /A.A. Girgis, T.L.D. Hwang // IEEE Trans, on Power Apparatus and Systems. 2007. V. PAS-103, Js.10. p. 2943-2951.
19. ДНАОП 0.00-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – К.: ВП «ГРАНМНА», 2001. – 117 с.

20. Перехідні процеси в системах електропостачання / Півняк Г.Г., Винославський В.Н., Рибалко А.Я., Несен Л.И. и др. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. – 600 с.
21. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/hioyt>
22. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навчальний посібник / М.Й. Бурбело, О.О. Бірюков, Л.М. Мельничук – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 204 с.
23. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [Соловей О.І., Розен В.П., Плешков П.Г. та ін.]; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015, – 316 с.
24. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень: навч. посіб. / Р. Н. Кветний та ін.; Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця: ВНТУ, 2013.
25. S. Liang, „A Novel Method for Major Harmonic Sources Identification in High Voltage Transmission Systems,” Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Arlington in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Arlington, USA, 2009.
26. S.J. Chapman. MATLAB Programming for Engineers. Thomson, 2004. – 592 p.
27. Н. Фудзіта та Х. Акагі, "Практичний підхід до компенсації гармонік в енергосистемах: Послідовне з'єднання пасивних і активних фільтрів", в конф. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting 1990, с. 1107-1112.
28. Томашевський В. М. Імітаційне моделювання систем і процесів: навч. посіб. / В. М. Томашевський. – К.: ІСДО, 1994. – 124 с.
29. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis / A. M. Law, W.D. Kelton. - New York : McGraw-Hill Publishing Co, 2000. – 3-rd edit. – 560 p.

30. Правила улаштування електроустановок. – 2-ге вид., переробл., і допов. – Харків: Форт, 2009. – 736 с.
31. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К.: АТ «Київська книжкова фабрика», 1988. – 380 с.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

