

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

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

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

« ____ » _____ 2023 р.

Кваліфікаційна робота
магістра

на тему Аналіз режимів роботи силових трансформаторів та розробка
заходів з підвищення їх надійності

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛКМ-22
(шифр групи)

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

та електромеханіка»

Ярослав СІЛЬЧЕНКО

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Керівник к.т.н., доц., М. РОМАНЮК

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

(підпис)

Рецензент

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

(підпис)

Нормоконтроль:

Е. НЕМЦЕВ

(підпис)

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

Студент

(підпис)

(дата)

(дата)

ЛУЦЬК – 2023

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

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

«_____» _____ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Ярославу СІЛЬЧЕНКУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Аналіз режимів роботи силових трансформаторів та розробка заходів з підвищення їх надійності

керівник роботи Микола РОМАНЮК, канд. техн. наук, доцент
(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 11 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Вихідні дані для розрахунку режимів роботи трансформатора: номінальна потужність – 2500 кВА, напруги обмотки: ВН – 35 кВ, НН – 6,3 кВ, втрати холостого ходу – 5,1 кВт, короткого замикання – 23,5 кВт, напруга КЗ – 6,5%, струм КЗ – 1,1%, схема та група з'єднання обмоток – Y/Δ-II. Завантаження трансформатора – 0–140%. Режими для дослідження перехідних процесів: «холостий хід», «трифазного короткого замикання» на стороні вторинної обмотки, «приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача», спільне виникнення двох останніх станів. Надано: проблемні питання та режими відмов силових трансформаторів. Методи оцінки роботи силових трансформаторів – комп'ютерне моделювання.

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

1. Огляд проблемних питань при роботі силових трансформаторів.
 2. Розробка способів підвищення надійності роботи силових трансформаторів.
 3. Огляд способів підвищення надійності роботи силових трансформаторів.
 4. Розрахунок ефективних режимів роботи трифазного двообмоткового трансформатора.
 5. Моделювання роботи електричних систем з трансформаторами.
 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	М. РОМАНЮК, доц. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЕМЦЕВ		

7. Дата видачі завдання 2 жовтня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	02.10.23 – 15.10.23	
2.	Розділ 2	16.10.23 – 29.10.23	
3.	Розділ 3	30.10.23 – 12.11.23	
4.	Розділ 4	15.04.23 – 03.12.23	
5.	Розділ 5	04.12.23 – 10.12.23	
6.			

Студент _____
(підпис)

Ярослав СІЛЬЧЕНКО
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Микола РОМАНЮК
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Ярослав СІЛЬЧЕНКО. Аналіз режимів роботи силових трансформаторів та розробка заходів з підвищення їх надійності / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» 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 проблемних питань при роботі силових трансформаторів, визначено надійності силових трансформаторів в електричних мережах та загальні проблеми і види відмов силових трансформаторів.

У другому розділі було виконана розробка способів підвищення надійності роботи силових трансформаторів та оцінка режимів їх роботи, способи підвищення надійності роботи та здійснено огляд літературних джерел.

У третьому розділі здійснено розрахунок ефективних режимів роботи трифазного двообмоткового трансформатора.

У четвертому розділі було здійснено моделювання роботи електричних систем з трансформаторами.

Ключові слова: трансформатор, режими роботи трансформаторів, довговічність, надійність роботи, схема заміщення, режим холостого ходу, режим короткого замикання, навантаження, електричні системи, моделювання

SUMMARY

Yaroslav SILCHENKO. Analysis of operating modes of power transformers and development of measures to enhance their reliability / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Lutsk, 2023.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four chapters, conclusions, a list of references and appendices.

The first chapter provides an overview of problematic issues in the operation of power transformers, defines the reliability of power transformers in power grids and common problems and types of power transformer failures.

In the second section, we develop ways to improve the reliability of power transformers and evaluate their operating modes, ways to improve their reliability, and review the literature.

In Section Three, we calculated the effective operating modes of a three-phase two-winding transformer.

In the fourth section, we model the operation of electrical systems with transformers.

