

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

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

Кваліфікаційна робота
бакалавра

на тему Дослідження аварійних та несиметричних режимів роботи
електричної мережі

Виконав студент 3 курсу, групи ЕЛКп-21
(шифр групи)

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

та електромеханіка»

_____ **Кирило ТАРАНУХА**

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник _____ **ст.викл. Е. НЕМЦЕВ**

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

_____ (підпис)

Рецензент _____

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

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ **Е. НЕМЦЕВ**

_____ (підпис)

_____ (дата)

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

Студент _____

_____ (підпис)

_____ (дата)

ЛУЦЬК – 2024

**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)

« _____ » _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кирилу ТАРАНУСИ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Дослідження аварійних та несиметричних режимів роботи електричної мережі

керівник роботи Едуард НЄМЦЕВ, ст.викл.

(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 15 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: _____

Схема електричної мережі. Характеристики генераторів: номінальна потужність – 60 МВт, номінальна напруга – 10,5кВ, коефіцієнт навантаження – 0,87, значення опорів – 0,20 Ом, 0,25 Ом, 0,80 Ом, 0,25 Ом; питомий опір лінії електропередач – 0,35 Ом/км. Типи застосованих трансформаторів: ТРДЦН-100000/220, ТРДЦН-160000/220, ТРДЦН-63000/220, АОДЦТН-267000/500/220 (2 шт.), ТДТНЖ-40000/220. Довжини ліній електропередач: 50 км, 20 км, 60 км, 280 км (дві ділянки), 190 км (дві ділянки). Базисна потужність – 1000 МВА, базисна напруга – 230 кВ, потужність короткого замикання на шинах системи – 1000 МВА.

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

1. Огляд загальних відомостей про аварійні та несиметричні режими роботи електричних мереж.

2. Теоретичний огляд аварійних та несиметричних режимів роботи електричних мереж.

3. Розрахунок параметрів електричної мережі.

4. Моделювання аварійних та несиметричних режимів роботи електричної мережі.

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

Десять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 5	Е. НЄМЦЕВ, ст. викл.		
Нормоконтроль	Е. НЄМЦЕВ, ст. викл.		

7. Дата видачі завдання 6 травня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	06.05.24 – 15.05.24	
2.	Розділ 2	16.05.24 – 25.05.24	
3.	Розділ 3	26.05.24 – 04.06.24	
4.	Розділ 4	05.06.24 – 14.06.24	

Студент _____
(підпис)

Кирило ТАРАНУХА
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Едуард НЄМЦЕВ
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Кирило ТАРАНУХА. Дослідження аварійних та несиметричних режимів роботи електричної мережі / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2024.

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

У першому розділі здійснено огляд загальних відомостей про аварійні та несиметричні режими роботи електричних мереж.

У другому розділі було здійснено теоретичний огляд аварійних та несиметричних режимів роботи електричних мереж.

У третьому розділі здійснено розрахунок параметрів електричної мережі.

У четвертому розділі було здійснено моделювання аварійних та несиметричних режимів роботи електричної мережі.

Ключові слова: аварійний режим, несиметричний режим, аварійна ситуація, електрична мережа, діагностика стану, асиметричний режим, показник надійності, флікер, моделювання

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АВАРІЙНІ ТА НЕСИМЕТРИЧНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	9
1.1 Технічний контекст виникнення аварійних ситуацій в електричних мережах	9
1.2 Сучасний стан та проблемні питання	12
1.3 Питання, що мають бути розглянуті під час здійснення досліджень стану електричних мереж	14
1.4 Визначення цілей дослідження	17
1.5 Ключові питання і гіпотези для подальшої розробки	20
2 ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД АВАРІЙНИХ ТА НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	22
2.1 Огляд типів аварійних та несиметричних режимів роботи електричних мереж	22
2.2 Методи діагностики стану електричних мереж	23
2.3 Проблемні питання та обмеження при дослідженні станів електричних мереж	26
2.4 Оцінка впливу асиметричних режимів на показники надійності систем розподілу електричної енергії	30
2.5 Огляд літературних джерел по темі дослідження	32
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ	36
4 МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ ТА НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ	43
4.1 Визначення аварійних та несиметричних режимів роботи електричних мереж	43

	6
4.2 Моделювання падіння напруги	44
4.3 Моделювання флікера напруги	48
ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	53
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	56
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	61

ВСТУП

Галузь електроенергетики по суті займається оптимізацією та обслуговуванням електричних систем для забезпечення їх надійної роботи. Діагностика аварійних ситуацій та несиметричних режимів роботи мереж є фундаментальним аспектом зазначеної оптимізації, оскільки вона безпосередньо впливає на стабільність, продуктивність і безпеку функціонування системи. Шляхом удосконалення діагностичних технологій і методологій вирішуються ключові проблеми, з якими можуть стикатися інженери-електрики.

Дослідження в області розробки та впровадження методів діагностики аварійних та несиметричних режимів у електричних мережах мають важливе значення для галузі електроенергетики та можуть суттєво вплинути на галузеву практику.

Здійснення таких досліджень дозволить усунути критичні прогалини в поточних можливостях діагностики, пропонуючи інноваційні рішення, які можуть підвищити надійність, ефективність і безпеку роботи електричних мереж. Отримані результати сприятимуть прогресу як в академічних, так і в промислових умовах, впливаючи на те, як електричні мережі управляються та обслуговуються.

Одним із основних напрямків на цьому шляху є розробка вдосконалених діагностичних алгоритмів, які використовують найсучасніші методи, такі як машинне навчання, аналіз даних і штучний інтелект. Ці алгоритми покращують здатність виявляти, ідентифікувати та локалізувати несправності в електричних мережах з більшою точністю та швидкістю, ніж традиційні методи. Покращуючи виявлення та локалізацію несправностей, мінімізується час простою, зменшуються витрати на технічне обслуговування та досить часто вдається запобігти переростанню несправностей у більші аварійні стани.

Мета роботи – здійснити дослідження діагностики аварійних та несиметричних режимів роботи електричних мереж.

Завдання роботи:

- здійснити огляд основних компонентів та принципів роботи електричних мереж,
- дослідити технічний контекст виникнення аварійних ситуацій в електричних мережах,
- визначити методи діагностики та захисту від впливу аварійних та несиметричних режимів на роботу електричної мережі,
- здійснити огляд сучасного стану та проблемних питань діагностики аварійних режимів,
- дослідити вплив роботи споживачів на появу несиметрії та якість електричної енергії,
- розрахувати параметри електричної мережі в умовах аварійних та несиметричних режимів,
- здійснити моделювання роботи системи електропостачання з дослідженням аварійних та несиметричних режимів..

Об’єкт досліджень – електричні мережі змінного струму.

Предмет досліджень – діагностичні параметри аварійних та несиметричних режимів роботи електричної мережі.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АВАРІЙНІ ТА НЕСИМЕТРИЧНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

1.1 Технічний контекст виникнення аварійних ситуацій в електричних мережах

Розвиток та формування електричних мереж має вирішальну роль у забезпеченні промислової інфраструктури, забезпечує основу для економічної діяльності, можливості здійснення промислових операцій та вимог життєдіяльності. Електричні мережі є складними структурами і схильні до різних аварійних ситуацій, які можуть порушити нормальне функціонування, спричинити значні економічні втрати та створити загрозу безпеці. Розуміння контексту виникнення аварійних ситуацій має вирішальне значення для розробки надійних діагностичних та профілактичних заходів [1].

Ранні електричні мережі були локальними утвореннями, характеризувались обмеженими можливостями і елементарними механізмами захисту, були схильними до частих відмов та аварій, що характеризувалися короткими замиканнями, перевантаженнями та несправностями обладнання. Ці інциденти визначили необхідність створення більш надійних та відмовостійких електричних систем. За мірою того, як електричні мережі розширювалися та з'єднувалися між собою, зростала ймовірність виникнення більш серйозних та широкомасштабних надзвичайних та аварійних ситуацій. Широке впровадження систем змінного струму полегшило передачу електричної енергії на значні відстані та створення централізованих електричних станцій. Це викликало появу нових проблем – збільшення ризику каскадних збоїв, коли проблема в одній частині мережі могла поширюватися і загострюватися, що може призвести до каскадного же припинення електропостачання. Такі події підкреслюють вразливість взаємопов'язаних мереж та необхідність у

застосуванні більш складних систем діагностики та захисту. Це також стимулювало розвиток нормативної та технологічної бази, дотримання яких спрямовано на підвищення стабільності роботи мереж та швидкого реагування на надзвичайні та аварійні ситуації [1].

У поточному столітті спостерігається подальший прогрес у проектуванні та управлінні електричними мережами, зумовлений інтеграцією відновлюваних джерел енергії, появою технологій інтелектуальних мереж та складністю сучасних електричних мереж, яка безупинно зростає. Ці досягнення також призвели до появи нових типів уразливостей, ускладнила управління мережами та створила нові потенційні місця можливих відмов [1].

Як відповідь на виникнення цих проблеми значно просунулись методи та способи діагностики електричних мереж. Сучасні методи діагностики використовують складні алгоритми, аналіз даних у реальному часі та методи машинного навчання, що дозволяє виявляти та прогнозувати потенційні збоїв до того, як вони переростуть у повномасштабні аварійні ситуації. Ці методи спрямовані на підвищення стійкості електричних мереж, забезпечення надійного та безперервного електропостачання навіть за наявності потенційних загроз. Історичний контекст виникнення надзвичайних та аварійних ситуацій в електричних мережах визначає зростаючі складності та особливості функціонування як самих мереж, так і методів, що використовуються для діагностики та управління зазначеними ситуаціями. Ці перспективи забезпечують основу для розробки та впровадження передових методів діагностики, які можуть ефективно вирішувати різноманітні проблеми сучасних електричних мереж [2].

Діагностика аварійних ситуацій в електричних мережах є важливою складовою забезпечення надійності, безпеки та ефективності функціонування енергетичних систем. Електричні мережі являють собою складну інфраструктуру, необхідну для можливості надійного функціонування сучасних підприємств. Важливість діагностики аварійних

ситуацій у цих мережах важко переоцінити, оскільки це безпосередньо впливає на стабільність електропостачання, запобігає значним пошкодженням і захищає життя і здоров'я обслуговуючого персоналу. Надзвичайні та аварійні ситуації в електричних мережах можуть виникати з багатьох причин: стихійні лиха, збої в роботі обладнання, помилки в керуванні та інше. Зазначені ситуації можуть проявлятися у вигляді коротких замикань, перевантажень, провалів напруги, відхилень частоти та повного відключення системи. Основною метою діагностики таких ситуацій є виявлення, ідентифікація та швидке реагування на ці інциденти для того, щоб мінімізувати їх несприятливі наслідки. Ефективна діагностика передбачає моніторинг параметрів мережі в реальному часі, точне визначення місць виникнення несправностей та швидке запровадження заходів щодо усунення несправностей [2].

Важливість здійснення діагностики аварійних ситуацій є попередження каскадних відмов у взаємопов'язаних електричних системах, коли одна несправність може поширюватися системою, що призводить до масових відключень і значних економічних втрат. Каскадні збої можуть виникати, коли захисні пристрої, такі як автоматичні вимикачі та реле, не спрацьовують або коли між ними відсутня чи порушена координація. Швидке виявлення цих початкових несправностей дозволяє операторам мереж ізолювати уражені ділянки та запобігати подальшому погіршенню стану живлення в мережі.

Важливість діагностики аварійних ситуацій в електричних мережах є багатогранною, охоплює попередження каскадних відмов, підтримку надійності живлення, захист безпеки та оптимізацію економічної ефективності. Оскільки електричні мережі продовжують розвиватися з інтеграцією відновлюваних джерел енергії та інтелектуальних мереж, потреба у складних діагностичних методах стає все більш критичною. Забезпечення своєчасної та точної діагностики аварійних ситуацій є основою для забезпечення стійкості сучасних енергосистем, що

підкреслює важливу роль діагностики в управлінні електричними мережами.

1.2 Сучасний стан та проблемні питання

Діагностики аварійних станів та несиметричних режимів у електричних мережах стикається з численними проблемами та викликами, які необхідно враховувати та усувати для підвищення надійності, безпеки та ефективності енергосистем. Це вимагає вивчення технологічних, операційних та нормативних обмежень. Розуміння та вирішення цих питань має вирішальне значення для вдосконалення методів діагностики та забезпечення надійності сучасних електричних мереж [2].

Однією з головних проблем є зростання складності електричних мереж. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, розподіленої генерації та інтелектуальних мереж перетворила традиційні енергетичні системи на високодинамічні та складні осередки. Ця складність створює виникнення нових місць можливих збоїв та вимагає застосування передових інструментів діагностики, здатних впоратися з мінливістю та інформаційною невизначеністю, що потребує здійснення моніторингу в реальному часі та впровадження механізмів швидкого реагування. Іншою вирішуваною проблемою є старіння інфраструктури та агрегатів багатьох електричних мереж. У більшості регіонів нашої країни значна частина інфраструктури електромережі функціонує вже кілька десятиліть, що може призвести до підвищення вразливості до збоїв і перевантажень. Застаріле обладнання (трансформатори, вимикачі, роз'єднувачі та лінії електропередач) працюють вже понад запланований термін їх служби, що призводить до виникнення значної кількості відмов. Діагностика наявних проблем у цих застарілих компонентах ускладнюється відсутністю

сучасних можливостей моніторингу та діагностики обладнання в «старих» системах [3].

Поява та широке впровадження технологій розумних електромереж призвела до формування великих обсягів даних від датчиків, розумних лічильників та інших пристроїв моніторингу. Не дивлячись на те, що ці дані містять потенціал для підвищення точності діагностики та прогнозованого обслуговування, вони також створюють значні проблеми з точки зору зберігання, обробки та аналізу. Ефективна робота з великими даними та отримання корисної інформації вимагає розширеної аналітики, алгоритмів машинного навчання та надійних систем керування даними, які все ще розвиваються та інтегруються в практичні програми. Традиційні методи діагностики часто покладаються на періодичні перевірки та обслуговування на основі поточного стану, що може призвести до затримки реагування на несправності та підвищення експлуатаційних ризиків. Розробка та впровадження діагностичних систем у режимі реального часу, що здатні безперервно контролювати стан мережі та прогнозувати можливі збої, є важливими для проактивного обслуговування та підвищення надійності роботи електропостачальних систем.

Координація між різними споживачами (підприємствами, операторами електромереж, регулюючими та контролюючими органами) є досить важливою для ефективного реагування на надзвичайні ситуації. Однак відмінності в стандартах, протоколах і каналах зв'язку можуть перешкодити даній координації. Розробка стандартизованих діагностичних процедур і поширення співпраці між усіма зацікавленими сторонами є необхідними кроками для вирішення цих зазначених проблем.