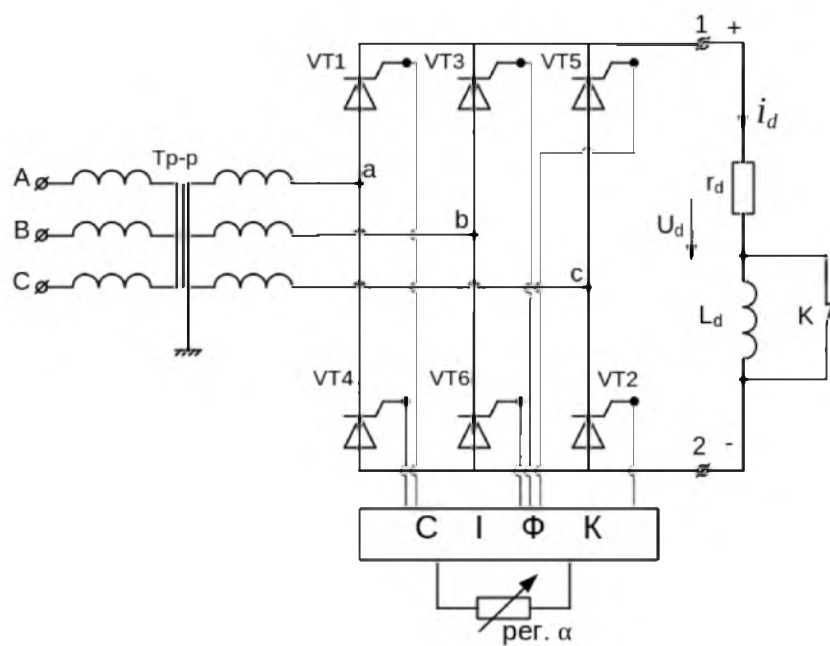
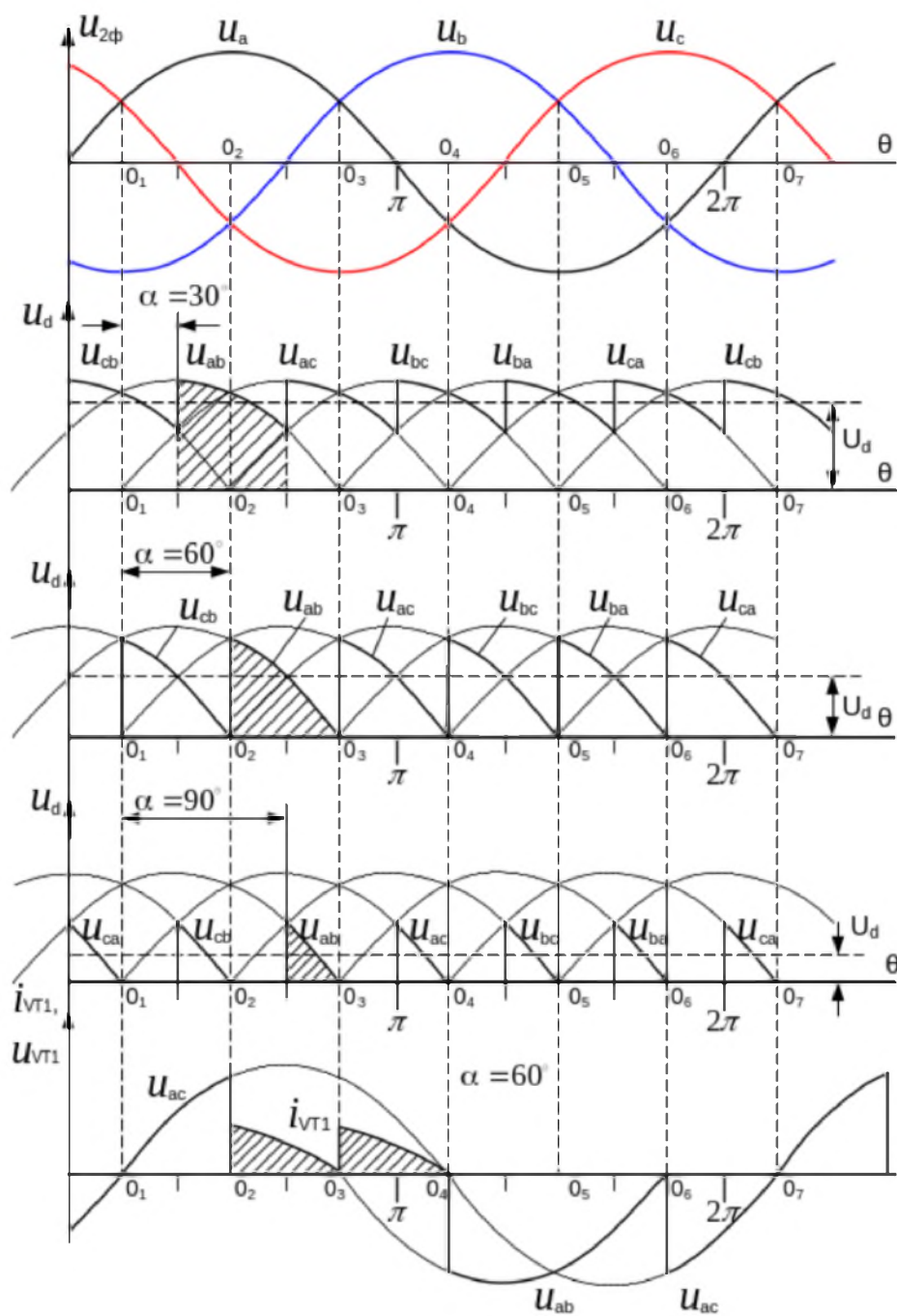
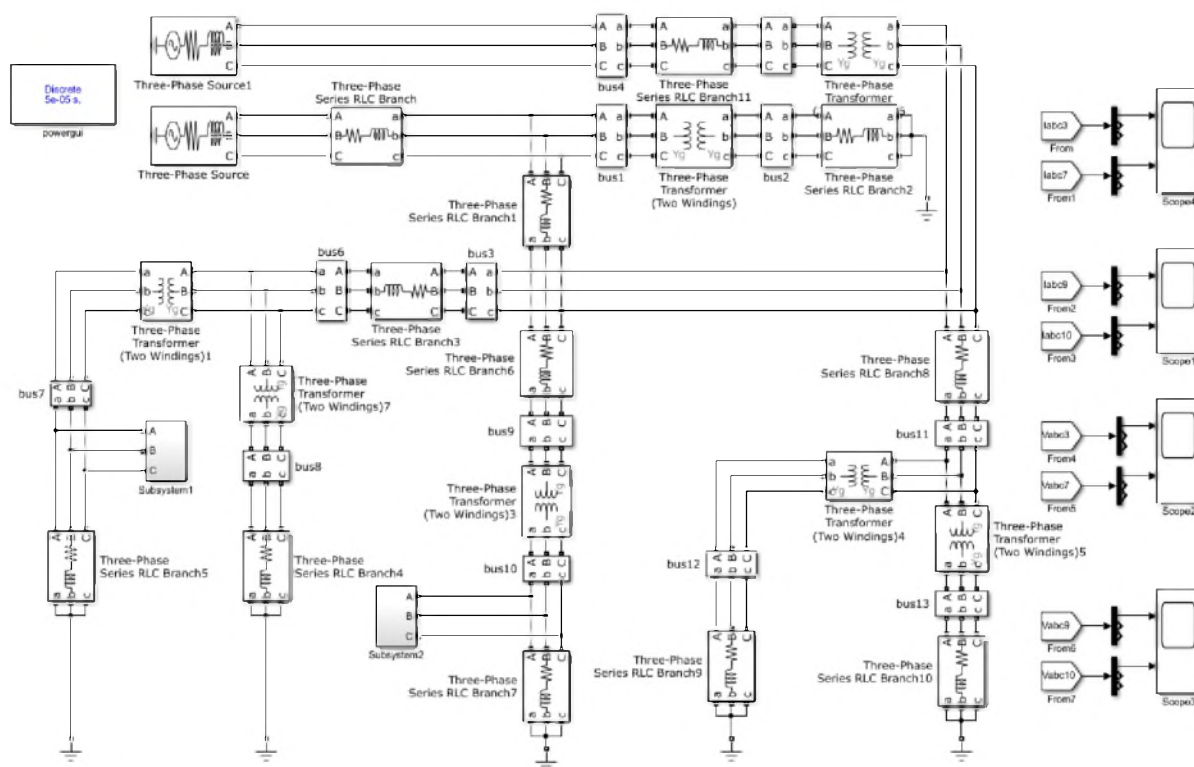


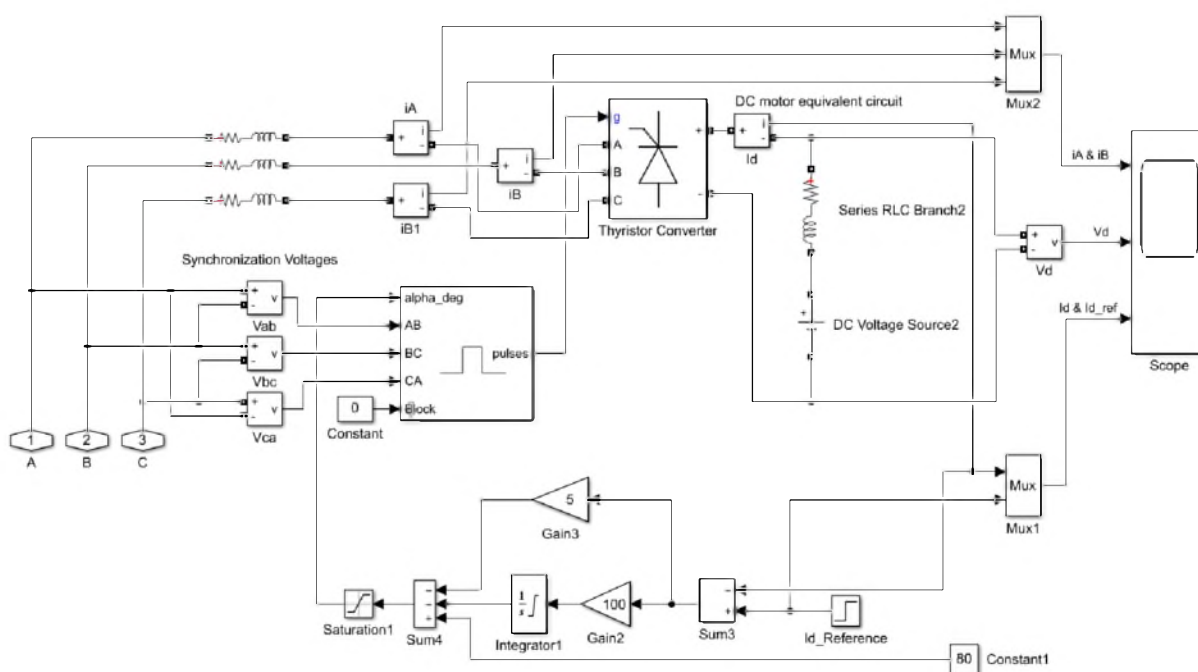
Схема трифазного мостового керованого випрямляча при роботі на активно-індуктивне навантаження