Keywords: transformer, operating modes of transformers, durability, reliability, substitution scheme, no-load mode, short-circuit mode, load, electrical systems, modeling

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ОГЛЯД ПРОБЛЕМНИХ ПИТАНЬ ПРИ РОБОТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	10
1.1 Значення надійності силового трансформатора в електричних мережах	10
1.2 Загальні проблеми та види відмов силових трансформаторів	15
1.3 Вплив режимів роботи силових трансформаторів на довговічність їх роботи	25
2 РОЗРОБКА СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	31
2.1 Оцінка режимів роботи силових трансформаторів	31
2.2 Способи підвищення надійності роботи силових трансформаторів	34
2.3 Огляд літературних джерел з питань підвищення надійності роботи силових трансформаторів	38
3 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРИФАЗНОГО ДВООБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	47
3.1 Вихідні дані та визначення задач розрахунку	47
3.2 Визначення параметрів схеми заміщення трансформатора в режимі холостого ходу	48
3.3 Визначення параметрів схеми заміщення трансформатора у режимі короткого замикання	50
3.4 Будова графічних залежностей	53
3.5 Визначення зміни напруги трансформатора при навантаженні	56
3.6 Будова зовнішньої характеристики трансформатора	57

4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З ТРАНСФОРМАТОРАМИ	59
4.1 Аналіз основних методів моделювання в роботі трансформатора при перехідних процесах	59
4.2 Створення моделі поведінки трансформатора при перехідних процесах	60
ВИСНОВКИ	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	78
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	83
ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	94

ВСТУП

Забезпечення надійності та ефективності роботи силових трансформаторів є першочерговим питанням для безперебійної роботи електричних мереж. Глибоке розуміння та аналіз експлуатаційних режимів силових трансформаторів є важливими для прогнозування, визначення та вирішення потенційних проблем, які можуть поставити під загрозу їх ефективність та безпеку. Зазначене говорить про те, що аналітичні дослідження відіграють значну роль у підвищенні надійності функціонування силових трансформаторів у складі електричних мереж.

Виключення появи коротких замикань та забезпечення належного управління залишковими струмами є критично важливим питанням для підтримки оперативної безпеки та надійності роботи трансформаторів. Існуючі традиційні методи та механізми забезпечення цих питань не завжди дозволяють ефективно керувати окремими електричними компонентами, що вимагає здійснення комплексного аналізу та впровадження інноваційних рішень для підвищення надійності роботи силових трансформаторів.

Для здійснення аналітичних підходів необхідно здійснювати ретельний підхід до вивчення процесів, що протікають всередині трансформаторів, та енергетичних перетворень при їх роботі. Аналітичні методи базуються на фактичних значеннях параметрів джерела живлення, вольт-амперних характеристик, якості змінного струму, оцінка значення напруг холостого ходу та струму короткого замикання й інше.

Додатковими заходами можуть бути своєчасне обслуговування та моніторинг роботи трансформаторів, що дозволить підтримати експлуатаційну надійність останніх. Впровадження принципів послідовного та всебічного технічного обслуговування, з поточними перевітками та тестуванням, безперервним моніторингом, дозволить

забезпечити своєчасну ідентифікацію проблемних станів, тим самим підвищуючи термін експлуатації та надійність роботи трансформаторів.

Завдяки комплексному аналізу, використанню передових методів моделювання, забезпеченні ефективних режимів роботи, дотримання жорстких графіків обслуговування, надійність та ефективність силових трансформаторів можуть бути суттєво збільшені, сприяючи загальній стабільності та безпеці енергетичних систем.

Мета роботи – визначити і дослідити способи забезпечення стабільної та безперебійної роботи силових трансформаторів у складі електричних систем.

Завдання роботи:

- здійснити огляд проблемних питань при роботі силових трансформаторів,
- розробити способи підвищення надійності роботи силових трансформаторів,
- розрахувати ефективні режими роботи трансформатора,
- провести моделювання роботи електричних систем з трансформаторами.

Об'єкт досліджень – силові трансформатори систем електропостачання.

Предмет досліджень – режими роботи силових трансформаторів, які охоплюють нормальні, навантажувальні та аварійні стани, і включають аналіз їх електричних параметрів – напруга, струм, активна та реактивна потужності.

1 ОГЛЯД ПРОБЛЕМНИХ ПИТАНЬ ПРИ РОБОТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

1.1 Значення надійності силового трансформатора в електричних мережах

Силові трансформатори є критично важливими компонентами електричних мереж і слугують основними складовими для забезпечення ефективної передачі та розподілу електроенергії. Основна функція трансформаторів полягає в тому, щоб здійснювати перетворення напруги на різних етапах передачі електроенергії споживачам. Надійність роботи силових трансформаторів має першочергове значення, оскільки це безпосередньо впливає на стабільність, ефективність і безпеку роботи всієї електричної мережі (рис. 1.1) [1].