Іншою проблемою може бути відсутність необхідної кількості працівників та відсутності у них відповідного досвіду, який конче потрібен для здійснення належного управління та діагностики аварійних та несиметричних режимів у сучасних електричних мережах. Швидкий

розвиток технологій вимагає від працівників умінь та навичок не лише з традиційної електротехніки, але й з універсальних шляхів аналітики даних, кібербезпеки та передових інструментів здійснення діагностики станів. За цих вимог зростає потреба в створенні спеціалізованих програм навчання, що здатні «озброїти» обслуговуючий персонал усіма необхідними навичками та знаннями для вирішення цих нових викликів.

Отже, можна констатувати, що діагностика аварійних та несиметричних режимів у електричних мережах стикається з численними поточними проблемами та недоліками, які повинні бути усунені для підвищення стійкості та ефективності роботи енергосистем. Серед них можна відзначити: складність сучасних мереж, застаріла інфраструктура, проблеми з належним керуванням даними, оперативна координація, нормативні невідповідності, недостатність знань в обслуговуючого персоналу та високій ступінь необхідності забезпечення діагностики в реальному часі. Вирішення цих проблем вимагає узгоджених зусиль усіх зацікавлених сторін, включаючи промисловість, наукові кола та регуляторні органи, що дозволить розробити та впровадити передові діагностичні методи і технології.

1.3 Питання, що мають бути розглянуті під час здійснення досліджень стану електричних мереж

Дослідження, які проводяться в рамках розробки та впровадження методів діагностики аварійних та несиметричних режимів в електричних мережах зумовлені рядом специфічних проблем, які перешкоджають надійності та ефективності функціонування енергосистем. Зазначені питання охоплюють технологічні, експлуатаційні та методологічні аспекти, створюючи нагальну потребу в розробці та використанні

інноваційних рішеннях для покращення виявлення, ідентифікації та управління несправностями, аварійними та несиметричними режимами в електричних мережах [4].

Основною проблемою на цьому шляху може бути обмеженість можливостей діагностики при роботі в реальному часі для існуючих електричних мереж. Традиційні методи часто покладаються на періодичні перевірки та «ручний» моніторинг, що може призвести до затримки виявлення та реагування на несправності. Це відставання може посилити серйозність шкоди від аварійних ситуацій, що призведе до тривалих відключень та зростанні вірогідності ушкодження інфраструктури. У даному дослідженні буде розроблено діагностичну систему, яка у режимі реального часу з використанням передових технологій та аналітики даних для здійснення постійного моніторингу стану мережі та виявлення аномальних станів (аварій та несиметрії) за мірою їх виникнення [5].

Іншим критичним питанням, що потребує розробки та впровадження, є точність і надійність методів визначення місць ушкодження. Сучасні методи діагностики не здатні здійснити визначення точних місць виникнення несправностей у складних мережах. Точна локалізація місць виникнення несправностей має важливе значення для мінімізації впливу надзвичайних ситуацій і сприяє швидкому відновленню роботи мережі. Для цього необхідно вивчити інноваційні алгоритми та технології, такі як машинне навчання та розпізнавання образів, які дозволяють підвищити точність визначення місць ушкодження в електричних мережах [5].

Інтеграція та сумісність діагностичних засобів також може створити значні проблеми. Електричні мережі складаються з різних компонентів, кожен з яких може мати свої діагностичні системи та протоколи керування. Наявні невідповідності можуть створити проблеми сумісності, перешкодити повній інтеграції діагностичних даних та діагностичних інструментів. Вирішення цієї проблеми можна здійснити шляхом розробки стандартних протоколів і сумісних діагностичних систем, які можуть

ефективно взаємодіяти та працювати в різних мережевих середовищах. Істотним фактором виникнення та поширення аварійних ситуацій в електричних мережах був і залишається «людський фактор». Експлуатаційні помилки, неправильне налаштування захисних пристроїв та невідповідний ступінь технічного обслуговування можуть призвести до різноманітних збоїв та аварій. Зазначене вимагає врахування «людського фактору» у діагностичну структуру та автоматизовані системи, які можуть зменшити залежність від необхідності «ручного» втручання та керування та забезпечити підтримку прийняття рішень операторами, тим самим пом'якшуючи наслідки від зазначених факторів [6].

Електричні мережі піддаються динамічним змінам навантаження, умов навколишнього середовища та конфігурацій. Діагностичні системи мають бути стійкими до цих змін, щоб забезпечити надійну роботу за всіх можливих сценаріїв. Це можна забезпечити шляхом впровадження принципів адаптації діагностичних методів, які можуть пристосовуватися до мінливих умов і підтримувати високу точність і надійність роботи електричних мереж. Оскільки розмір і складність електричних мереж зростають, діагностичні системи повинні також відповідно масштабуватися, щоб мати змогу обробляти збільшені обсяги даних. Існуючим пристроям діагностування важко підтримувати свою продуктивність у великих мережах, що призводить до наявності «сліпих» зон і збоїв, що є «важкими» для виявлення [6].

Нарешті, суттєвим «бар'єром» залишається економічна доцільність впровадження передових методів діагностики. Незважаючи на те, що інноваційні технології пропонують значні переваги, їх впровадженню може перешкоджати висока вартість і вимоги до застосованих ресурсів. Підприємства можуть неохоче інвестувати в нові діагностичні системи без чітких доказів їх економічної ефективності та повернення вкладених інвестицій. Комплексні дослідження цього питання повинні бути направлені на проведення аналіз витрат і прибутків, продемонструвати

економічні переваги передових методів діагностики та забезпечити переконливі аргументи для їх доцільного впровадження.

Отже, дослідження питань діагностики аварійних та несиметричних режимів в електричних мережах повинні бути направлені на вирішення конкретних проблем, які визначають їх ефективність. При цьому необхідно зосередитись на діагностиці стану мереж в режимі реального часу, забезпеченні точності визначення місця виникнення несправності, інтеграцію та сумісність в існуючі мережі, врахуванні «людського фактору», однозначної надійності за умов відповідної до розширення мереж масштабованості та економічної доцільності. Це вимагає здійснення комплексних досліджень, спрямованих на розробку рішень, які підвищують надійність, безпеку та ефективність функціонування електричних мереж.

1.4 Визначення цілей дослідження

Дослідження з розробки та впровадження методів діагностики аварійних та несиметричних режимів роботи електричних мереж спрямовуються на вирішення кількох найважливіших завдань. Ці цілі можна розділити на основні та вторинні, кожна з яких спрямована на конкретні аспекти підвищення надійності, ефективності та безпеки електричних мереж.

Основна мета зосереджується на основних питаннях виявлення несправностей, діагностики та реагування на стани в електричних мережах. Її досягнення покликане вирішити найнагальніші виклики та забезпечити прогрес у діагностичних методологіях.

Мета 1 – «Розробка розширених діагностичних алгоритмів», здатних точно виявляти та ідентифікувати несправності в електричних мережах. Ці

алгоритми повинні використовувати найсучасніші методи аналізу даних, машинного навчання та штучного інтелекту, здатних аналізувати данні у реальному часі та визначати характер й місцезорозташування виникнення несправностей з високою точністю.

Мета 2 – «Покращення можливостей моніторингу в реальному часі», що вимагає інтеграцію передових технологій датчиків і систем зв'язку для постійного моніторингу критичних параметрів електричної мережі. Досягнення даної мети гарантує, що будь-які відхилення від нормальних робочих умов виявляються негайно, що дозволяє здійснити оперативне втручання.

Мета 3 – «Удосконалення методів локалізації несправностей», що має вирішальне значення для здійснення технічного обслуговування та ефективного і своєчасного ремонту. Вдосконалення існуючих методів пошуку несправностей у мережі дозволить скоротити час, необхідного для виявлення несправних компонентів, та мінімізувати час простою.

Мета 4 – «Розробка надійної діагностичної інфраструктури», яка має змогу надійно працювати за різних умов і конфігурацій мережі, мають змогу адаптуватися до різних типів електричних мереж і здатні впоратися зі складнощами, що виникають.

Мета 5 – «Інтеграція автоматизованих систем реагування», які дозволять мінімізувати вплив «людських» помилок та зменшити час реагування, автоматично ізолювати несправності, змінювати конфігурацію мережі та ініціювати коригувальні дії без «ручного» втручання, таким чином підвищуючи загальну стійкість мережі.

Додаткові цілі, які можуть бути досягнені для підтримки основних цілей шляхом розгляду додаткових факторів, які сприяють ефективній діагностиці та управлінню аварійними ситуаціями в електричних мережах. Дані цілі охоплюють конкретні цілі, спрямовані на покращення різних аспектів діагностичних процесів і результатів.

Додаткова ціль 1 – «Оцінка економічної доцільності», яка включає проведення комплексного аналізу витрат і прибутків для оцінки фінансового впливу впровадження нових технологій і систем, продемонструвати, що довгострокові переваги, такі як скорочення часу простою та витрат на обслуговування, переважають початкові інвестиції.

Додаткова ціль 2 – «Розробка сумісних діагностичних систем», яка полягає в розробці діагностичних систем, які є сумісними з існуючою мережевою інфраструктурою, створення стандартизованих протоколів та інтерфейсів, які забезпечують інтеграцію нових діагностичних інструментів у поточні системи.

Додаткова ціль 3 – «Проведення натурних випробувань», щоб мати змогу забезпечити практичну застосовність розроблених діагностичних методів, що передбачає розгортання інструментів діагностики в реальних мережових середовищах, моніторинг їх продуктивності та внесення необхідних коригувань на основі отриманих результатів.

Додаткова ціль 4 – «Поширення співпраці та обміну знаннями з іншими розробниками», що включає в себе організацію семінарів і конференцій для поширення результатів досліджень, обміну найкращими практиками та сприяння впровадженню передових методів діагностики.

Додаткова ціль 5 – «Забезпечення навчання обслуговуючого персоналу новим методам діагностики», що включає в себе розробку навчальних програм і навчальних матеріалів, які охоплюють принципи, методи та застосування розширеної діагностики.

Зосереджуючись на розробці передових діагностичних алгоритмів, покращенні моніторингу в режимі реального часу, покращенні локалізації несправностей, інтеграції автоматизованих систем реагування та розгляді економічної доцільності, сумісності, натурної перевірки, співпраці та навчання, майбутні дослідження повинні бути спрямовані на значне просування способів діагностики електричних мереж для сприяння загальній надійності та стійкості енергосистем.

1.5 Ключові питання і гіпотези для подальшої розробки

Дослідження щодо розробки та впровадження методів діагностики аварійних та несиметричних режимів в електричних мережах обумовлені кількома ключовими питаннями. Ці запитання призначені для того, щоб спрямовувати дослідження та зосередитись на вирішенні основних проблем, що наявні в цій галузі.

Серед ключових питань, на які необхідно дати відповіді до початку дослідження, можна виділити:

- Які алгоритми для оперативного виявлення несправностей в електричних мережах є найефективнішими?
- Яким чином можна вдосконалити методи локалізації несправностей, щоб підвищити точність і швидкість визначення місць їх виникнення?
- Які ключові фактори впливають на надійність діагностичних систем за різних умов експлуатації?
- Як можна інтегрувати діагностичні системи з автоматичними механізмами реагування, щоб покращити час реагування на аварійні ситуації?

Серед основних гіпотез на можна виділити:

- Гіпотеза 1: вдосконалені алгоритми машинного навчання можуть значно підвищити точність і швидкість виявлення несправностей в електричних мережах.
- Гіпотеза 2: інтеграція до існуючих систем засобів моніторингу для їх роботи в реальному часі з можливістю адаптації підвищує надійність виявлення несправностей у динамічних умовах розвитку та функціонування електричних мереж.
- Гіпотеза 3: автоматизовані системи реагування, інтегровані у мережі у поєднанні з діагностичними інструментами, можуть скоротити час виявлення несправності з можливістю здійснення своєчасного ремонту.

– Гіпотеза 4: економічні вигоди від впровадження передових методів діагностики переважають початкові інвестиційні витрати протягом кількарічного періоду.

Наступні дослідження з діагностики аварійних та несиметричних режимів у електричних мережах керуються ключовими питаннями, які стосуються ефективності, надійності, інтеграції, економічних наслідків у залежності від застосованих методів діагностики. Виведені гіпотези можуть забезпечити структуровану основу для дослідження цих питань.

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД АВАРІЙНИХ ТА НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

2.1 Огляд типів аварійних та несиметричних режимів роботи електричних мереж

Електричні мережі містять системи генерації, передачі та розподілу та критично важливою інфраструктурою, яка вимагає постійного моніторингу та обслуговування для забезпечення надійного та безперервного електропостачання. Аварійні ситуації та несиметричні режими роботи електричних мереж можуть порушити це постачання, що призведе до значних економічних, соціальних і технічних наслідків [7].

Надзвичайні (аварійні) ситуації в електричних мережах визначаються як несподівані та несприятливі події, що порушують нормальну роботу електричної системи. Ці події можуть виникати з різних джерел, включаючи технічні збої, стихійні лиха, «людські» помилки та зловмисні дії. Основними видами аварійних ситуацій в електричних мережах є [7]:

- технічні збої, які включають несправності обладнання, перевантаження системи та збої компонентів. Поширеними технічними несправностями є несправності трансформаторів, несправності автоматичних вимикачів та ліній живлення. Такі збої можуть призвести до часткового або повного відключення електроенергії, зниження якості електроенергії та потенційного пошкодження інших компонентів мережі,

- стихійні лиха – такі природні явища, як шторми, урагани, землетруси, повені та удари блискавок, можуть завдати значної шкоди електричній інфраструктурі. Ці події можуть «повалити» опори електропередач, затопити підстанції та пошкодити цілісність ліній електропередачі, що призведе до суттєвого порушення електропостачання і потребує значних зусиль для відновлення,

- «людські» помилки – експлуатаційні помилки, неналежне технічне обслуговування та неналежне компонування системи можуть призвести до аварійних ситуацій,

- фізичні впливи – навмисні фізичні втручання в електричну інфраструктуру (вандалізм, тероризм та інші), можуть завдати значної шкоди та порушити електропостачання. Ці атаки можуть бути спрямовані на особливо критичні компоненти – підстанції, лінії електропередач або центри управління.

Вирішення зазначених проблем вимагає постійного удосконалення діагностичних інструментів, надійної інфраструктури та комплексних стратегій реагування на надзвичайні ситуації для забезпечення стійкості та надійності функціонування електричних мереж.

2.2 Методи діагностики стану електричних мереж

Надійність і ефективність електричних мереж значною мірою залежать від здатності діагностувати та оперативно усувати несправності. Методи діагностики в електричних мережах значно еволюціонували з часом, переходячи від традиційних методик до сучасних, технологічно прогресивних рішень.

Традиційні методи діагностики в електричних мережах переважно спиралися на періодичні перевірки, ручне тестування та евристичні підходи. Хоча ці методи є досить перевіреними, вони мають ряд обмежень щодо точності, часу відгуку та здатності працювати зі складними умовами мережі [8]:

- візуальний огляд,
- планове технічне обслуговування,
- «ручне» тестування,

- використання захисних пристроїв,
- широке використання реєстраторів подій.