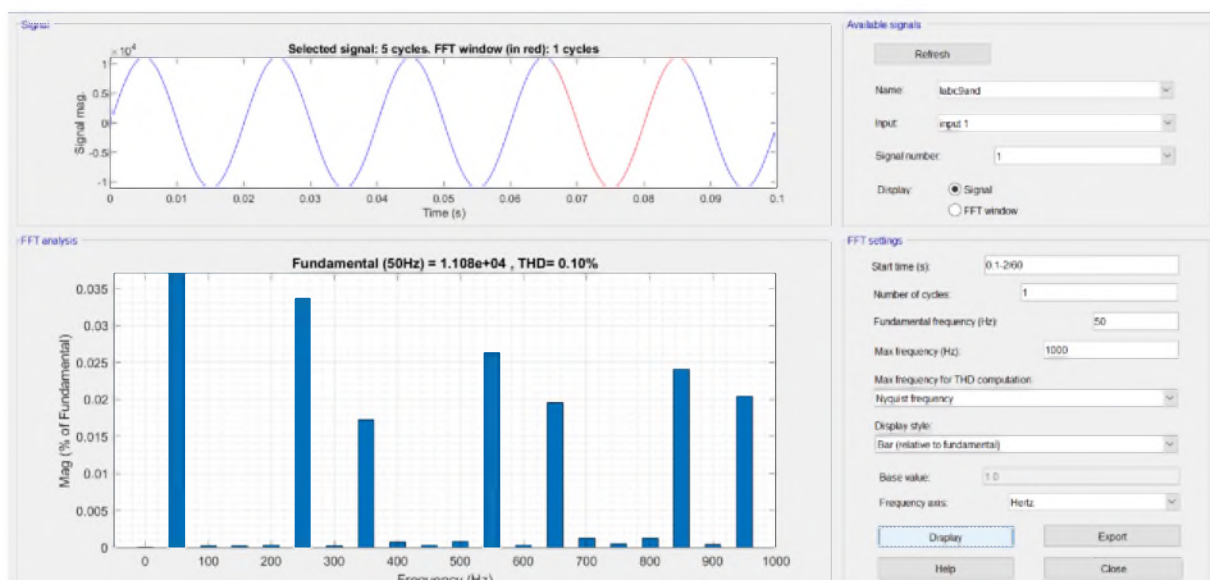
Часові діаграми роботи трифазного мостового керованого випрямляча



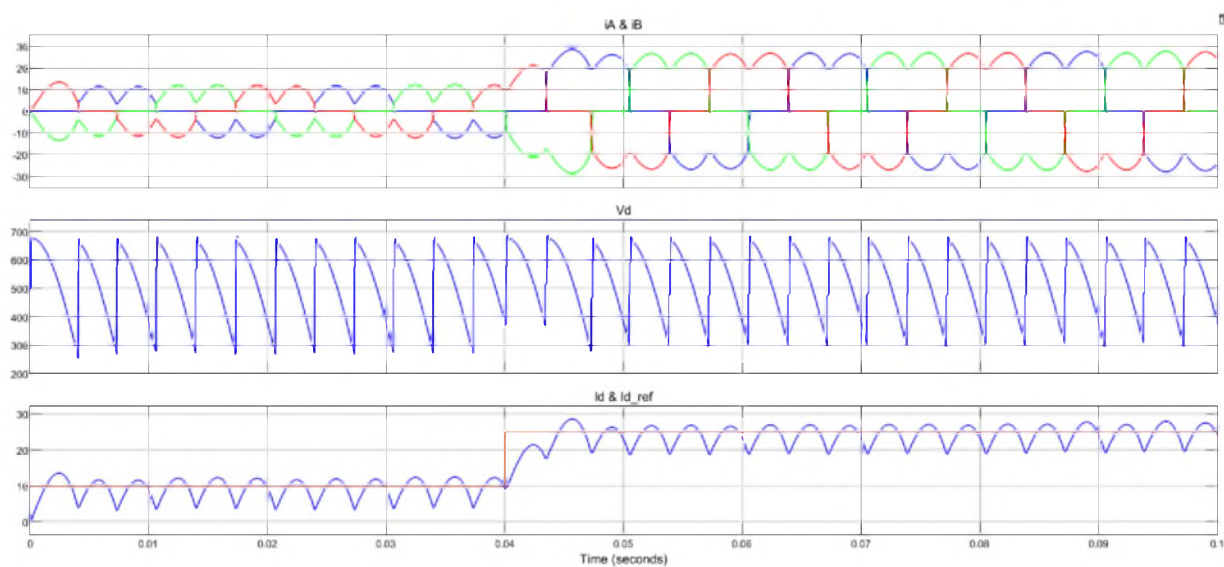
Модель розподільчої мережі без застосування фільтруючих пристроїв