Під надійністю роботи силових трансформаторів мають на увазі їх здатність виконувати свої функції за певних умов експлуатації протягом визначеного періоду без виникнення збоїв. Це стосується не тільки довговічності роботи трансформаторів, але й їхню стійкість до різних факторів, таких як електричні перевантаження, зміна умов і стану навколишнього середовища та механічні впливи. Надійний силовий трансформатор – це пристрій, що здатний працювати стабільно в межах проектних параметрів, з мінімальним часом простоювання та зменшенням вірогідності неочікуваних відмов [1].

Важливість надійної роботи силового трансформатора в електричних мережах пояснюється наступним [2]:

- трансформатори необхідні для підтримки належної якості електропостачання, а регулювання напруги та корекція коефіцієнта потужності є досить важливими для ефективної роботи електроприладів і промислового обладнання, і будь-яке відхилення робочої напруги від оптимального значення може призвести до неефективної роботи,

збільшення втрат електроенергії та потенційного пошкодження обладнання,

– надійність силових трансформаторів безпосередньо впливає на загальну надійність електромережі – несправності трансформаторів можуть призвести до збоїв в електропостачанні, що вплине на роботу споживачів, у «важких» випадках може бути спровокована «широка» нестабільність у мережі, що призведе до масштабних відключень,

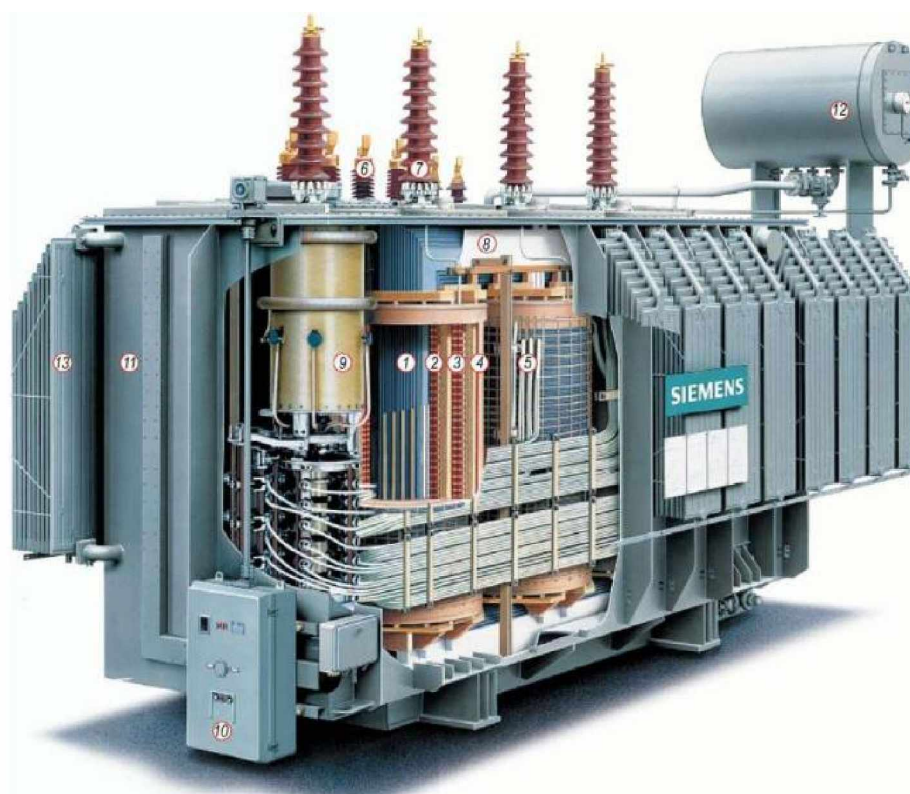


Рисунок 1.1 – Основні конструктивні елементи силового трифазного трансформатора: 1 – шихтований 3-и стрижневий магнітопровід, 2 – обмотка НН, 3 – обмотка ВН, 4 – регулювальна обмотка, 5 – виводи обмотки регулювальної обмотки, 6 – відвід (ізолятор) НН, 7 – ввід (ізолятор) ВН, 8 – ярмова балка, 9 – перемикач пристрою РПН, 10 – електропривод пристрою регулювання напруги (РПН), 11 – бак трансформатора, 12 – розширювальний бак, 13 – радіатори

– надійність трансформаторів необхідна для «безболісної» інтеграції розподілених джерел енергії до енергомережі, що є особливо складним завданням, враховуючи децентралізований характер таких джерел.