Удосконалення технологій призвело до розробки сучасних методів діагностики, які пропонують підвищену точність, можливості збирання даних та їх аналізу в реальному часі та більшу адаптивність. Ці методи використовують складні алгоритми, вдосконалені датчики та системи цифрового зв'язку, щоб забезпечити комплексні рішення для моніторингу та діагностики [9]:

- моніторинг фазових значень напруг і струмів,
- впровадження машинного навчання та штучного інтелекту,
- використання «розумних» датчиків та «Інтернету речей»,
- використання безпілотних літальних апаратів та робототехнічних пристроїв,
- використання «цифрових» двійників,
- розширена аналіз електричних сигналів,
- застосування принципів кібернетичних систем,
- впровадження систем прогностичного технічного обслуговування.

Перехід від традиційних методів діагностики до сучасних методів і технологій значно покращила здатність виявляти, діагностувати та реагувати на несправності в електричних мережах. Традиційні методи, хоч і були основою, були обмежені через їх періодичний характер і відсутність можливостей аналізу стану в режимі реального часу. Сучасні методи діагностики, які використовують досягнення в області штучного інтелекту, Інтернету речей, використанні «розумних» датчиків та інших технологій, пропонують моніторинг у реальному часі, прогностичну аналітику та підвищену точність визначення небажаних станів. Останнє має вирішальне значення для забезпечення надійності, ефективності та безпеки сучасних електричних мереж, відповідаючи на зростаючу складність і вимоги сучасних енергосистем.

За останні роки в галузі методів діагностики електричних мереж відбувся значний прогрес, що зумовлено зростаючою складністю та критичною важливістю цих мереж. Дослідники зосередилися на розробці більш точних, ефективних діагностичних інструментів у реальному часі для забезпечення надійності та стабільності роботи систем електропостачання.

Численні дослідження продемонстрували ефективність машинного навчання та штучного інтелекту для виявлення та прогнозування несправностей. Моделі глибокого навчання використовуються для аналізу великих наборів даних роботи електричних мереж та виявлення аномалій, що вказують на потенційні несправності. Нейронні мережі мають точно класифікувати типи несправностей і місця їх розташування в складних електромережах, значно скоротити час, необхідний для здійснення діагностики несправностей. Інтеграція розумних датчиків дозволить безперервно контролювати електричні параметри, надаючи дані в реальному часі для діагностики, прогнозувати збої та покращити якість прогнозного технічного обслуговування та зменшення кількості несподіваних відключень. Досягнення в обробці сигналів покращили виявлення рідких на важких для визначення аномалій у вимірних електричних сигналах. Для виявлення та класифікації несправностей із високою точністю можуть бути застосовані методи вейвлет-перетворення, які дозволяють аналізувати гармонійні спотворення та перехідні процеси, дозволяючи покращене виявлення несправностей у мережах [10].

2.3 Проблемні питання та обмеження при дослідженні станів електричних мереж

Незважаючи на значні досягнення, у поточних дослідженнях методів діагностики електричних мереж зберігаються деякі проблемні питання та обмеження. Їх усунення може мати вирішальне значення для подальшого підвищення надійності та ефективності діагностичних систем [11]:

- якість і доступність даних – багато передових методів діагностики покладаються на великі набори даних для навчання та перевірки. Однак доступ до високоякісних даних у реальному часі часто обмежений через обмеження можливостей вимірювальної техніки. Це перешкоджає розробці та тестуванню більш точних діагностичних моделей,

- відсутність сумісності – багато діагностичних методів показали перспективність у контрольованих середовищах і неналежну сумісність у реальних умовах. Електричні мережі одна від одної істотно відрізняються за архітектурою, використанням обладнання та умовами експлуатації. Забезпечення належної інтеграції діагностичних інструментів з різними мережевими структурами є досить важливим для подальших досліджень,

- економічна доцільність впровадження передових методів діагностики часто ігнорується, хоча існують методи для визначення технічних переваг економічної ефективності застосованих методів моніторингу та діагностики,

- адаптивність та можливість отримання даних в режимі реального часу – існуючі діагностичні системи все ще мають труднощі з адаптаційними можливостями та можливостями отримання даних в режимі реального часу. Це можна пояснити тим, що електричні мережі являють собою динамічне середовище з умовами роботи, що постійно змінюються,

– інтеграція нових методів діагностики з існуючими системами та інфраструктурою має практичні труднощі та пояснюється проблеми сумісності.

Теоретична основа для діагностики аварійних ситуацій в електричних мережах базується на ряді теорій і моделей з різних дисциплін, включаючи електротехніку, теорію систем і інформаційні технології. Базові теорії забезпечують основу для розуміння, прогнозування та пом'якшення аварійних станів у складних електричних системах [12]:

– теорія систем розглядає електричну мережу як взаємопов'язану систему компонентів, що взаємодіють один з одним. Ця теорія підкреслює важливість розуміння зв'язків і наявні залежності між різними частинами мережі у контексті діагностики аварійних станів та визначенні того, як збій в одній частині мережі може поширюватися та впливати на інші компоненти,

– аналіз дерева несправностей, який являє собою дедуктивний низхідний метод, який використовується для аналізу причин збоїв у системах. Він передбачає будову дерева несправностей, яке відображає логічні зв'язки між різними потенційними причинами збою у системі. Цей метод особливо корисний для діагностики аварійних ситуацій в електричних мережах шляхом виявлення критичних точок відмови та розуміння комбінації подій, які можуть призвести до збоїв у мережах,

– теорія надійності, яка зосереджується на ймовірності виконання системою призначеної функції без збоїв протягом визначеного періоду. В електричних мережах ця теорія використовується для оцінки надійності окремих компонентів і системи в цілому. Вона надає інструменти для прогнозування збоїв і планування технічного обслуговування для запобігання аварійним ситуаціям,

– теорія керування, яка розглядає поведінку динамічних систем і використання зворотного зв'язку для досягнення бажаних результатів. В електричних мережах теорія керування застосовується для підтримки стабільності роботи системи та реагування на виникнення порушень,

– інструменти штучного інтелекту і машинного навчання, що забезпечують основу для розробки алгоритмів, які можуть навчатися на основі даних і робити прогнози або приймати рішення. Під час діагностики аварійних станів у електричних мережах складені моделі аналізують великі набори даних, щоб виявляти аномалії, прогнозувати збої та оптимізувати стратегії реагування на них. Для реалізації моделей зазвичай використовуються такі методи, як нейронні мережі, опорні векторні обчислювачі та дерева прийняття рішень,

– теорія кібернетичних систем, яка об'єднує фізичні процеси з обчислювальними алгоритмами для створення систем, що можуть контролювати стан досліджуваного середовища. В електричних мережах це може забезпечити моніторинг у реальному часі та автоматизоване реагування на надзвичайні ситуації. Дана теорія вимагає розробки розумних мереж, у яких датчики, комунікаційні мережі та системи керування працюють для досягнення спільної мети, щоб підвищити їх надійність та стійкість.

Серед перспективних майбутніх напрямків досліджень можна відзначити [12]:

– врахування масштабованості електричних мереж з огляду на зростання їх розмірів і складності, що вимагає застосування діагностичних систем, які можуть ефективно масштабуватися і безперебійно працювати в різних структурах. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на розробці діагностичних алгоритмів, здатних до масштабування і забезпеченні взаємодії між різними системами та пристроями. Це вимагає створення стандартних протоколів та інтерфейсів, які забезпечують безперебійний обмін даними,

– забезпечення інформаційної безпеки, оскільки спостерігається збільшенням залежності від цифрових технологій і взаємопов'язаності систем. Необхідно здійснити дослідження для розробки надійних заходів безпеки, що здатні захистити діагностичні системи від інформаційних загроз. Це можливо зробити шляхом розробки протоколів безпеки зв'язку, розробки систем виявлення несанкціонованих втручань для забезпечення цілісності та збереженості даних,

– здійснення пограничних обчислень, що включають обробку даних безпосередньо поблизу місця їх отримання, що дозволить зменшити затримку обробки та зменшити «час відповіді». Майбутні дослідження цього питання повинні вивчити застосування периферійних обчислень для діагностики стану електричних мереж, що дозволить підвищити швидкість і ефективність виявлення та усунення несправностей, особливо у віддалених або розподілених сегментах електричних мереж,

– покращення взаємозв'язку «людина-машина» – не дивлячись на широке впровадження штучного інтелекту та автоматизації, досвід людини залишається досить важливим. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на розробці систем, які сприяють ефективній співпраці людини і машини, де інструменти штучного інтелекту лише покращують процес прийняття рішень людиною, а не замінюють його. Це включає створення інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів, покращення зрозумілості моделей штучного інтелекту та надання практичних порад, які можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень,

– врахування екологічних та кліматичних аспектів впливу, оскільки на фактори навколишнього середовища та кліматичні зміни можуть суттєвим чином впливати на працездатність електричних мереж і необхідно дослідити, як ці зміни впливають на надійність роботи мереж та вірогідність виникнення несправностей. Розробка діагностичних методів, що враховують екстремальні погодні явища, коливання температури та інші, може підвищити стійкість і адаптивність електричних мереж,

– належне управління життєвим циклом мережевих компонентів і систем, що має вирішальне значення для здійснення ефективної діагностики. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на розробці комплексних моделей управління життєвим циклом, які об'єднують діагностичні дані зі стратегіями обслуговування та заміни. Такий підхід може оптимізувати використання ресурсів, продовжити термін служби мережевих компонентів і знизити експлуатаційні витрати.

Діагностика аварійних ситуацій в електричних мережах швидко розвивається завдяки інноваційним технологіям. Прогресивні досягнення підвищують точність, ефективність та надійність роботи діагностичних систем. Вирішення визначених проблем за допомогою цілеспрямованих досліджень матиме вирішальне значення для подальшого розвитку та вдосконалення методів діагностики, забезпечення надійності та стійкості електричних мереж у майбутньому.

2.4 Оцінка впливу асиметричних режимів на показники надійності систем розподілу електричної енергії

При розподілі електричної енергії асиметричні режими їх роботи суттєво впливають на надійність самих систем розподілу (СРЕ). Зазначені системи характеризуються значною динамікою розвитку і все частіше стикаються з ймовірністю виникнення асиметричних умов, і які впливають на експлуатаційну надійність електрообладнання. Асиметричні режими, особливо ті, що супроводжуються появою струмів короткого замикання, впливають на структурну та функціональну надійність мереж. На асиметричні режими в мережах, які є результатом струмів короткого замикання, впливають як визначені самою мережею, так і ймовірнісні фактори. Ці режими викликають потужні перехідні процеси, які можуть

вплинути на функціональність і надійність різних елементів системи, зокрема розподільних пристроїв і автоматичних вимикачів. Це підкреслює необхідність покращення розуміння та моделювання цих процесів для забезпечення надійності роботи мереж [13].

Для визначення ключових аспектів необхідно здійснити аналіз струмів короткого замикання та їх вплив на систему, визначити, яким чином зміна цих струмів, включаючи швидкість зміни напруги відновлення в точці короткого замикання, впливає як на сторону джерела живлення, так і на сторону навантаження. Для аналізу можуть бути використані диференційні рівняння, які описують швидкість зміни струму та напруги в електричних дугах, що утворюються під час коротких замикань. Ці рівняння включають такі фактори, як осьові та радіальні компоненти швидкості середовища, в'язкість, електропровідність і теплопровідність [13].

Для розв'язання складних нелінійних диференціальних рівнянь можна застосувати лінеаризацію рівнянь, що полегшить розрахунок перехідних процесів та визначати поведінку електричних дуг у електричному обладнанні. Такий підхід дозволить спростити математичне моделювання цих процесів, дозволяючи здійснювати пошук точних та практичних рішень для досліджуваних систем. Моделювання дозволить здійснювати ретельний аналіз впливу асиметричних режимів на надійність систем розподілу електричної енергії, отримати цінну інформацію про перехідні процеси, які відбуваються в цих умовах, що зрештою сприяє розробці більш надійних і стійких мереж.

2.5 Огляд літературних джерел по темі дослідження

У [14] здійснено аналіз, класифікацію та пошук способів величини аномальних резонансних перенапруг (АРП) у лініях електропередач надвисокої напруги, особливо в тих, які мають асиметричні та несинусоїдальні умови роботи. Дослідження були спрямовані на розробку класифікації АРП, виявлення їх причин та факторів, що впливають на їх виникнення та стійкість. Наголошується на важливості розуміння аномальних резонансних умов, які можуть призвести до серйозних перенапруг, створюючи загрозу надійності та безпеці роботи енергосистем. У роботі докладно викладено теоретичні основи гармонійних резонансних перенапруг з упором на такі умови, як підключення ліній надвисокої напруги до ненавантажених автотрансформаторів та реалізація автоматичних однофазних пристроїв повторного включення. Ці сценарії визначаються як найпоширеніші випадки, коли може виникнути АРП, що часто призводить до тривалого та значного підвищення напруги, що перевищує допустимі межі. Дослідження додатково заглиблюється у механізми розвитку цих перенапруг, обговорюються практичні наслідки АРП для стабільності енергосистеми та ймовірність системних збоїв через ці перенапруги.

У [15] здійснено пошук вирішення проблем виникнення тимчасових перенапруг (ВТП), які виникають під час відновлення енергосистем після часткового або повного відключення електроенергії. Метою дослідження була розробка методу на основі штучних нейронних мереж (ШНМ) для точної оцінки пікових значень та тривалості цих перенапруг. Основна мета була у підвищенні надійності та швидкості відновлення енергосистеми шляхом розробки інструменту, який може ефективно прогнозувати ВТП, тим самим допомагаючи операторам приймати обґрунтовані рішення у процесі відновлення. Дослідження підкреслює виняткову важливість

управління ВТП, на які впливають такі чинники, як напруга джерела, довжина лінії, кут перемикавання, ємність лінії, нахил кривої насичення і залишковий потік. Модель ШНМ, що була розроблена у цьому дослідженні, навчається з використанням змодельованих даних, що демонструє її здатність оцінювати ВТП з високою точністю. Результати показали, що розроблена ШНМ дозволяє досить точно прогнозувати пік та тривалість комутаційних перенапруг. У дослідженні робиться висновок, що підхід на основі ШНМ ефективний для оцінки ВТП у реальному часі і може служити інструментом навчання для операторів, допомагаючи їм ефективніше та безпечніше керувати відновленням енергосистеми.