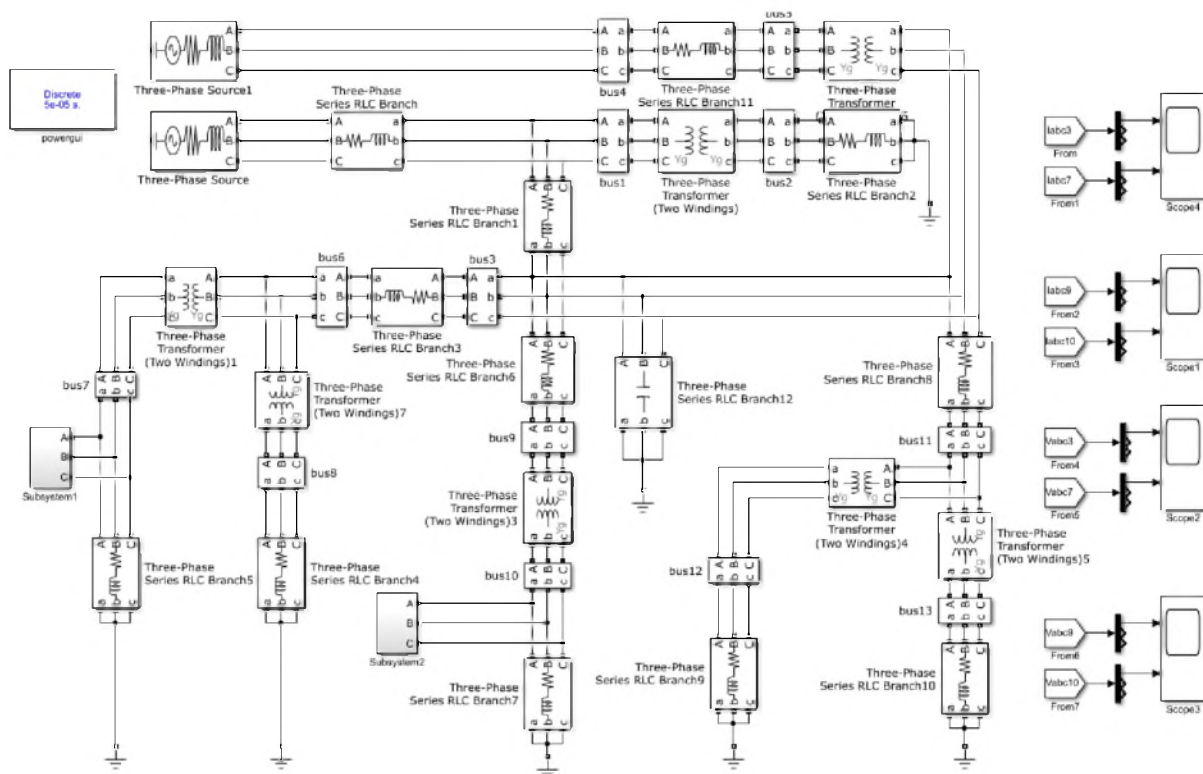
Модель перетворювача, що входить до складу розподільчої мережі



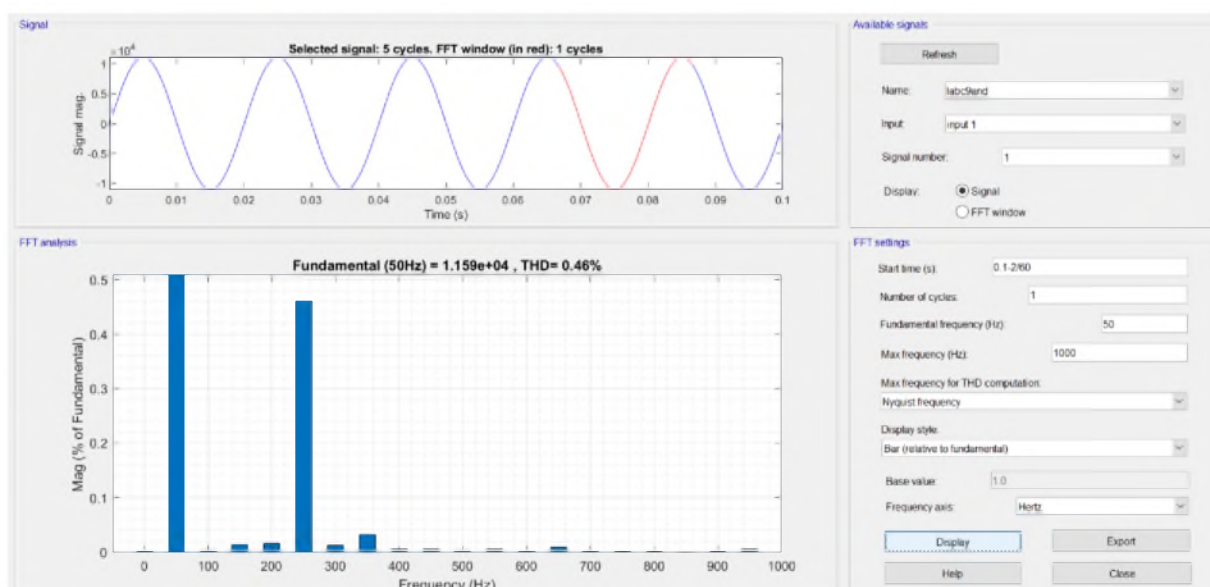
Спектральний аналіз у розподільчій мережі без застосування фільтруючих засобів



Форми струмів і напруг у перетворювачі



Модель розподільчої мережі із застосуванням фільтруючих пристроїв



Спектральний аналіз у розподільчій мережі при застосуванні фільтруючих засобів

ДОДАТОК Б.

ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

1. Обов'язки працівників

1.1. Обслуговування діючих електроустановок, проведення в них оперативних перемикань, організацію та виконання ремонтних, монтажних чи налагоджувальних робіт і випробувань повинні здійснювати спеціально підготовлені та атестовані електротехнічні працівники.

У споживачів, як правило, має бути створена електротехнічна служба (відділ, група), укомплектована необхідною кількістю електротехнічного персоналу, залежно від класу напруги живлення, складності та обсягу обслуговуваних електроустановок.

У разі відсутності атестованого обслуговуючого персоналу допускається визначити спеціалізовану організацію, відповідальну за технічну експлуатацію та обслуговування електроустановок споживача. Ця організація згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 15.10.2003 N 1631 "Про затвердження Порядку видачі дозволів Державним комітетом з нагляду за охороною праці та його територіальними органами" повинна мати відповідний дозвіл на проведення робіт в електроустановках. У цьому разі відповідальність за технічно грамотну та безпечну експлуатацію електрогосподарства споживача повинна визначатись договором, укладеним між споживачем і цією організацією.