Надійність силових трансформаторів безпосередньо впливає на об'єми витрат на їх обслуговування та експлуатацію – трансформатори з вищими параметрами надійності потребують менш частого обслуговування, що зменшує як прямі витрати на технічне обслуговування, так і непрямі витрати, пов'язані з простоями та відключеннями електроенергії. Крім того, більш надійні трансформатори мають триваліший термін служби, що означає зменшення капітальних витрат з часом [2].

На надійність роботи трансформаторів впливають різні фактори, серед яких: конструктивні особливості, якість виготовлення, умови експлуатації, методи обслуговування та строк попередньої експлуатації [3]:

– конструкція трансформатора відіграє найважливішу роль у забезпеченні його надійності: трансформатори повинні бути сконструйовані таким чином, щоб витримувати електричні, термічні та механічні навантаження, з якими вони стикаються під час роботи. При цьому забезпечення відповідного рівня систем ізоляції, механізмів охолодження та забезпечення загальної структурної цілісності.

– якість виготовлення на пряму залежить від якості використаних матеріалів і точності процесу виготовлення,

– умови експлуатації, серед яких режими навантаження, температура навколишнього середовища та змінні фактори навколишнього середовища, впливають на надійність роботи трансформатора – відхилення від заданих умов експлуатації може призвести до прискореного старіння, підвищеного зносу та однозначного виходу з ладу елементів трансформатора,

– регулярне технічне обслуговування, перевірки та тестування допомагають виявити потенційні проблеми, перш ніж вони призведуть до збоїв у роботі, а прогнозне технічне обслуговування, що використовує

технології аналізу даних і моніторингу стану, дозволить передбачити та запобігти відмовам трансформатора,

– строк попередньої роботи трансформатора до теперішнього часу є також визначальним фактором, що впливає на його надійність, – з часом трансформатори зазнають природного старіння, головним чином через термічні та електричні навантаження, що погіршує стан ізоляції та інших компонентів і при належному обслуговуванні та модернізації термін експлуатації трансформатора можна значно подовжити.

Незважаючи на заходи, що застосовуються для підвищення надійності трансформаторів, є низка проблем, які можуть поставити під загрозу їх надійність. Головною проблемою є зростання вимог до навантаження та інтеграція відновлюваних джерел енергії, що вимагає від трансформаторів можливості їх роботи у різноманітних, а іноді, і екстремальних умовах, що створює додаткове навантаження на обладнання. Еволюція електричних мереж та інтеграція інтелектуальних мережевих технологій і посилення цифровізації можуть створити нові проблеми при забезпеченні надійності трансформаторів. Одним із ключових досягнень у підвищенні надійності трансформаторів є розробка «розумних» трансформаторів, які оснащують інтелектуальними системами моніторингу та керування, на яких постійно оцінюється їх працездатність і продуктивність. Використовуючи датчики та інтернет-технології, розумні трансформатори можуть надавати дані в режимі реального часу щодо різних параметрів, таких як температура, навантаження, якість оливи та стан обмоток. Ці дані можуть бути необхідною інформацією для здійснення прогностичного технічного обслуговування, дозволяючи операторам виявляти та усувати потенційні проблеми, перш ніж вони призведуть до збою в роботі трансформатора. Використання новітніх матеріалів у конструкції трансформаторів може значно підвищити їх надійність. Ці матеріали можуть бути використані при виготовленні осердь, ізоляційних матеріалів та інших частин трансформаторів при різних умовах експлуатації [4].

На додаток до оглянутих технічних заходів, надійність трансформаторів може також бути підтримана завдяки дотриманню суворих стандартів і правил під час їх проектування, виробництва та експлуатації. Вони можуть бути відрегульовані відповідними органами та галузевими стандартами та надають експлуатаційні вказівки для проектування, тестування та експлуатації трансформаторів. Відповідність цим стандартам при роботі трансформаторів забезпечує базовий рівень якості та надійності в усій галузі електропостачання [5].