У [16] здійснено розробка та впровадження передових стратегій управління для покращення розподілу асиметричних навантажень у розподілених енергетичних ресурсах на основі інверторів. Основною метою дослідження було підвищення якості електроенергії та надійності мікромережі при незбалансованості або асиметричності навантаження. Це досягається шляхом застосування п'яти різних модифікацій віртуальної провідності залежно від значення напруги зворотної послідовності. Це дозволяє отримати кращий розподіл несиметричних струмів між фазами, тим самим пом'якшуючи несприятливі наслідки від несиметричного навантаження. Цілі дослідження включають перевизначення розрахунків активної та реактивної потужності для обліку складових напруги зворотної послідовності, розширення застосовності стратегії управління до систем з різними відносинами реактивного опору до повного опору, а також інтеграцію стратегії зі зворотним управлінням падінням напруги для переважно резистивних мереж. Експериментальні результати у лабораторній мікромережі підтверджують ефективність цих модифікацій, демонструючи покращення незбалансованого розподілу потужності у різних тестових випадках.

У [17] досліджується удосконалена модель планування мереж, спрямована на підвищення надійності та економічної ефективності

розподільчих мереж та мікроенергетичних мереж (РМтаММ). Основна мета дослідження – розробити дворівневу модель спільного планування, яка оптимально збалансує інвестиції та експлуатацію РМтаММ. Модель верхнього рівня орієнтована на максимізацію ефективності роботи РМ за рахунок оптимізації стратегій ціноутворення та розширення, тоді як модель нижнього рівня спрямована на мінімізацію витрат, пов'язаних з ММ шляхом оптимізації її стратегій планування та експлуатації. При цьому розглядається взаємодія та конфлікт інтересів між РМ та ММ, наголошуючи на необхідності спільного розгляду їх роботи. У дослідженні використовується алгоритм диференціальної еволюції та вирішувач для обробки складного процесу оптимізації, застосованого у моделі дворівневого планування. Результати з використанням 14-вузлової системи РМ показують, що запропонований метод може значно покращити економічні вигоди як для РМ, так і для ММ, що дозволяє одночасно знизити загальні витрати на енергопостачання.

У статті [18] представлено новий метод діагностики незначних несправностей в обмотках трансформатора. Метою дослідження було підвищення точності виявлення цих несправностей, які, якщо їх не виявити, можуть призвести до зниження надійності та терміну служби трансформаторів. У більшості випадків для цього використовується метод аналізу частотних характеристик (АЧХ), які фокусуються на амплітудно-частотних характеристиках та ігноруються фазочастотні характеристики. У запропонованому методі складено спільний графік, що поєднує як амплітудно-частотні, так і фазочастотні характеристики для більш ефективного виявлення прихованих несправностей. Викладений підхід включає в себе розрахунок відношення реакції збудження для виявлення змін, що вказують на несправності, і використання вибірок частот для кількісної оцінки серйозності і місця розташування несправності. Експериментальні результати силового трансформатора на 10 кВ та моделювання платформи COMSOL показують, що новий метод може

точно виявляти приховані несправності, такі як осьові та радіальні зміщення та деформації. Результати показують, що цей метод забезпечує значне покращення діагностики прихованих несправностей, пропонуючи повнішу оцінку стану обмоток трансформатора. Шляхом ефективного виявлення та кількісної оцінки цих несправностей пропонований підхід підвищує надійність та термін служби силових трансформаторів, сприяючи стабільності та ефективності роботи енергосистем.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Розрахункова схема електричної мережі наведена на рис. 3.1.

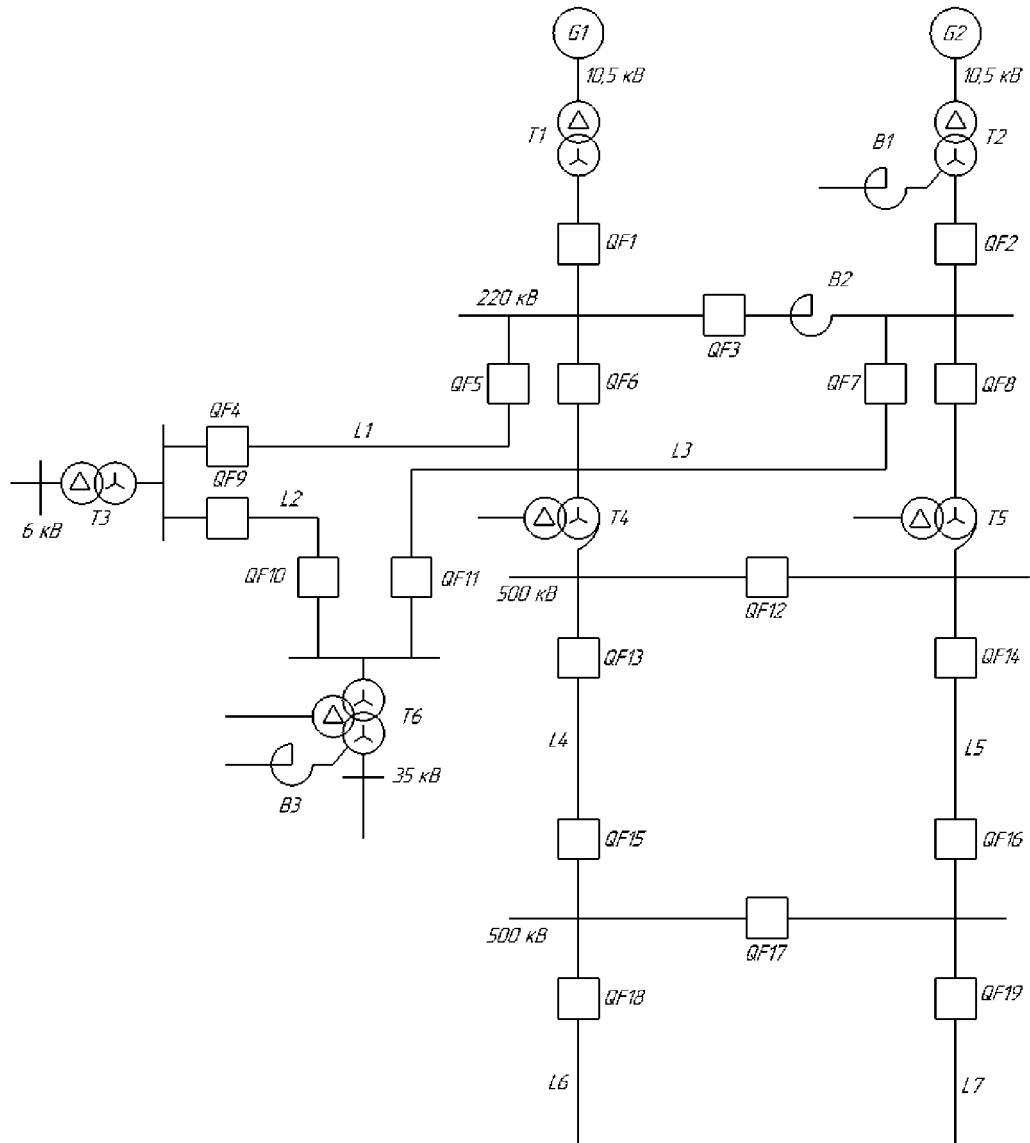


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема електричної мережі

Таблиця 3.1 – Характеристики генераторів

Параметр	Позначення, од.вим.	Значення
Номінальна потужність	P_H^r , МВт	60
Номінальна напруга	$U_{ном}$, кВ	10,5
Коефіцієнт навантаження	$\cos \varphi_r$	0,87
Значення опорів, Ом	x_d''	0,20
	x_d'	0,25
	x_d	0,80
	x_2	0,25

Таблиця 3.2 – Характеристики трансформаторів [19]

Параметр	Позначення, од.вим.	Значення
Т1		
Тип	–	ТРДЦН-100000/220
Номінальна потужність	S_H^T , МВА	100
Напруги обмоток	$U_{ВН}$, кВ	230
	$U_{НН}$, кВ	11
Напруга КЗ	$U_{КЗ}^{ВН}$, %	12
Т2		
Тип	–	ТРДЦН-160000/220
Номінальна потужність	S_H^T , МВА	160
Напруги обмоток	$U_{ВН}$, кВ	230
	$U_{НН}$, кВ	11
Напруга КЗ	$U_{КЗ}^{ВН}$, %	12
Т3		
Тип	–	ТРДЦН-63000/220
Номінальна потужність	S_H^T , МВА	160

продовження табл. 3.2

Напруги обмоток	U_{BH} , кВ	230
	U_{HH} , кВ	6,6
Напруга КЗ	U_{K3}^{BH} , %	12
Т4, Т5		
Тип	—	АОДЦТН-267000/500/220
Номінальна потужність	S_H^T , МВА	267
Напруги обмоток	U_{BH} , кВ	500/ $\sqrt{3}$
	U_{CH} , кВ	230/ $\sqrt{3}$
	U_{HH} , кВ	10,5
Напруга КЗ	U_{K3}^{BC} , %	11,5
	U_{K3}^{BH} , %	37
	U_{K3}^{CH} , %	23
Т6		
Тип	—	ТДТНЖ-40000/220
Номінальна потужність	S_H^T , МВА	40
Напруги обмоток	U_{BH} , кВ	230
	U_{CH} , кВ	38,5
	U_{HH} , кВ	6,6
Напруга КЗ	U_{K3}^{BC} , %	12,5
	U_{K3}^{BH} , %	22
	U_{K3}^{CH} , %	9,5

Таблиця 3.3 – Характеристики ліній електропередач

Дільниця	Позначення, км	Значення
«1»	L_1	50
«2»	L_2	20
«3»	L_3	60
«4»	L_4	280
«5»	L_5	280
«6»	L_6	190
«7»	L_7	190

Подальший розрахунок здійснюємо у відносних одиницях.

Приймаємо базисні значення:

– потужності: $S_{\delta} = 1000$ МВА,

– напруги $U_{\delta} = 230$ кВ,

– потужність короткого замикання на шини системи $S_{\kappa 3} = 1000$ МВА.

Базисне значення струму [20]:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 2,51 \text{ кА.} \quad (3.1)$$

Опір системи [20]:

$$x_c = \frac{S_{\delta}}{S_{\kappa 3}} = \frac{1000}{1000} = 1. \quad (3.2)$$

Опір генератора [20]:

$$x_{\Gamma}^{\delta} = x_d'' \cdot \frac{S_{\delta} \cdot \cos \varphi_{\Gamma}}{P_H^{\Gamma}} = 0,20 \cdot \frac{1000 \cdot 0,87}{60} = 2,9. \quad (3.3)$$

Значення перехідної ЕРС генераторів, системи та навантаження відповідно [20]:

$$E_{r1} = E_{r2} = 1 + x_d'' \cdot \sin \varphi = 1 + 0,20 \cdot \sqrt{1 - 0,87^2} = 1,1. \quad (3.4)$$

$$E_{H1} = E_{H1} = 0,87. \quad (3.5)$$

$$E_C = 1. \quad (3.6)$$

Опір двообмоткових трансформаторів [20]:

$$x_T = \frac{U_{K3}^T}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_H^T} \quad (3.7)$$

$$x_{T1} = \frac{12}{100} \cdot \frac{1000}{80} = 1,5,$$

$$x_{T2} = \frac{12}{100} \cdot \frac{1000}{160} = 0,75,$$

$$x_{T3} = \frac{12}{100} \cdot \frac{1000}{63} = 1,90.$$

Опір триобмоткових трансформаторів [20]:

$$x_{BT} = \frac{U_{\kappa B}^T}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_H^T}, \quad (3.8)$$

$$x_{CT} = \frac{U_{\kappa C}^T}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_H^T}, \quad (3.9)$$

$$x_{HT} = \frac{U_{\kappa H}^T}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_H^T}, \quad (3.10)$$

де $U_{\kappa B}^T$, $U_{\kappa C}^T$, $U_{\kappa H}^T$ – напруга КЗ відповідно обмоток вищої, середньої та нижчої напруг, %,

S_H^T – повна номінальна потужність трансформатора кВА.

Для трансформатора Т6 [20]:

$$U_{\kappa B}^T = 0,5 \cdot (U_{K3}^{BC} + U_{K3}^{BH} - U_{K3}^{CH}) = 0,5 \cdot (12,5 + 22 - 9,5) = 12,5\%, \quad (3.11)$$

$$U_{\kappa C}^T = 0,5 \cdot (U_{K3}^{BC} - U_{K3}^{BH} + U_{K3}^{CH}) = 0,5 \cdot (12,5 - 22 + 9,5) \approx 0\%, \quad (3.12)$$

$$U_{\kappa H}^T = 0,5 \cdot (-U_{K3}^{BC} + U_{K3}^{BH} + U_{K3}^{CH}) = 0,5 \cdot (-12,5 + 22 + 9,5) = 9,5\%, \quad (3.13)$$

$$x_{BT6} = \frac{12,5}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 3,125,$$

$$x_{HT6} = \frac{9,5}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 2,375.$$

Опори автотрансформаторів Т4, Т5:

$$U_{\kappa B}^T = 0,5 \cdot (11,5 + 37 - 23) = 12,75\%,$$

$$U_{\kappa C}^T = 0,5 \cdot (11,5 - 37 + 23) \approx 0\%,$$

$$U_{\kappa H}^T = 0,5 \cdot (-11,5 + 37 + 23) = 24,25\%,$$

$$x_{BT4} = x_{BT5} = \frac{12,75}{100} \cdot \frac{1000}{3 \cdot 267} = 0,1592,$$

$$x_{HT4} = x_{HT5} = \frac{24,25}{100} \cdot \frac{1000}{3 \cdot 267} = 0,3027.$$

Опір ліній електропередач [20]:

$$x_L = x_{num.} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_H^2} \quad (3.14)$$

де $x_{num.}$ – питомий опір лінії електропередач, $x_{num.} = 0,35$ Ом/км,

l – довжина лінії електропередач, км,

$$x_{L1} = 0,35 \cdot 50 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,331,$$

$$x_{L2} = 0,35 \cdot 20 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,198,$$

$$x_{L3} = 0,35 \cdot 60 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,397,$$

$$x_{L4} = x_{L5} = 0,35 \cdot 280 \cdot \frac{1000}{510^2} = 0,377,$$

$$x_{L6} = x_{L7} = 0,35 \cdot 190 \cdot \frac{1000}{510^2} = 0,256.$$

4 МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ ТА НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

4.1 Визначення аварійних та несиметричних режимів роботи електричних мереж

Підвищення якості електричної енергії можна вважати ключовим аспектом енергетичної ефективності електропостачання. Нелінійні навантаження можуть знизити ефективність енергопостачання, потенційно призводячи до коливань напруги та/або струмів. Виявлення та пом'якшення впливу від роботи нелінійного обладнання має важливе значення для забезпечення стабільності роботи мережі. Визначення навантажень є критично важливим для оптимізації використання електричної енергії в системі. Здійснюючи аналіз споживання електричної енергії та наявні збої в мережі, можна діагностувати проблеми та впроваджувати рішення для підвищення ефективності роботи енергетичних систем [21].