За відсутності такого обслуговування експлуатація електроустановок забороняється.

1.2. Власник електроустановки повинен забезпечити організацію:

- експлуатації електроустановок (електротехнічного та електротехнологічного обладнання) згідно з вимогами цих Правил, інших чинних НД та Правил користування електричною енергією, затверджених постановою НКРЕ від 31.07.96 N 28, зареєстрованих у Міністерстві

юстиції України 02.08.96 за N 417/1442 (у редакції постанови НКРЕ від 17.10.2005 N 910, зареєстрованої у Міністерстві юстиції України 18.11.2005 за N 1399/11679);

- надійної роботи електроустановок і безпечного їх обслуговування;
- виконання заходів із запобігання використанню технологій і методів роботи, що негативно впливають на навколишнє природне середовище;
- дотримання встановлених режимів споживання електричної енергії та потужності;
- виконання приписів органів державного нагляду.

1.3. Для безпосереднього виконання функцій щодо організації експлуатації електроустановок керівник (роботодавець) повинен призначити особу, відповідальну за електрогосподарство споживача (далі - особа, відповідальна за електрогосподарство), та особу, яка буде її замінювати у разі відсутності.

Особу, відповідальну за електрогосподарство, та особу, яка буде її замінювати, призначають з числа спеціалістів, кваліфікація яких відповідає вимогам Правил та які пройшли навчання з питань технічної експлуатації електроустановок, правил пожежної безпеки та охорони праці.

Після успішної перевірки знань з питань технічної експлуатації електроустановок, правил пожежної безпеки та охорони праці та присвоєння цим особам IV групи з електробезпеки для обслуговування електроустановок напругою до 1000 В та V групи з електробезпеки для обслуговування електроустановок напругою понад 1000 В ці особи наказом споживача допускаються до виконання своїх обов'язків.

За наявності в споживача посади головного енергетика обов'язки особи, відповідальної за електрогосподарство, як правило, покладаються на нього. Допускається виконання обов'язків особи, відповідальної за електрогосподарство, та/або її заступника, за сумісництвом.

Організація вищого рівня споживача може призначати особу, відповідальну за електрогосподарство, для своїх структурних підрозділів.

1.4. Споживачі, у яких електрогосподарство включає тільки ввідно-розподільний пристрій, освітлювальні установки, прилади побутового призначення напругою до 220 В, особу, відповідальну за електрогосподарство, можуть не призначати.

Відповідальність за технічно грамотне та безпечне користування електроустановкою за письмовою згодою територіального підрозділу Держенергонагляду покладається на керівника споживача. Ця особа повинна пройти навчання в СНЗ за 8-годинною програмою. Надалі вона проходить інструктаж в енергопостачальній організації з питань технічної та безпечної експлуатації електроустановок в обсязі знань, що відповідає II групі з електробезпеки, про що робиться запис у журналі інструктажу споживачів і в договорі про користування електроенергією.

За умови відсутності змін в умовах виробництва та складі електрообладнання періодичність проведення інструктажів установлюється один раз на два роки.

Якщо під час здійснення енергетичного нагляду будуть виявлені порушення умов експлуатації та умов електроспоживання, то постачання електроенергії повинно бути припинене або обмежене в установленому порядку до призначення на цьому об'єкті особи, відповідальної за електрогосподарство, або електроустановку необхідно передати на обслуговування спеціалізованій організації.

1.5. Експлуатація електроустановок з напругою понад 1000 В, власниками яких є населення, дозволяється у разі, якщо споживач має V групу з електробезпеки або оформив договір про надання послуг щодо обслуговування електроустановок зі спеціалізованою організацією або з фізичною особою.

1.6. Особа, відповідальна за електрогосподарство (спеціалізована організація), повинна забезпечити:

1) розроблення і проведення організаційних і технічних заходів, що включають:

- утримання електроустановок у робочому стані та їх експлуатацію згідно з вимогами цих Правил, ПУЕ, ПБЕЕ, інструкцій та інших НД;
 - дотримання заданих електропередавальною (електропостачальною) організацією режимів електроспоживання і договірних умов споживання електричної енергії та потужності;
 - виконання заходів з підготовки електроустановок підприємства до роботи в осінньо-зимовий період;
 - раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів;
 - оптимальне споживання реактивної потужності та економічні режими роботи компенсуючих пристроїв;
 - упровадження автоматизованих систем і приладів вимірювання та обліку електричної енергії;
 - своєчасний і якісний ремонт електроустановок;
 - зменшення аварійності та травматизму;
 - забезпечення промислової безпеки;
 - підвищення надійності роботи електроустановок;
 - навчання і перевірку знань цих Правил, ПБЕЕ, ПУЕ, ПБЕ, Правил пожежної безпеки в Україні, виробничих (посадових і експлуатаційних) інструкцій та інструкцій з охорони праці для електротехнічного (електротехнологічного) персоналу;
 - охорону навколишнього природного середовища (у залежності від покладених функцій);
- 2) удосконалення мережі електропостачання споживача з виділенням на резервні зовнішні живильні лінії навантажень струмоприймачів екологічної та аварійної броні;
- 3) розроблення комплексу заходів, спрямованих на запобігання травматизму, зниженню рівня промислової безпеки, загибелі тварин, пошкодженню обладнання, можливим негативним екологічним та іншим наслідкам у разі припинення або обмеження електропостачання, здійсненого у встановленому порядку;

4) розслідування технологічних порушень в роботі електроустановок та оперативне повідомлення про них територіальному підрозділу Держенергонагляду;

5) розроблення та дотримання норм витрати палива, електричної енергії, їх своєчасний перегляд під час удосконалення технології виробництва та впровадження нової техніки;

6) проведення діагностування технічного стану електроустановок;

7) проведення вимірів споживання електричної енергії та потужності в установлений електропередавальною організацією характерний режимний день літнього та зимового періодів і подання в установлені терміни добових режимних графіків до електропередавальної організації та територіального підрозділу Держенергонагляду;

8) систематичний контроль за графіком навантаження споживача; розроблення постійно діючих заходів з регулювання добового графіка електричного навантаження, зниження граничних величин споживання електричної потужності в години максимуму навантаження мережі електропередавальної організації;