Надійність силових трансформаторів торкається широкого кола питань, вимагає комплексного підходу із залученням передових технологій, надійних стратегій технічного обслуговування та відповідної нормативної бази. Дослідження надійності силових трансформаторів в електричних мережах повинні враховувати тенденції по розвитку нових технологій та зміни у вимогах до електричних мереж. Особливу увагу заслуговують модульні конструкції трансформаторів, які легко адаптуються до умов роботи, що дозволяє швидко переконфігурувати їх у відповідності до змін і вимог роботи мережі. Майбутнє надійності силових трансформаторів в електричних мережах формується низкою інноваційних технологій і тенденцій – від екологічно чистих конструкцій і технічного обслуговування за допомогою штучного інтелекту до використання надпровідних матеріалів – усе це дозволить досягти підвищення ефективності, довговічності та стійкості силових трансформаторів [6].

Додатковою перевагою сьогодення може бути інтеграція штучного інтелекту і алгоритмів машинного навчання у системах моніторингу. Ці системи дозволяють аналізувати великі масиви даних, отриманих від «розумних» трансформаторів, щоб виявляти закономірності та аномалії у їх роботі, що може вказувати на загрозові стани або потребу в здійсненні технічного обслуговування. Можливість прогнозування дозволяє точніше планувати технічне обслуговування, оптимізувати роботу трансформаторів та скоротити час простів [7].

1.2 Загальні проблеми та види відмов силових трансформаторів

Силові трансформатори, будучи критично важливими компонентами систем розподілу електроенергії, стикаються з безліччю проблем і режимів відмов, які можуть вплинути на їх продуктивність, довговічність і безпеку. Серед найпоширеніших проблем можна відзначити [8, 9, 10]:

- теплові порушення – силові трансформатори розроблені для роботи в певних температурних рамках і їх перевищення через перевантаження може призвести до прискореного старіння ізоляційних матеріалів, що зрештою призведе до її руйнування. Серед основних причини теплового перевантаження можна відзначити: надмірне навантаження, перевищення температури навколишнього середовища та порушення роботи системи охолодження. Тривалий вплив високих температур може погіршити ізоляцію обмоток трансформаторів та інших їхніх складових частин та компонентів, що призведе до скорочення терміну служби (рис. 1.2) [8],

- електричні порушення – стрибки напруги на «високій» стороні та перехідні процеси можуть спричинити сильні електричні навантаження на обмотки та ізоляцію трансформатора. Такі випадки можуть бути наслідком ударів блискавки, стрибків напруги або збоїв у самій електромережі. Положення може погіршитися і прискоритися такими факторами, як підвищена вологість, наявність забруднень або виробничі дефекти (рис. 1.3) [8, 9],

- механічні порушення – трансформатори зазнають механічних навантажень головним чином під час транспортування та виникнення вібраційних сил під час роботи. Ці напруження можуть спричинити деформацію обмоток, ослаблення кріплення компонентів, фізичне пошкодження осердя та котушок. Сили, що виникають при коротких замиканнях, можуть викликати надмірні механічні напруження у обмотках і призвести до їх викривлення та остаточного виходу з ладу (рис. 1.4) [10],



Рисунок 1.2 – Зношення ізоляції внаслідок нагріву і коксоутворення оливи (грілися місця з'єднання демпферів з виводами низької напруги)



Рисунок 1.3 – Коротке замикання обмотки високої напруги трансформатора потужністю 2500 кВА в литій ізоляції