Для цього необхідно дослідити, яким чином різноманітні несправності в мережі впливають на електричні характеристики, що можуть бути використані для ідентифікації навантаження та застосування неруйнівних способів моніторингу. Вивчення того, яким чином дані несправності впливають на поведінку мережі при різних типах навантаження та враховуючи їх взаємодію. Для оцінки вплив несправностей, таких як провали напруги, флікери, дисбаланс фаз і гармонічні коливання потужності необхідно зосередитись на типології приєднаних навантажень та режимах роботи споживачів. Для можливості здійснення цих досліджень можна здійснити розгляд несправностей енергосистем за допомогою моделювання. Це дозволить здійснити всебічну якісну та кількісну оцінку впливу несправностей на параметри роботи мереж [21].

Застосована у цій роботі методологія передбачає використання компонентів Simulink/Simscape для здійснення моделювання електричної мережі та симуляції несправностей на основі встановлених математичних моделей провалів напруги, флікера, короткого замикання. Для імітації флікера напруги у мережі можна використати приєднання потужного споживача. При цьому здійснюється кількісне визначення впливу несправності на амплітуди, що є критичними та можуть здійснити їх ідентифікацію [22].

При моделюванні моніторингу навантаження будуть використані наступні параметричні дані: активна та реактивна потужності, гармоніки струмів, значення векторів напруги та струму, що характеризують параметри роботи електричних мереж. За допомогою моделювання можна імітувати різні несправності в мережі та виміряти дані, що кількісно та якісно визначають вплив цих факторів на якість електропостачання.

4.2 Моделювання падіння напруги

Використовуючи набір інструментів SimScape програмного середовища Matlab/Simulink у цьому розділі буде здійснено моделювання падіння напруги в електричній мережі [23].

Для моделювання падіння напруги у будь-якій точці лінії електропередачі були використані два блоки – на початку лінії до місця ушкодження і другий – з іншого боку від місця ушкодження. Навантаження імітують реальні умови у електричній мережі, лінії електропередач змодельовані шляхом вводу опорів. Параметри окремих елементів моделі лінії враховують довжину, опори, номінальні потужності та інше (рис. 4.1).

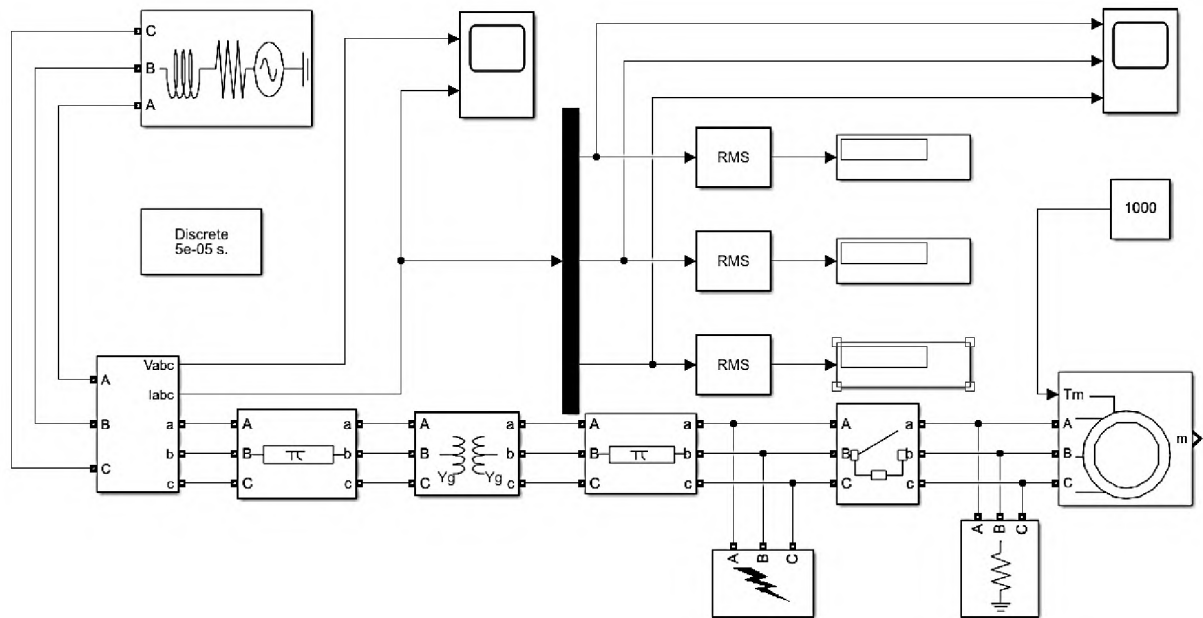


Рисунок 4.1 – Модель для дослідження поведінки електричної мережі при різних станах і типах навантаження

Результати моделювання ілюструють зміну форми струму та напруги при приєднанні як лінійних, так і нелінійних навантажень. Зокрема, провали напруги, суттєво впливають на амплітуду та ефективні значення струму та напруги.

Графіки (рис. 4.2, 4.3) ілюструють зміну напруги на затискачах лінійного навантаження, підключеного до мережі, під час виникнення провалу напруги, що також впливає на зміну сили струму на навантаженні. Аналіз графічних залежностей вказує на те, що вплив завад на струм є пропорційною зміні напруги, що підтверджує лінійний характер навантаження.

Під час провалу напруги гармоніки, що виникають, створюють потужні спотворення, впливаючи на значення напруги та струму під час цього провалу напруги, що може ідентифікувати наявність несправності. Гармонійні спотворення представлені на рис. 4.4, які можуть кількісно та якісно оцінити вплив наявної несправності.

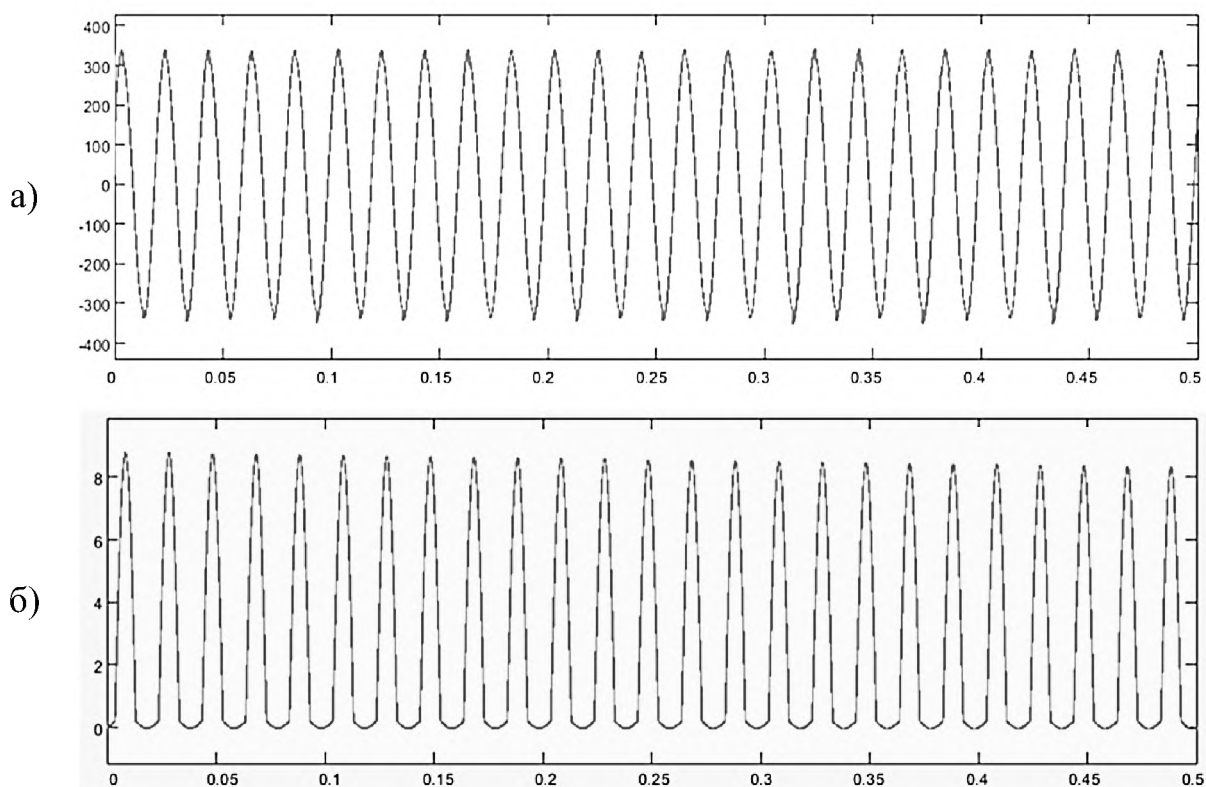


Рисунок 4.2 – Графіки зміни напруги (а) та струму (б) за відсутності падіння напруги у електричній мережі

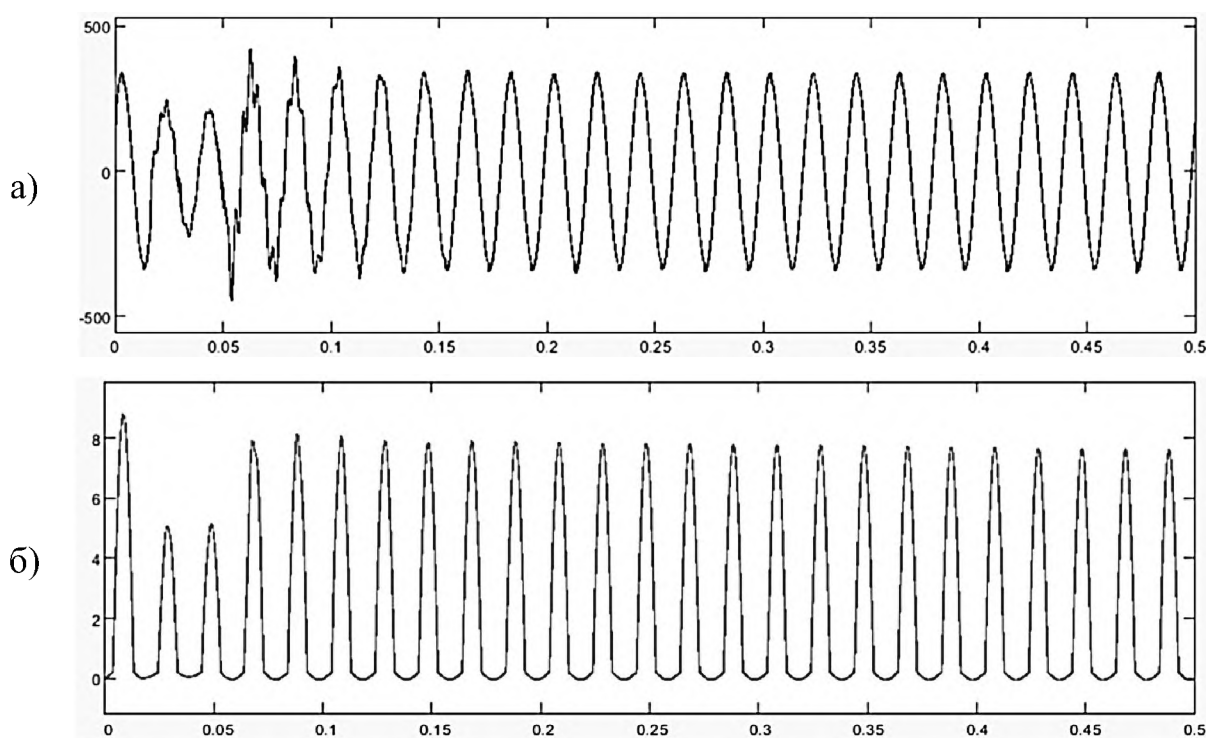


Рисунок 4.3 – Графіки зміни напруги (а) та струму (б) при наявності падіння напруги у електричній мережі

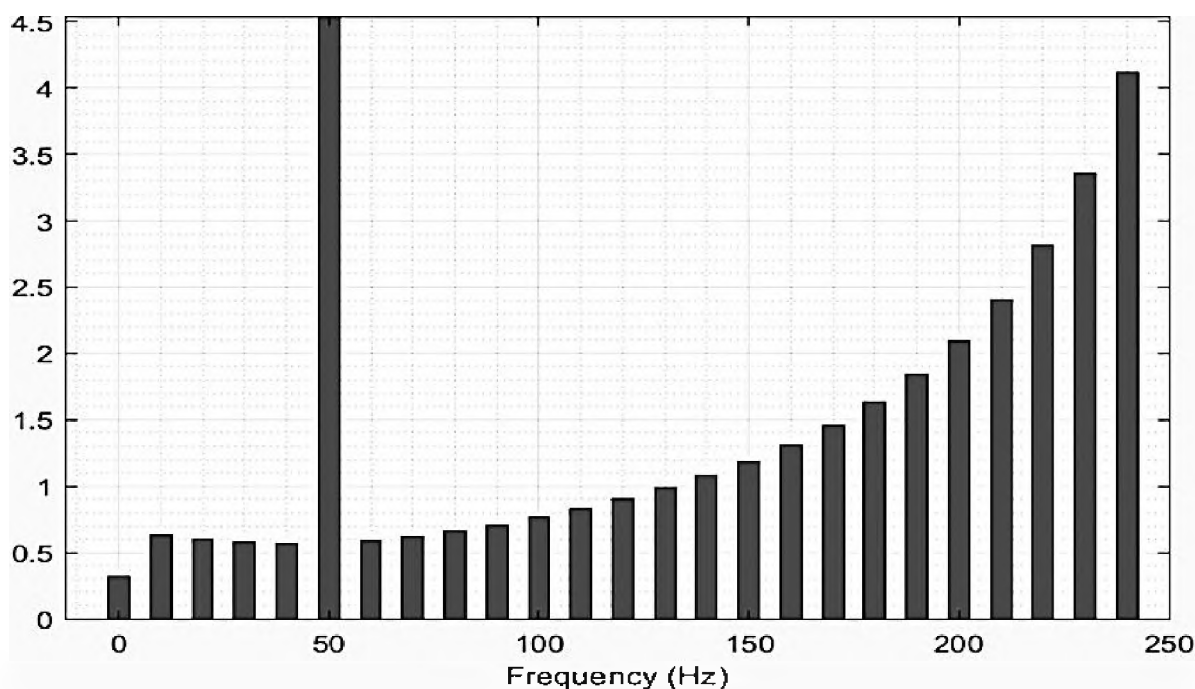


Рисунок 4.4 – Гармонійний розподіл в електричній мережі при падінні напруги в ній

Імітаційне моделювання також була здійснено при приєднанні нелінійного навантаження – при цьому форма хвилі струму деформується більш значно, ніж напруга, при цьому наявна в мережі індуктивність здатна згладити форму струму. Це свідчить про те, що здійснюючи регулювання значень активного опору і індуктивності можна впливати на зміну форми хвиль напруги і струму. Наявність у мережі несправності при наявності нелінійного споживача має на струм більший вплив, який не є пропорційним напрузі та триває більш тривалий період.

При підключенні нелінійного навантаження коефіцієнт спотворення напруги збільшується, що можна побачити на графіках (рис. 4.5).