9) виконання графіка обмеження споживання електричної енергії, потужності та аварійного відключення споживачів; розробку заходів щодо зниження споживання електричної енергії та потужності для забезпечення встановлених режимів електроспоживання у відповідності до доведених графіків обмеження;

10) ведення обліку (у спеціальному журналі) щодобового споживання електричної енергії і навантаження в години контролю максимуму електричної потужності та надання інформації електропередавальній організації і відповідному територіальному підрозділу Держенергонагляду (на їх вимогу);

11) розроблення із залученням технологічних та інших підрозділів, а також спеціалізованих інститутів і проектних організацій перспективних планів зниження енергоємності продукції, яка випускається, упровадження

енергозберігаючих технологій, теплоутилізаційних установок, використання вторинних паливно-енергетичних ресурсів, запровадження прогресивних форм економічного стимулювання;

12) облік та аналіз аварій і нещасних випадків, а також ужиття заходів з усунення причин їх виникнення;

13) розроблення виробничих інструкцій та інструкцій з охорони праці і пожежної безпеки для працівників енергетичної служби;

14) надання інформації на вимогу Держенергонагляду у відповідності до нормативно-правових актів;

15) ведення документації з електрогосподарства згідно з вимогами нормативно-правових актів;

16) розроблення інструкцій про порядок дій обслуговуючого персоналу у разі виникнення аварійних та надзвичайних ситуацій, пожеж;

17) додержання вимог санітарних норм і правил щодо умов праці на робочих місцях обслуговуючого персоналу згідно з підрозділом 5.7 цих Правил.

1.7. Працівник, який виявив порушення цих Правил або помітив несправність електроустановки, колективного або індивідуального засобу захисту, зобов'язаний повідомити про це свого безпосереднього керівника, а за його відсутності - керівника вищого рівня.

У тих випадках, коли несправність в електроустановці становить явну небезпеку для людей чи для самої установки, а усунути цю несправність може працівник, який її виявив, він повинен зробити це негайно за умови дотримання вимог правил безпеки, а потім повідомити про цей випадок безпосереднього керівника.

1.8. Керівники споживачів повинні забезпечити безперешкодний доступ на свої об'єкти посадових осіб органів державного нагляду та контролю, надання їм інформації і документів, необхідних для здійснення ними своїх повноважень та виконання виданих цими органами приписів у зазначені терміни.

1.9. Контроль і нагляд за виконанням вимог цих Правил, відповідно до своїх обов'язків, здійснюють спеціалісти енергослужби, служби охорони праці споживача та організацій вищого рівня.

1.10. Державний нагляд за виконанням вимог цих Правил відповідно до Закону України "Про електроенергетику" та Положення про державний енергетичний нагляд за режимами споживання електричної і теплової енергії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 07.08.96 N 929, із змінами та доповненнями, здійснюють Держенергонагляд.

2 Вимоги до працівників і їх підготовка

2.1. Обслуговування електроустановок споживачів, у тому числі виконання ремонтних, монтажних, налагоджувальних робіт і оперативних перемикань в електроустановках, повинні здійснювати спеціально підготовлені електротехнічні працівники, а саме: керівники і фахівці, оперативні, виробничі та оперативно-виробничі працівники.

2.2. Обслуговування установок електротехнологічних процесів (електрозварювання, електролізу, електротермії тощо) вантажопідіймальних механізмів, ручних електричних машин, переносних та пересувних струмоприймачів, складного енергонасиченого виробничо-технологічного обладнання, під час роботи якого необхідно постійно проводити технічний нагляд, зміну, коригування ведення технологічних режимів за допомогою штатних засобів регулювання електроапаратури, електроприводів, повинні здійснювати спеціально підготовлені електротехнологічні працівники, які мають навички та знання для безпечного виконання робіт з технічного обслуговування закріпленої за ними установки.

2.3. Перелік посад та професій електротехнічних та електротехнологічних працівників, яким необхідно мати відповідну групу з електробезпеки, затверджує роботодавець.

2.4. Електротехнологічні працівники виробничих цехів і дільниць, які здійснюють експлуатацію електротехнологічних установок, повинні мати групу з електробезпеки II і вище.

Керівники структурних підрозділів, яким безпосередньо підпорядковані електротехнологічні працівники, повинні мати групу з електробезпеки не нижчу, ніж у підлеглих працівників. Вони повинні здійснювати технічне керівництво цими працівниками і контроль за їхньою роботою.

2.5. Працівники, які обслуговують електроустановки споживачів або технологічні процеси, які базуються на використанні електричної енергії, повинні мати вік понад 18 років. При прийнятті на роботу, а також періодично стан здоров'я працівників повинен засвідчуватися медоглядом.

2.6. Роботодавець відповідно до ГНД 34.12.102-2004 та ДНАОП 0.00-4.12-05 з урахуванням місцевих умов та складу енергетичного обладнання повинен затвердити положення про навчання з питань технічної експлуатації електроустановок, охорони праці та про перевірку знань.

Навчання з технічної експлуатації електроустановок включає такі форми роботи з працівниками, що обслуговують електричні установки: проведення самого навчання з питань технічної експлуатації електроустановок, правил пожежної безпеки, перевірку знань з цих питань, а також інструктажі, стажування, дублювання, проведення аварійних тренувань та допуск до роботи.

2.7. Для виконання роботи в електроустановках, розміщених у вибухонебезпечних або пожежонебезпечних зонах, працівник повинен пройти спеціальне навчання за програмою пожежно-технічного мінімуму відповідно до НАПБ Б.02.005-2003. Порядок організації навчання визначається НАПБ Б 06.001-2003.

2.8. Електротехнічні та електротехнологічні працівники повинні проходити інструктажі. Залежно від характеру і часу проведення інструктажі поділяються на: вступний, первинний, повторний, позаплановий, цільовий.

За результатами проведеного інструктажу особа, яка інструктує (шляхом опитування), повинна переконатись, що працівник засвоїв питання, з яких проводився інструктаж.

Проведення інструктажів можна здійснювати разом з інструктажами з охорони праці і фіксувати у відповідному журналі.