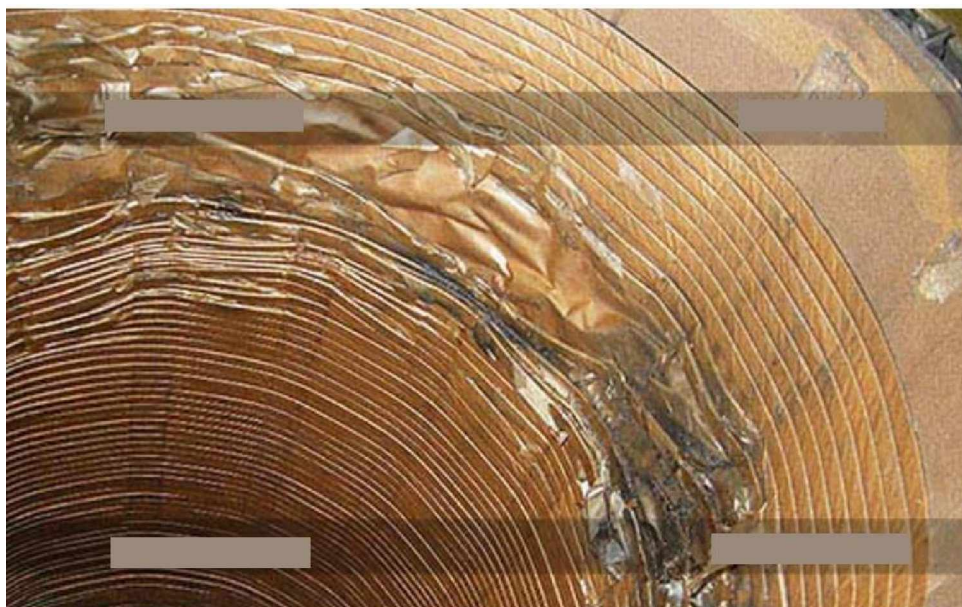


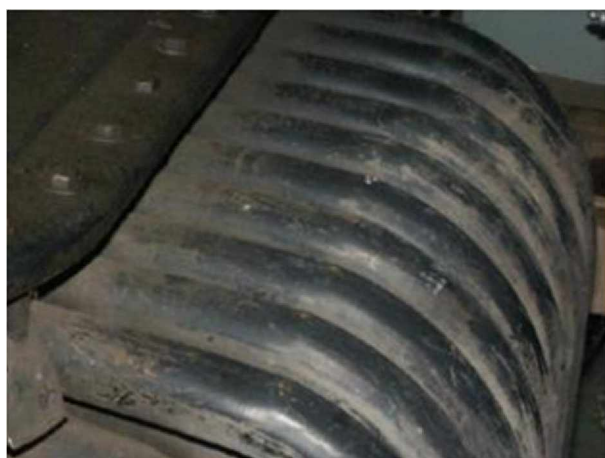
Рисунок 1.4 – Прогар і механічне пошкодження обмотки високої напруги внаслідок потужного короткого замикання на трансформаторі

– наявність вологості та забруднень – проникнення вологи є серйозною проблемою для силових трансформаторів, що може відбутись через пошкодження ущільнень, конденсацію вологи та її потрапляння під час технічного обслуговування. Наявність вологи в трансформаторній оливі або обмотках різко знижує діелектричну міцність, що призводить до виникнення часткових розрядів та руйнування ізоляції. Забруднення трансформаторної оливи частинками, газами або іншими речовинами може погіршити його ізоляційні властивості та ефективність охолодження [8],

– процеси старіння та зношення – з часом трансформатори зазнають природного старіння через термічні, електричні та інші навантаження. Це старіння проявляється у вигляді погіршення ізоляції, погіршення якості оливи та зношення механічних компонентів. Побічні продукти окислення оливи – кислоти та шлам – можуть ще більше прискорити процес старіння, знижуючи ефективність роботи трансформатора та збільшуючи ймовірність виникнення поломок [8, 9],

– вихід з ладу та виникнення помилок у роботі систем охолодження – ефективне охолодження є життєво важливим для досягнення довговічності

роботи трансформатора. Збої в системах охолодження, такі як несправність вентиляторів або насосів, «забивання» каналів охолодження або низький рівень оливи, можуть призвести до перегріву та пошкодження трансформаторів. Наслідки перегріву – руйнування ізоляції, зростання ризику виникнення пожежі та виходу трансформатора з ладу (рис. 1.5, 1.6) [10].



а)



б)

Рисунок 1.5 – Елементи системи охолодження: а - циркуляційні труби системи охолодження, б – радіатор