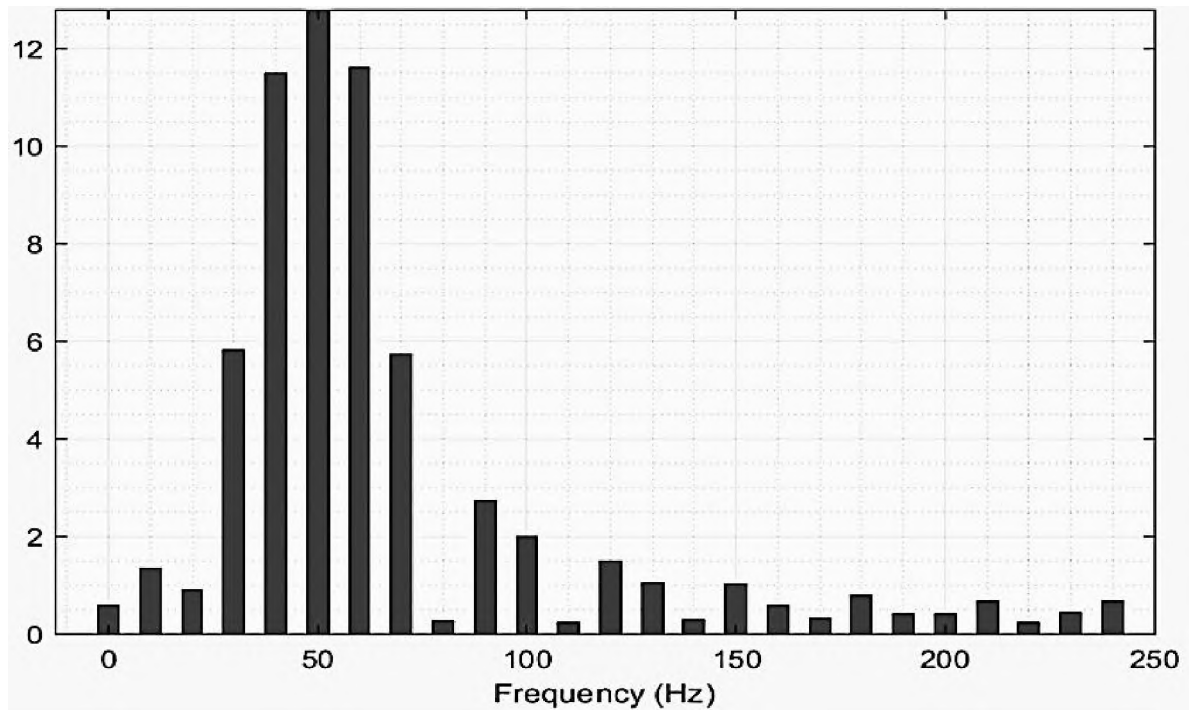


Рисунок 4.5 – Гармонійний розподіл в електричній мережі при падінні напруги в ній та наявності нелінійних споживачів

4.3 Моделювання флікера напруги

Флікер напруги (або мерехтіння напруги) – це коливання напруги в електричній мережі, які призводять до видимого мерехтіння освітлення та інших небажаних ефектів. Ці коливання можуть виникати через зміни поведінки навантажень в мережі, особливо коли використовуються нелінійні або навантаження з коливальним характером роботи (зварювальні агрегати, потужні електродвигуни, плавильне обладнання, інвертори, випрямлячі та інше). Флікер може викликати дискомфорт і зорове стомлення у людей, а також знижувати час роботи освітлювальних приладів та іншого чутливого обладнання. Флікер напруги може бути схарактеризований спеціальними параметрами, які визначають інтенсивність і частоту цих коливань [24].

Різнноманітні електронні пристрої та обладнання можуть вносити гармоніки в мережу, що викликає флікер (рис. 4.6).

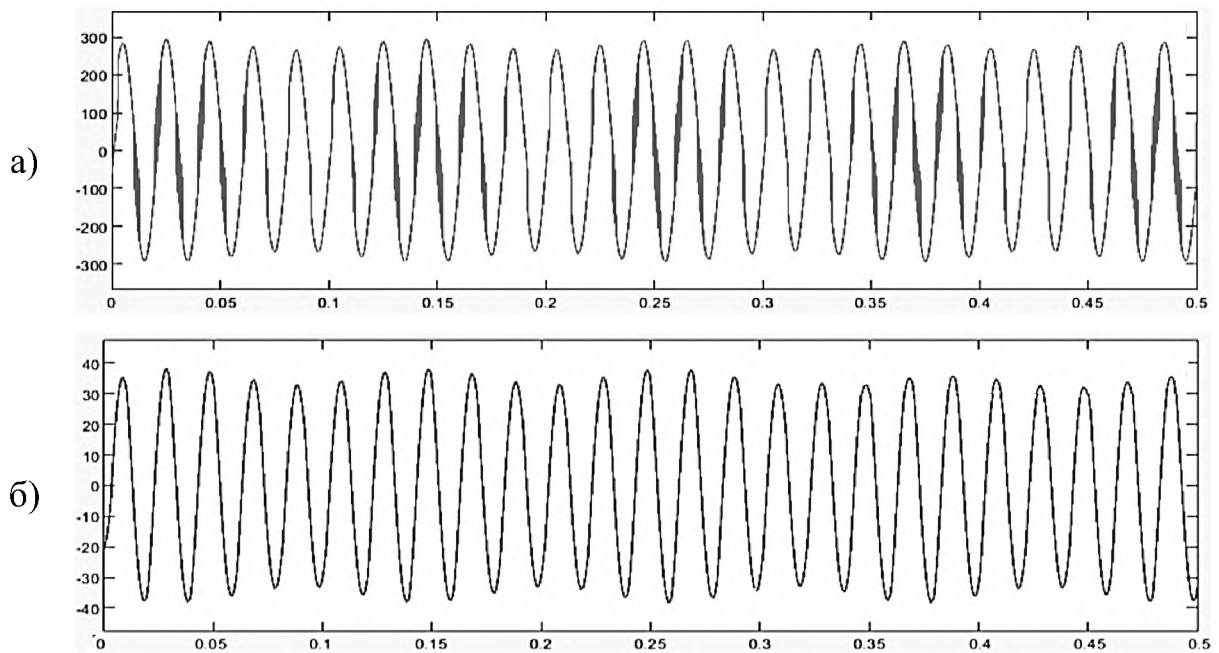


Рисунок 4.6 – Графіки зміни напруги (а) та струму (б) при виникненні флікера в електричній мережі

Аналіз графічних залежностей для напруги і струму може визначити ступінь флікера як при лінійному так і при нелінійному навантаженні. В останньому випадку спостерігається більш глибокий вплив на спотворення кривої струму.

Коливання напруги призводять до гармонійних спотворень в мережі та до зміни ефективних значень напруги та струму (рис. 4.7, 4.8).

Моделювання, проведене в середовищі Matlab/Simulink, демонструє, що загальні несправності, такі як падіння напруги та флікер, значно впливають на форми струмів і напруг та відрізняються від характеру навантаження – лінійного або нелінійного. Це підкреслює можливість отримання задовільних результатів аналізу роботи електричної мережі шляхом здійснення моделювання.

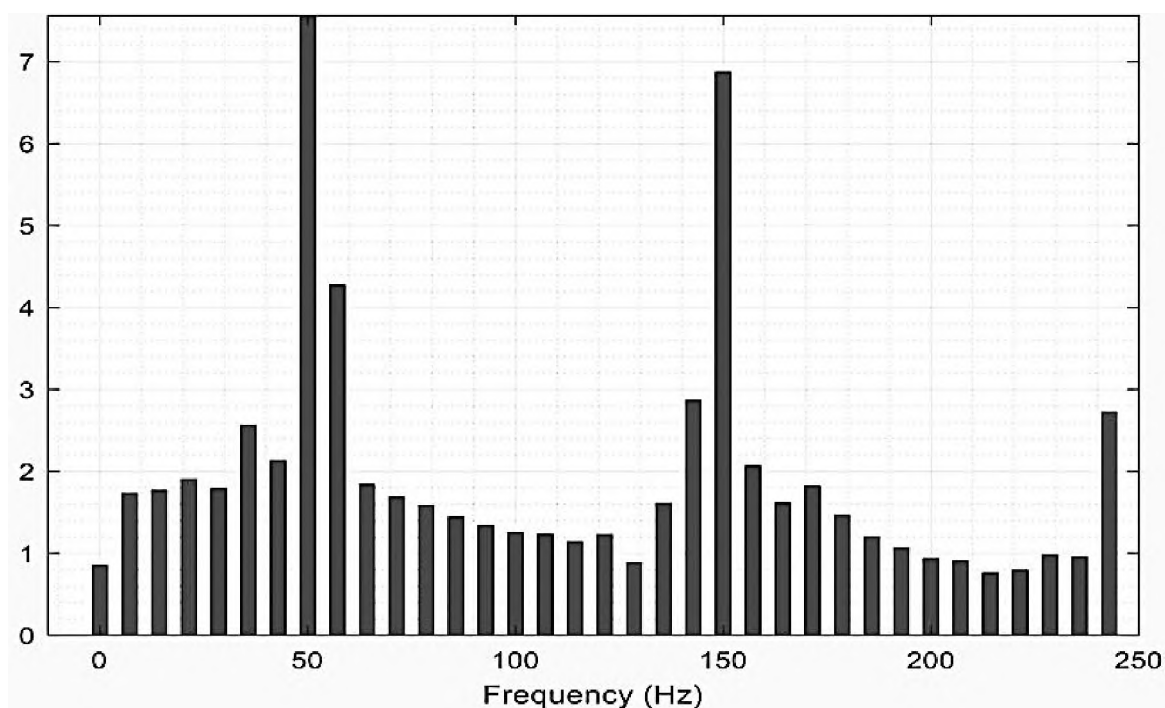


Рисунок 4.7 – Гармонійний розподіл в електричній мережі при наявності флікера при лінійному навантаженні

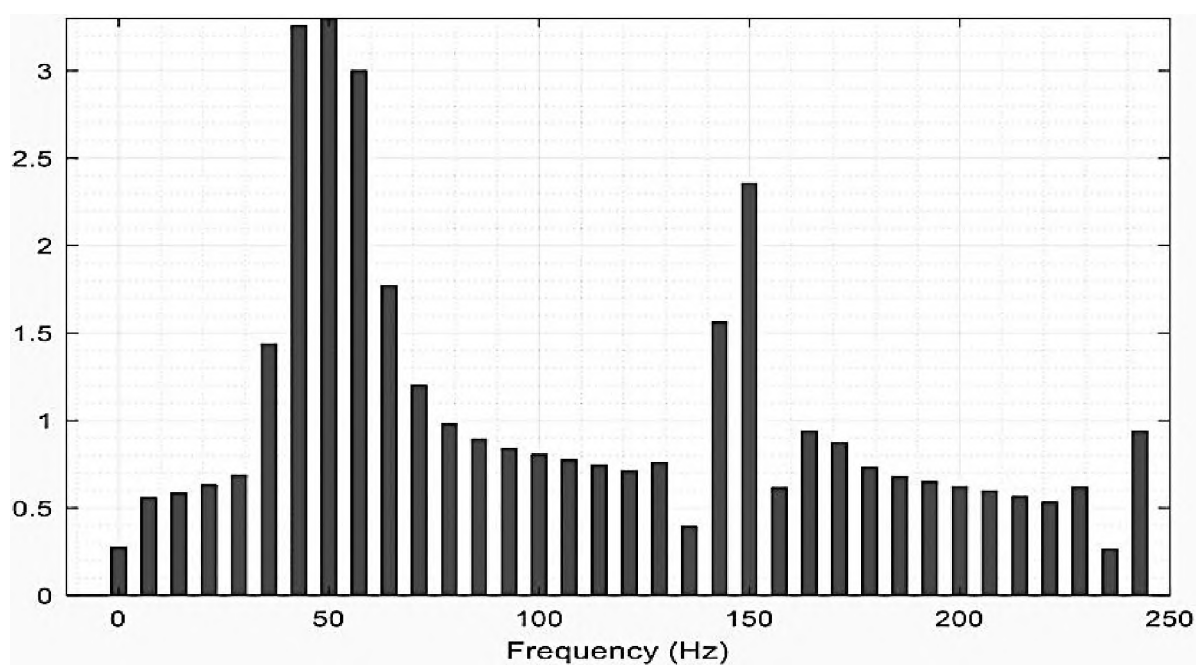


Рисунок 4.8 – Гармонійний розподіл в електричній мережі при наявності флікера при нелінійному навантаженні

ВИСНОВКИ

Дослідження, представлені в роботі підкреслюють критичну важливість діагностики та управління аварійними та несиметричними режимами в електричних мережах. Розвиток і технічне обслуговування електричних мереж є ключовими для промисловості. Враховуючи складність і взаємопов'язаність сучасних електричних мереж, потенційна можливість виникнення різноманітних аварійних ситуацій, які можуть порушити нормальне функціонування та завдати значних економічних збитків, є високою. Розуміння контексту та причин цих надзвичайних ситуацій має важливе значення для розробки надійних діагностичних та профілактичних заходів.

Історично електричні мережі були простими, локальними утвореннями з обмеженими можливостями та застосованими механізмами захисту. Однак за мірою того, як мережі розширювалися та об'єднувалися, зросла ймовірність більш серйозних і широкомасштабних надзвичайних ситуацій. Це зумовило необхідність застосування більш надійних і відмовостійких систем контролю та моніторингу. Інтеграція систем змінного струму сприяла передачі електроенергії на великі відстані та створенню централізованих електростанцій, створюючи нові проблеми, такі як ризик каскадних збоїв.

Необхідність у прогресі проектування та управління мережами визначається також широкою інтеграцією відновлюваних джерел енергії, технологій розумних мереж і зростанням складності сучасних електричних мереж. Зазначене створює нові вразливості, ускладнюючи керування мережею та створюючи потенційні місця виникнення збоїв. Сучасні методи діагностики значно вдосконалилися, використовуючи складні алгоритми, аналіз даних у реальному часі та методи машинного навчання для виявлення та прогнозування потенційних збоїв до того, як вони

переростуть у повномасштабні надзвичайні ситуації. Аварійна діагностика в електричних мережах безпосередньо впливає на стабільність електропостачання, запобігає значним пошкодженням, захищає безпеку та здоров'я обслуговуючого персоналу. Аварійні ситуації в електричних мережах можуть виникати з різних причин, включаючи стихійні лиха, поломки обладнання, людські помилки. Ефективна діагностика спрямована на виявлення, ізоляцію та швидке реагування на ці інциденти, щоб мінімізувати їхні несприятливі наслідки. Вирішення проблем та актуальних питань діагностики аварійних та несиметричних режимів в електричних мережах має вирішальне значення для підвищення надійності, безпеки та ефективності енергосистем. Це вимагає всебічного розуміння технологічних, операційних і нормативних обмежень. Скоординовані зусилля промисловості, наукових кіл і регуляторних органів є важливими для розробки та впровадження передових діагностичних методів і технологій, які можуть ефективно вирішувати різноманітні виклики сучасних електричних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі. Навч. посібник. – К.: Знання, 2007. – 292 с.
2. 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.
3. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи: Підручник / М.С. Сегеда. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.
4. Кігель Г.А. Електричні мережі систем електропостачання: навч. посібник/ Г.А. Кігель, Г.Г. Півняк. – 2-ге вид., перероб. і доп. Д.: Національний гірничий університет, 2011. – 318 с.
5. Петренко А.В. Технології обслуговування та ремонту електричних установок. Частина 1 / А.В. Петренко, С.С. Макаревич // К.: ЦП «Компринт», 2017 – 360 с.
6. Буряк В.М. Експлуатація електрообладнання систем електропостачання: навч. посібник. / В. М. Буряк. – Харків: ХДАМГ, 2001.
7. 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.
8. Рой В.Ф. Системи діагностування, контролю, керування й захисту електроенергетичних установок і комплексів // Конспект лекцій / В.Ф. Рой, Ю.П. Кравченко. – Харків; ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2019. – 125 с.
9. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT): ДСТУ EN 50160: 2014. – [Чинний від 2014-10-01]. – К.: Мінекономрозвитку, 2014. – 27 с. – (національний стандарт України).

10. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України. 2016. – 400 с.

11. Пупена О.М., Ельперін І.В., Луцька Н.М., Ладанюк А.П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах. Навчальний посібник / К.: Ліра-К, 2011. – 552 с.

12. Базюк Т.М., Блінов І.В., Буткевич О.Ф., Денисюк С.П. та інш. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими / За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.

13. Оцінювання якості електропостачання у локальних системах з джерелами розосередженої генерації: Монографія / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янка / К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – 166 с.

14. Kuchansky V. Abnormal resonance overvoltages in main power electrical networks with sources of distortions. Праці ІЕД НАНУ, 2018. Вип. 50. p. 27-36. 10.15407/publishing2018.50.027.

15. Sadeghkhan I., Ketabi, A., Feuillet, R. Estimation of temporary overvoltages during power system restoration using artificial neural network. 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, IEEE Trans. Power Delivery, No. 17, 2009. doi:10.1109/isap.2009.5352836.

16. Vijay A.S., Chandorkar M.C., Doolla S. Modified control structures for sharing of asymmetrical powers amongst inverter based distributed energy resources. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 152, October 2023, doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109262.

17. Wenxia L., Xueqian G., Chang L., Qingxin S. Reliability-constrained Bi-level collaborative planning of distribution network and micro-energy grid. Electrical Power and Energy Systems 152, 2023. doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109199.

18. Zihao Li, Yigang He, Zhikai Xing, Mingyun Chen. Minor fault diagnosis of transformer winding using polar plot based on frequency response analysis. *Electrical Power and Energy Systems* 152, October 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109173>.

19. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва; за ред. д-ра техн. наук, професора В.І. Мілих. – Київ: Каравела, 2018. – 452 с.

20. Бардик Є.І. Електрична частина станцій та підстанцій. Основне електрообладнання / Є.І. Бардик, М.П. Лукаш / К.: «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2012. – 250 с.

21. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, Г.В. Жежелев, Ю.А. Папайка, Л.І. Несен, за ред. Г.Г. Півняка; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро: НГУ, 2016. – 600 с.

22. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень: навч. посіб. / Р. Н. Кветний та ін.; Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця: ВНТУ, 2013.

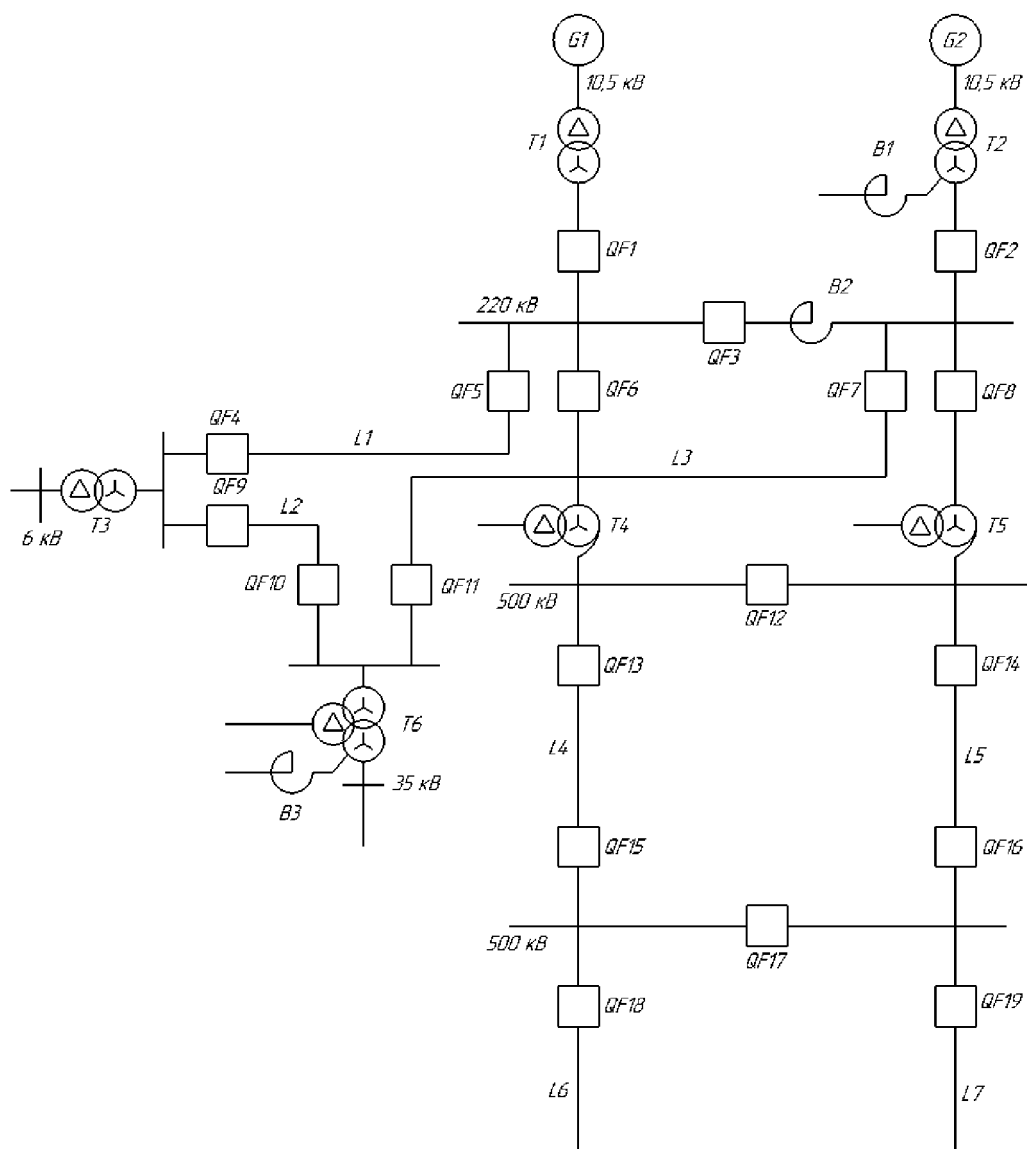
23. Chapman S.J. MATLAB Programming for Engineers. Thomson, 2004. – 592 p.

24. Жежелев І.В., Рабінович М.Л., Божко В.М. Якість електричної енергії на промислових підприємствах. – К.: Техніка, 1981. – 157 с.

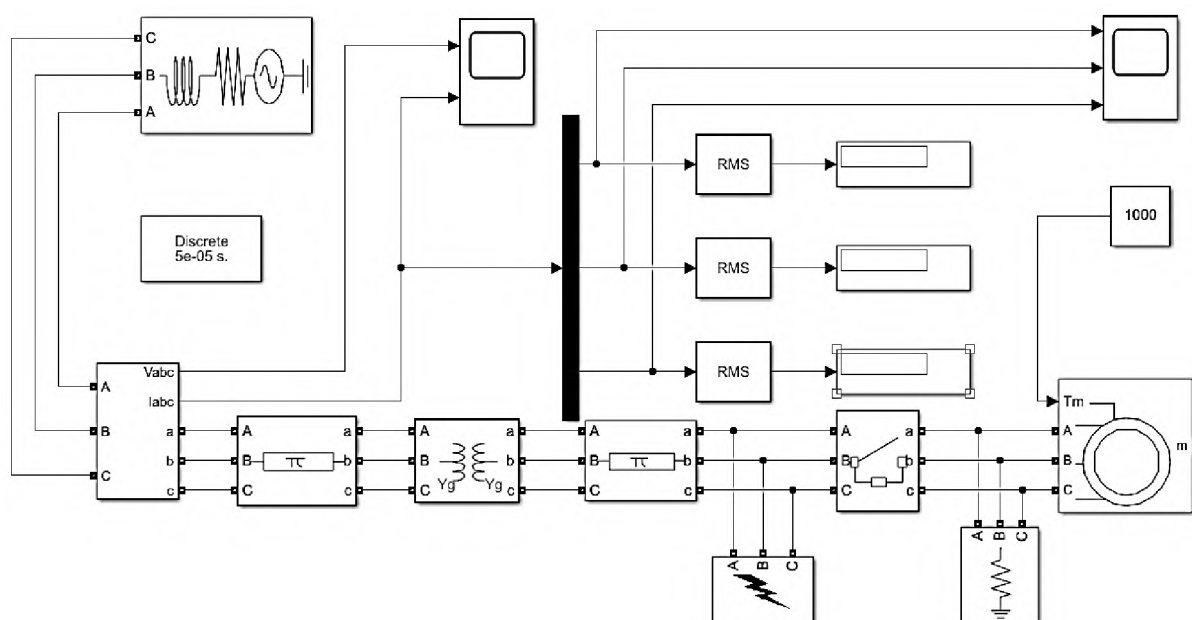
25. ДНАОП 0.00-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – К.: ВП «ГРАНМНА», 2001. – 117 с.

26. Правила улаштування електроустановок. – 2-ге вид., переробл., і допов. – Харків: Форт, 2009. – 736 с.

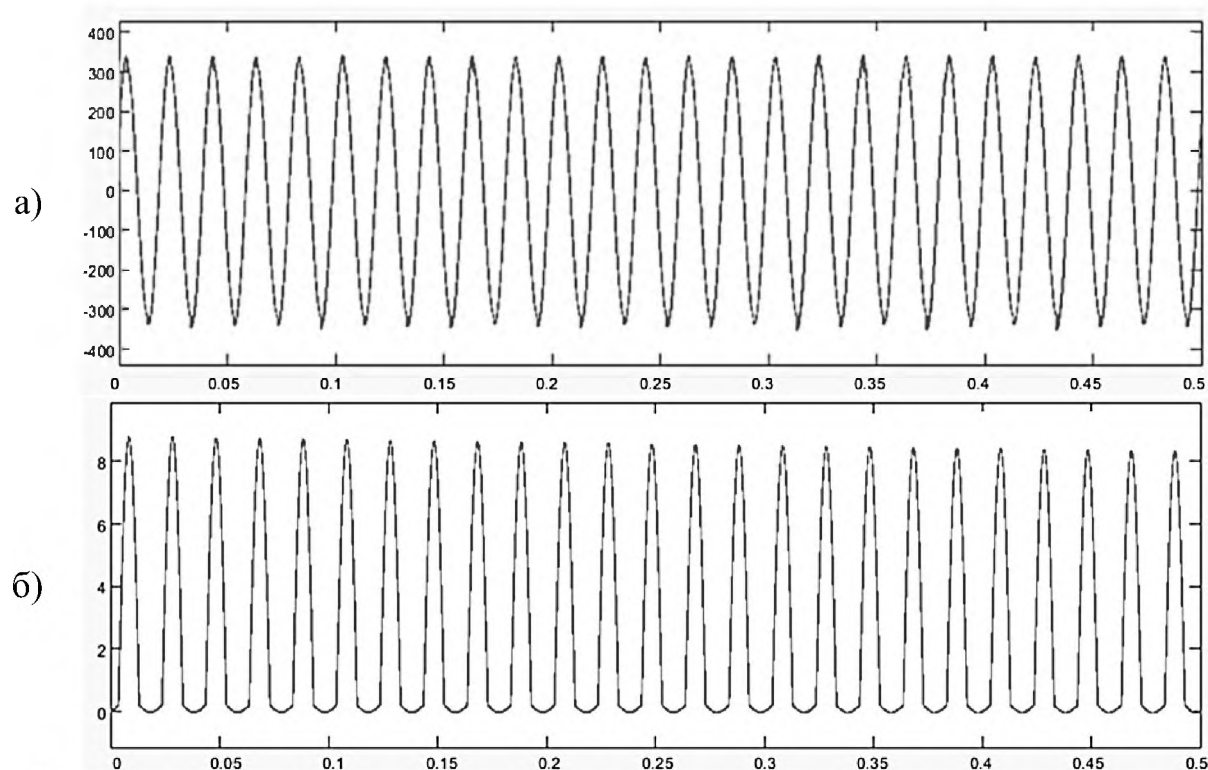
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