Відповідальність за організацію та проведення інструктажів, усіх форм навчання та перевірки знань з питань технології робіт, пожежної безпеки та охорони праці покладається на роботодавця.

2.9. У процесі трудової діяльності працівники проходять такі види навчання з питань технічної експлуатації електроустановок: професійне навчання кадрів на виробництві, яке проводиться відповідно до Положення про професійне навчання кадрів на виробництві, затвердженого спільним наказом Міністерства праці та соціальної політики України і Міністерства освіти і науки України від 26.03.2001 N 127/151, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 06.04.2001 за N 315/5506; періодичне навчання в СНЗ; щорічне навчання на виробництві.

2.10. У кожного споживача для персоналу, який забезпечує виробничі процеси в електроенергетиці, повинні бути затверджені керівництвом план-графіки на проведення щорічного навчання на виробництві та періодичного навчання в СНЗ.

2.11. Особи, відповідальні за електрогосподарство, проходять не рідше одного разу на три роки періодичне навчання з питань технічної експлуатації електроустановок.

2.12. Щорічне навчання на виробництві проходять електротехнічні та електротехнологічні працівники, які зайняті на роботах з підвищеною небезпекою або там, де є потреба в професійному доборі.

2.13. Після закінчення навчання з питань технічної експлуатації електроустановок працівник повинен пройти перевірку знань з питань технології робіт, правил пожежної безпеки (далі - перевірка знань з технології робіт).

Результати перевірки знань з технології робіт заносяться в журнал установленої форми та підписуються всіма членами комісії. Якщо перевірка знань декількох працівників проводилась в один день і склад комісії не змінювався, то члени комісії можуть підписатися один раз після закінчення роботи комісії. При цьому необхідно вказати словами загальну кількість осіб, у яких перевірено знання з технології робіт.

2.14. Новопризначені працівники, що прийняті на роботу, пов'язану з обслуговуванням електроустановок, або при перерві в роботі понад один рік, проходять первинну перевірку знань.

Первинна перевірка знань працівників повинна проводитись у терміни, установлені програмами і планами їх підготовки.

Допускається при проведенні перевірки знань використання контрольно-навчальних засобів на базі персональних електронно-обчислювальних машин для всіх видів перевірок, з наступним усним опитуванням, окрім первинної. У цьому разі запис у журналі перевірки знань не відміняється.

2.15. Допускається не проводити перевірку знань з технології робіт у працівника, якого прийнято на роботу за сумісництвом з метою покладення на нього обов'язків особи, відповідальної за електрогосподарство, при одночасному виконанні таких умов:

- якщо з моменту перевірки знань у комісії за основним місцем роботи минуло не більше одного року;

- енергоємність електроустановок, їх складність в організації експлуатації електрогосподарства за сумісництвом не вища, ніж за місцем основної роботи.

2.16. У разі переходу на інше підприємство чи переведення на іншу роботу (посаду) у межах одного підприємства або у зв'язку з перервою в роботі особі з електротехнічних працівників, яка успішно пройшла перевірку знань, рішенням комісії може бути підтверджена та група з електробезпеки, яку вона мала до переходу або перерви в роботі.

2.17. Періодичність навчання та періодичної перевірки знань з питань технології робіт, правил пожежної безпеки та охорони праці (далі - перевірка знань) з присвоєнням відповідної групи з електробезпеки проводиться в такі терміни:

- первинне навчання та перевірка знань усіх працівників до початку виконання роботи;

- для працівників, які безпосередньо організовують та проводять роботи з оперативного обслуговування діючих електроустановок чи виконують у них налагоджувальні, електромонтажні, ремонтні, профілактичні випробування або експлуатують електроустановки у вибухонебезпечних, пожежонебезпечних зонах, - один раз на рік;

- для адміністративно-технічних працівників, які не належать до попередньої групи, а також для працівників з охорони праці, допущених до інспектування електроустановок, - один раз на три роки.

Перевірка знань з питань правил пожежної безпеки в працівників, які обслуговують електроустановки у вибухонебезпечних і пожежонебезпечних зонах, здійснюється один раз на рік, в інших випадках - один раз на три роки.

Забороняється допуск до роботи працівників, які не пройшли навчання та перевірку знань з питань технології робіт, правил пожежної безпеки, охорони праці, а також у разі закінчення терміну дії попередніх періодичних перевірок знань. Комісією з перевірок знань працівникові може бути присвоєна група з електробезпеки, яку він мав до перерви в роботі.

2.18. Позачергову перевірку знань працівнику здійснюють незалежно від терміну проведення попередньої перевірки знань у разі:

- уведення в дію нової редакції або перероблених правил;
- переведення працівника на іншу роботу або призначення на іншу посаду, що потребує додаткових знань;
- при перерві в роботі на даній посаді понад шість місяців;
- незадовільної оцінки знань працівника - у терміни, визначені комісією з перевірки знань, але не раніше ніж через два тижні;
- вимог органів Держенергонагляду та Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду (далі - Держгірпромнагляд).

2.19. Для проведення перевірки знань електротехнічного та електротехнологічного персоналу керівник споживача повинен своїм наказом призначити комісію з перевірки знань.

Головою комісії призначається керівник споживача або його заступник, до службових обов'язків яких входить організація роботи з питань технічної експлуатації електроустановок, охорони праці.

До складу комісії споживача з перевірки знань входять спеціалісти служби охорони праці, представники юридичних, виробничих, технічних служб, представник профспілки або вповноважена найманими працівниками особа з питань охорони праці.

Комісія вважається правочинною, якщо до її складу входять не менше трьох осіб.

У разі потреби створюються комісії в окремих структурних підрозділах, їх очолюють керівники відповідних підрозділів чи їх заступники.

2.20. Перевірку знань з питань технології робіт, правил пожежної безпеки та охорони праці проводять:

- 1) в особи, відповідальної за електрогосподарство споживача (головного енергетика), його заступника - комісія за участю керівника

споживача (його заступника) або комісія організації вищого рівня, інспектора Держенергонагляду, Держгірпромнагляду;

2) в осіб, відповідальних за електрогосподарство структурних виробничих підрозділів, - комісія за участю особи, відповідальної за електрогосподарство споживача. Склад комісії затверджує керівник споживача;

3) у решти працівників - комісія споживача або його підрозділів, склад яких визначає та затверджує керівник споживача, за участю особи, відповідальної за електрогосподарство споживача (підрозділу). До складу вказаних комісій, як правило, повинен уходити безпосередній керівник того працівника, чиї знання перевіряє комісія.