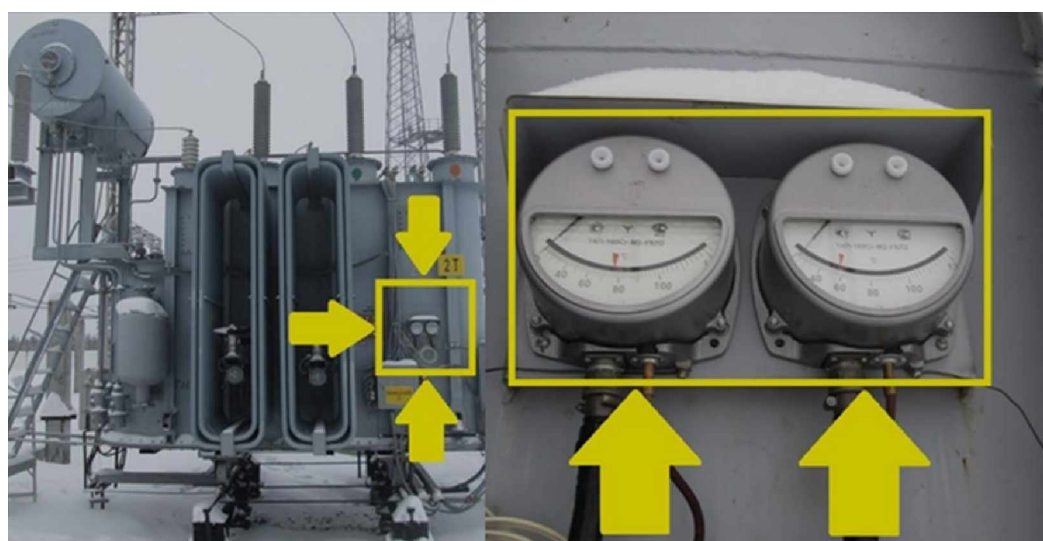


Рисунок 1.6 – Розташування термосигналізаторів на силовому трансформаторі

– корозія та деградація матеріалів – трансформатори є досить чутливими до наявності корозії, особливо в суворих умовах навколишнього середовища. Корозія може вплинути на різні компоненти трансформатора, що порушує їх структурну цілісність, може призвести до витоків оливи та зниження ефективності охолодження. Матеріали, що використовуються в трансформаторах, можуть з часом руйнуватися, підвищуючи ризик витоків та забруднення [8, 9, 10],

– наявність гармонійних спотворень – сучасні системи живлення часто містять нелінійні навантаження, які вносять гармоніки вищого порядку в електричні системи. Зазначені гармоніки можуть створювати додаткове навантаження на обмотки трансформатора, що призводить до їх надмірного нагрівання та прискореного старіння ізоляції. Гармонічні струми можуть призвести до додаткових втрат, знизити ефективність і викликати проблеми у трансформаторах, збільшити вібрацію та шум при роботі [10],

– локальні міжвиткові короткі замикання – які можуть викликати часткові розряди в ізоляції трансформатора, що може бути симптомом погіршення ізоляції та бути передвісником повного руйнування ізоляції. Ці розряди можуть виникати в дефектах ізоляції, яка може бути викликана сплесками напруги, старінням або забрудненням. Тривалі розряди можуть пошкодити ізоляцію, що призводить до остаточного виходу її з ладу [8, 9],

– дисбаланс та несиметрія навантаження – в трансформаторах у деяких випадках може виникнути дисбаланс навантаження через нерівномірний розподіл потужності між фазами. Цей дисбаланс може викликати перегрів і додаткове механічне навантаження на обмотки. Подібним чином, збільшені значення пускових магнітних струмів, що виникають під час увімкнення трансформаторів, можуть викликати механічні напруження та перехідні падіння напруги, що впливає на стабільність і ефективність роботи трансформатора [8, 9],

– погіршення стану оливи – викликає необхідність і важливість здійснення регулярного аналізу оливи та вихідних газів, що може бути інструментом діагностики. Аналіз розчинених і вихідних газів може виявити процеси перегріву, наявність дуг або пробоїв ізоляції, і слугувати раннім попередженням про можливі несправності трансформатора [10],