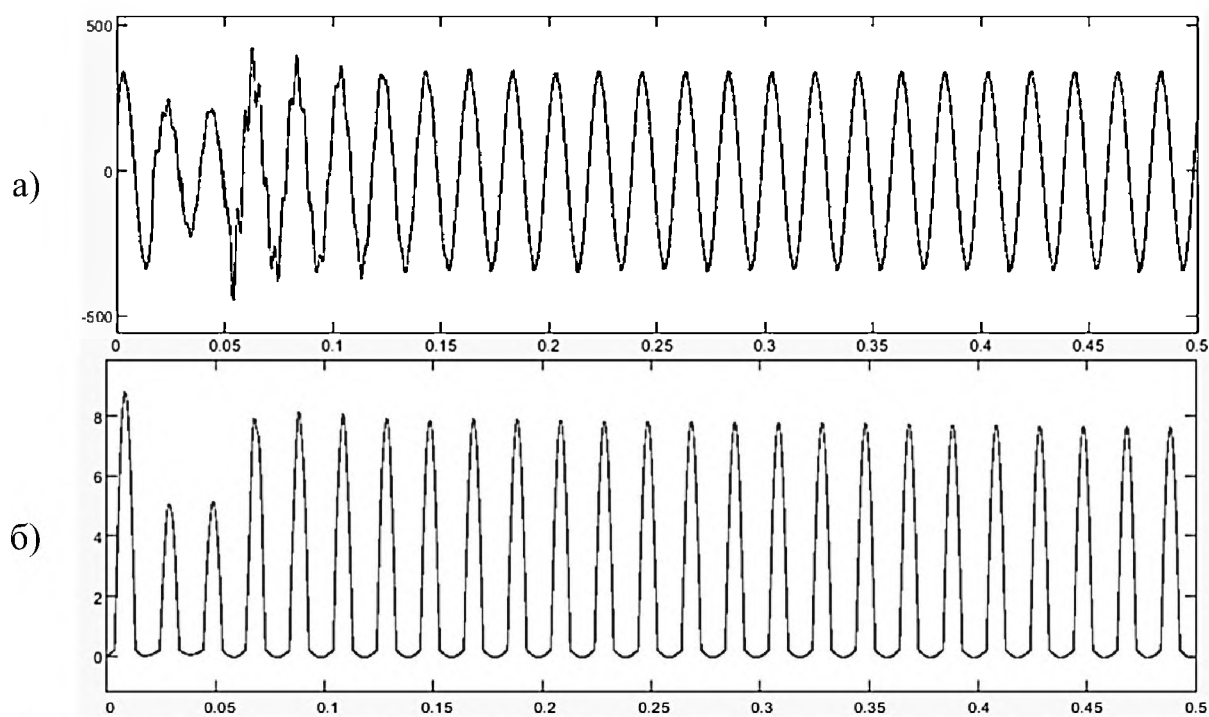
Розрахункова схема електричної мережі



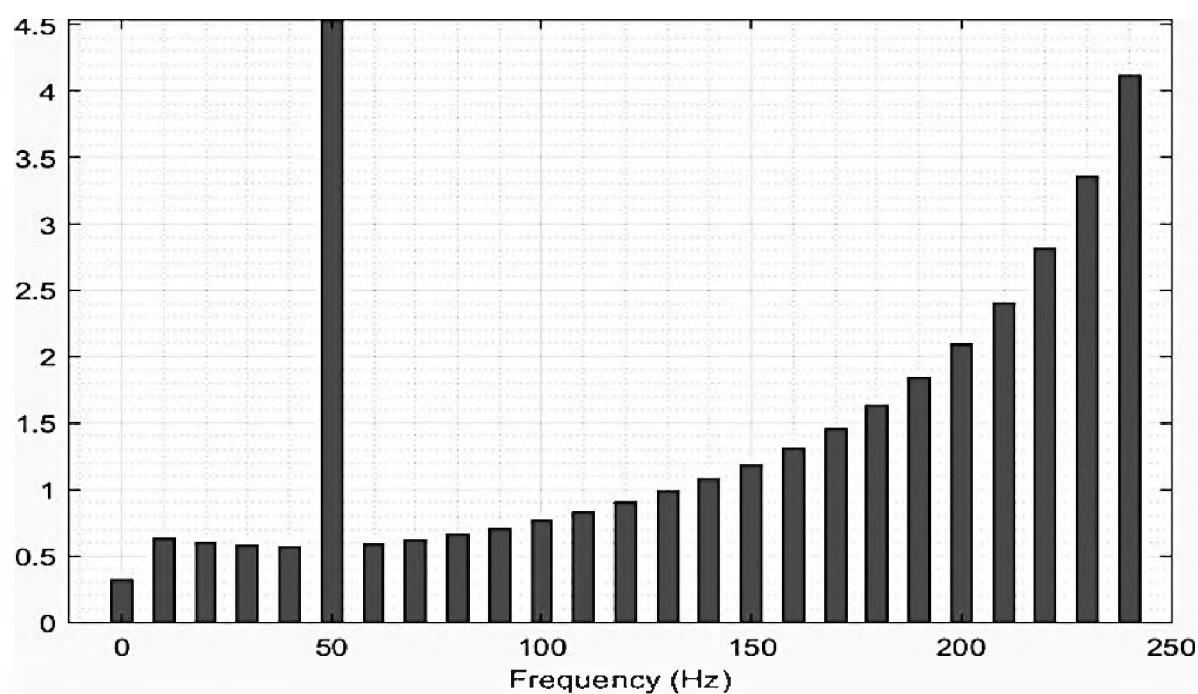
Модель для дослідження поведінки електричної мережі при різних станах і типах навантаження



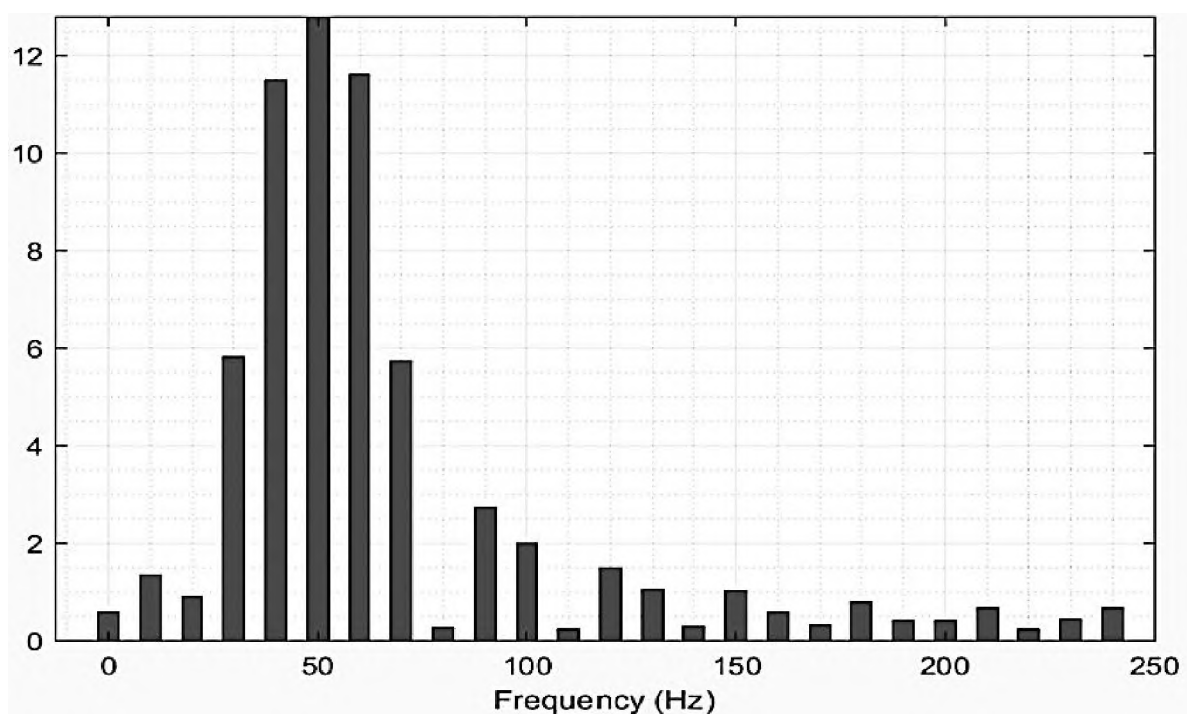
Графіки зміни напруги (*a*) та струму (*б*) за відсутності падіння напруги у електричній мережі



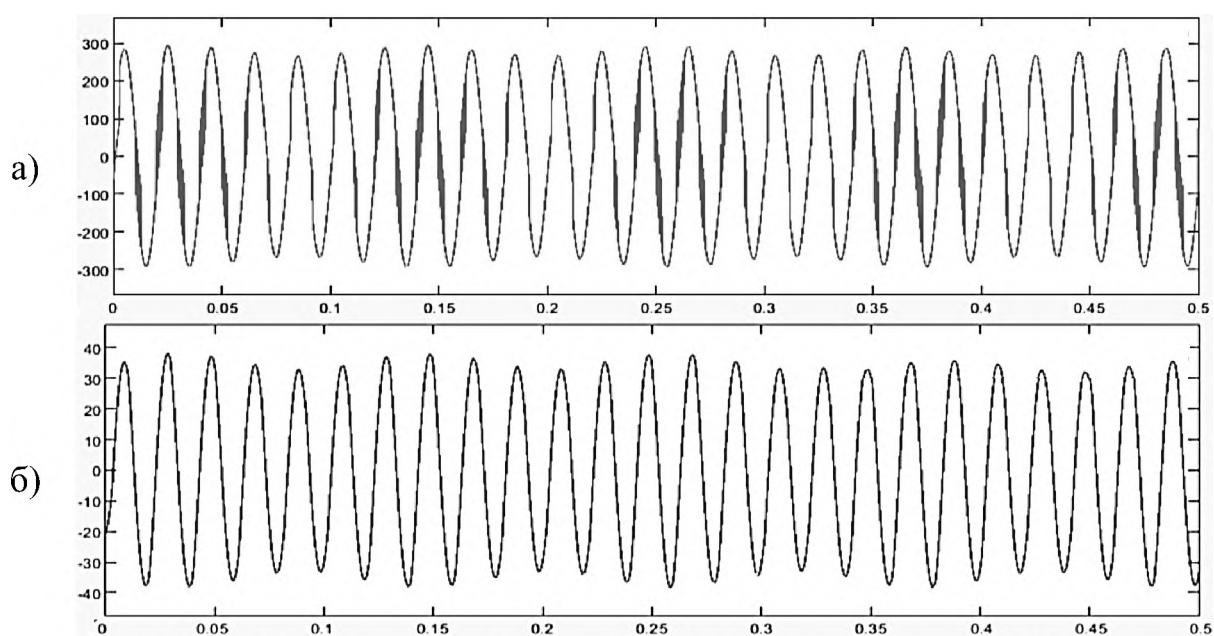
Графіки зміни напруги (а) та струму (б) при наявності падіння напруги у електричній мережі



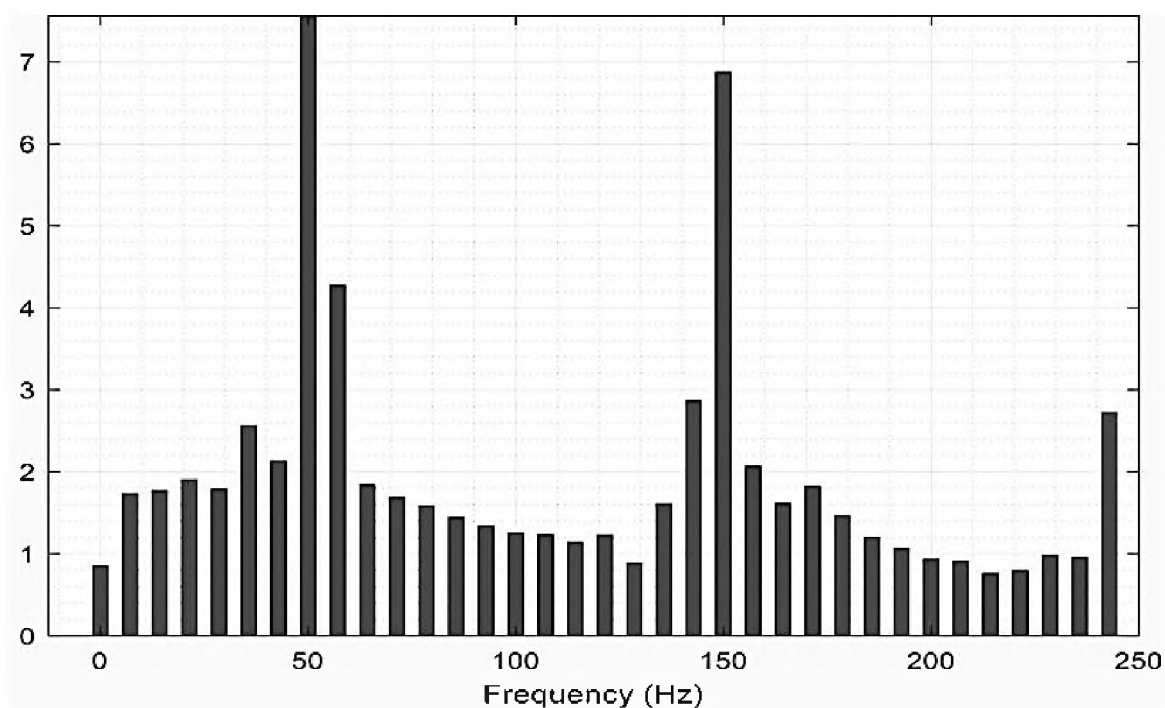
Гармонійний розподіл в електричній мережі при падінні напруги в ній



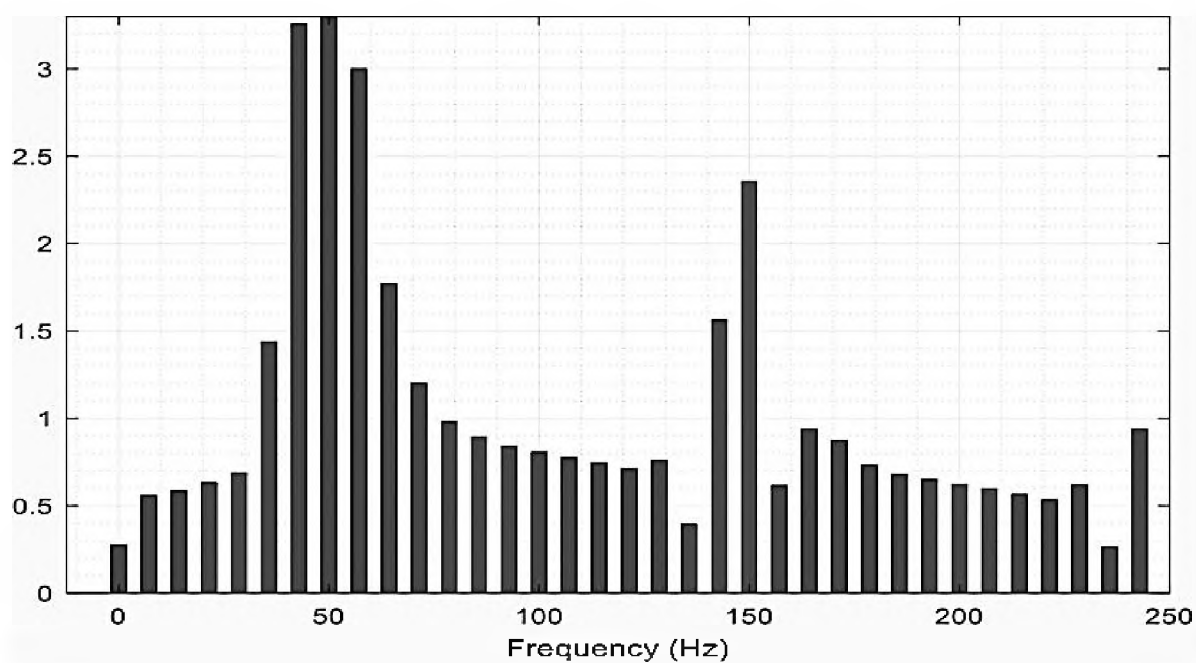
Гармонійний розподіл в електричній мережі при падінні напруги в ній та наявності нелінійних споживачів



Графіки зміни напруги (а) та струму (б) при виникненні флікера в електричній мережі



Гармонійний розподіл в електричній мережі при наявності флікера при лінійному навантаженні



Гармонійний розподіл в електричній мережі при наявності флікера при нелінійному навантаженні

ДОДАТОК Б

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____