Члени комісій структурних підрозділів повинні пройти перевірку знань правил в центральній комісії споживача.

2.21. Споживачі, чисельність яких не дає змоги створити комісію з перевірки знань з питань технології робіт, перевірку знань проходять у комісії територіальних підрозділів Держенергонагляду.

У роботі такої комісії, як правило, бере участь керівник споживача, працівники якого проходять перевірку знань, або представники організацій вищого рівня.

Комісії для перевірки знань з питань технології робіт можуть також створюватись при СНЗ. Вони призначаються наказом (розпорядженням) керівника СНЗ за погодженням з відповідним територіальним підрозділом Держенергонагляду. Члени комісії повинні пройти перевірку знань в територіальному підрозділі Держенергонагляду. Головою комісії призначається старший державний інспектор з енергетичного нагляду.

2.22. Дозволяється проводити окремо перевірку знань, крім випадку, зазначеного в підпункті 1 пункту 5.2.20:

- з питань технічної експлуатації електроустановок, правил та інструкцій з пожежної безпеки за участю інспектора Держенергонагляду;

- з питань охорони праці та інших нормативних актів з охорони праці за участю інспектора Держгірпромнагляду.

У цьому випадку роблять окремі записи в журналі перевірки знань.

Право оперативних переговорів та оперативних перемикань надається особі, відповідальній за оперативну роботу споживача, при проведенні перевірки знань у комісії з перевірки знань за участю інспектора Держенергонагляду. Представник диспетчерської служби структурного підрозділу електропередавальної організації може брати участь у роботі цієї комісії.

2.23. Перевірка знань кожного працівника здійснюється індивідуально. Результати перевірки оформляються протоколом та записуються у журнал установленої форми. Записи оформляються окремо з питань технології робіт, правил пожежної безпеки та охорони праці за підписом усіх членів комісії.

Керівники споживачів наприкінці року повинні подавати до інспекції Держенергонагляду графік перевірки знань електротехнічних працівників на наступний рік.

Про дату перевірки знань представники інспекцій повинні бути повідомлені споживачем не пізніше ніж за 20 днів до її початку.

2.24. Споживачі, які не мають можливості проводити навчання безпосередньо у себе та створити комісію з перевірки знань з технології робіт, проходять навчання в навчальних закладах та установах, які отримали відповідне рішення Держенергонагляду на проведення навчання з питань технології робіт. Перевірка знань з технології робіт таких посадових осіб проводиться комісією, створеною Держенергонаглядом.

У роботі такої комісії, як правило, бере участь керівник споживача, працівники якого проходять перевірку знань, або представники організації вищого рівня.

Перевірка знань осіб, відповідальних за електрогосподарство споживачів, незалежно від форм власності та відомчої підпорядкованості, допускається в комісії підприємств вищого рівня або засновників.

2.25. Після успішної перевірки знань працівник допускається до стажування тривалістю 2 - 15 змін і дублювання на робочому місці у відповідності до вимог ГНД 34.12.102-2004.

Допуск оформлюється наказом або розпорядженням керівника споживача (структурного підрозділу) з визначенням тривалості стажувань та призначенням працівника, відповідального за стажування.

2.26. Стажування проводиться під час спеціальної підготовки та під час підготовки на нову посаду. У процесі стажування працівник повинен:

- закріпити знання щодо правил технічної експлуатації електрообладнання, правил безпечної експлуатації технологічного обладнання та пожежної безпеки, технологічних і посадових інструкцій, інструкцій з охорони праці;
- оволодіти навичками орієнтування у виробничих ситуаціях у нормальних і аварійних умовах;
- засвоїти в конкретних умовах технологічні процеси та методи безаварійного керування обладнанням з метою забезпечення вимог технічної експлуатації, безпеки праці та економічної експлуатації устаткування, що обслуговується.

2.27. Керівник споживача або структурного підрозділу може звільняти від стажування працівника, що має стаж за фахом не менше трьох років, що переходить з одного робочого місця на інше, де характер його роботи і тип устаткування, на якому він працюватиме, не змінюються.

Тривалість стажування працівника встановлюється індивідуально в залежності від його рівня професійної освіти, досвіду роботи, професії (посади).

Після закінчення стажування і перевірки знань ремонтні працівники допускаються до самостійної роботи, а оперативні - до дублювання.

Тривалість дублювання на робочому місці встановлюється рішенням комісії з перевірки знань і залежить від кваліфікації працівника та складності обладнання, яке він обслуговуватиме, але не менше шести змін.

2.28. Під час дублювання особа, що навчається, може робити оперативні перемикання або інші роботи в електроустановці тільки з дозволу і під наглядом відповідального працівника, який її навчає.

Відповідальним за правильність дій дублера і дотримання ним нормативних документів та інструкцій є як працівник, який навчає, так і сам дублер.

2.29. На підприємстві під керівництвом особи, відповідальної за електрогосподарство, електротехнічні працівники повинні проходити протиаварійні тренування на робочих місцях і відпрацьовувати способи та прийоми запобігання порушенням у роботі обладнання та швидкої ліквідації несправностей і аварій.

2.30. Керівники спеціалізованих організацій, персонал яких виконує технічне обслуговування і експлуатацію електроустановок споживачів чи проводить у них монтажні, налагоджувальні, ремонтні роботи, випробовування і профілактичні вимірювання за договором, повинні проходити перевірку знань відповідно до вимог цих Правил.

2.31. Навчання та перевірка знань працівників навчальних закладів, які організовують та проводять навчання з використанням електричного обладнання, здійснюється згідно з вимогами цих Правил та нормативних документів, діючих у відповідній галузі.

2.32. Відповідальними за своєчасну перевірку знань в електротехнічних та електротехнологічних працівників є керівники підрозділів споживача, у підпорядкуванні яких перебувають ці працівники.

ДОДАТОК В

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____