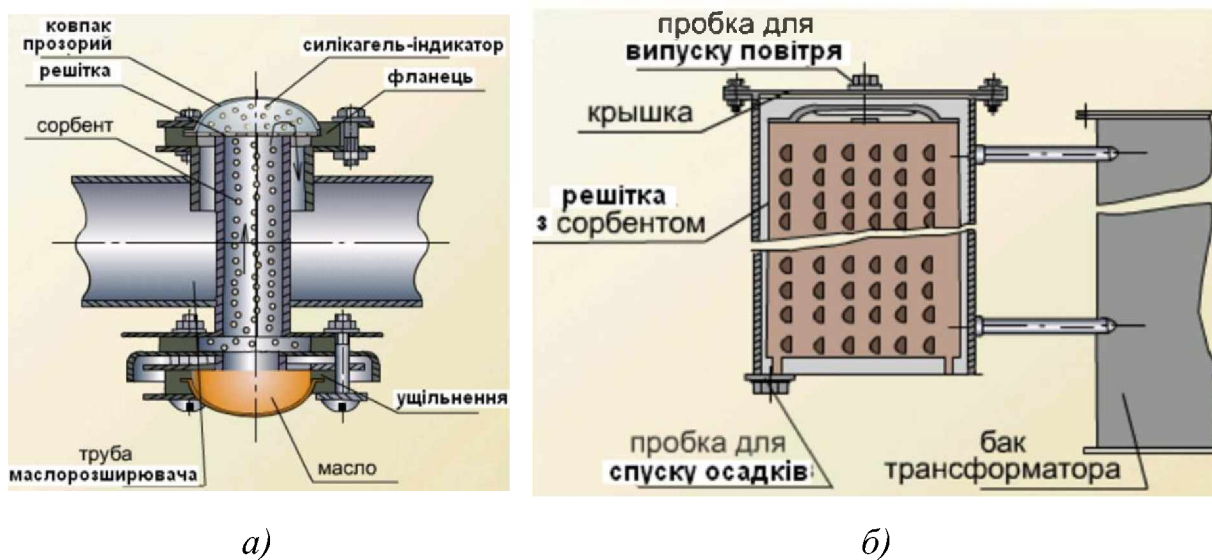


Рисунок 1.7 – Пристрої покращення та контролю стану мастила:
а – повітряосушник, *б* – термосифонний фільтр

– проблеми з перемикачами навантаження – механічні та електричні проблеми в перемикачах навантаження можуть призвести до значних проблем, які проявляються у зношенні контактів, забрудненні мастила та виникненні електричних дуг. Збої в роботі перемикачів можуть порушити роботу трансформатора, що призведе до проблем регулювання напруги та можливого загального пошкодження трансформатора (рис. 1.8) [10],

– несправність введів – вводи трансформатора, завданням яких є підведення високої напруги до трансформаторів, схильні до поломок через старіння, термічні навантаження та стрибки напруги. Несправності високовольних втулок призводять до катастрофічних несправностей, вибухів та пожеж, що вимагає здійснення регулярних перевірок та технічного обслуговування [10],

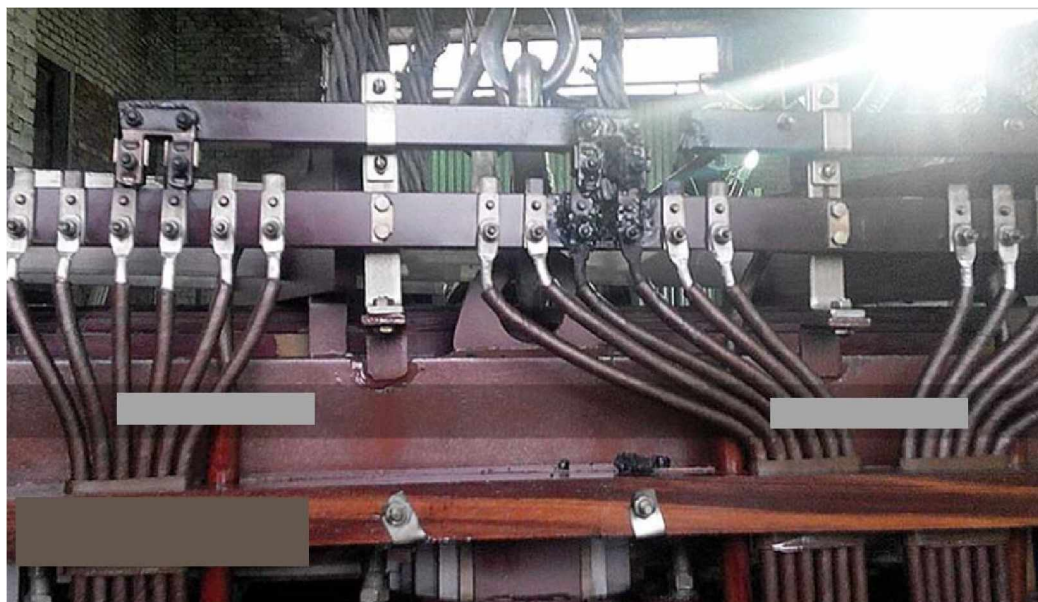


Рисунок 1.8 – Перемикач трансформатора, що вийшов з ладу

– діелектричні пробої – діелектричний пробій у трансформаторному мастилі або твердій ізоляції є критичним видом відмови, які можуть бути ініційовані такими факторами, як забруднення, старіння, надмірна вологість та підвищене значення напруги. Пробій діелектриків може призвести до катастрофічних збоїв, коротких замикань та пожеж (рис. 1.9) [10],

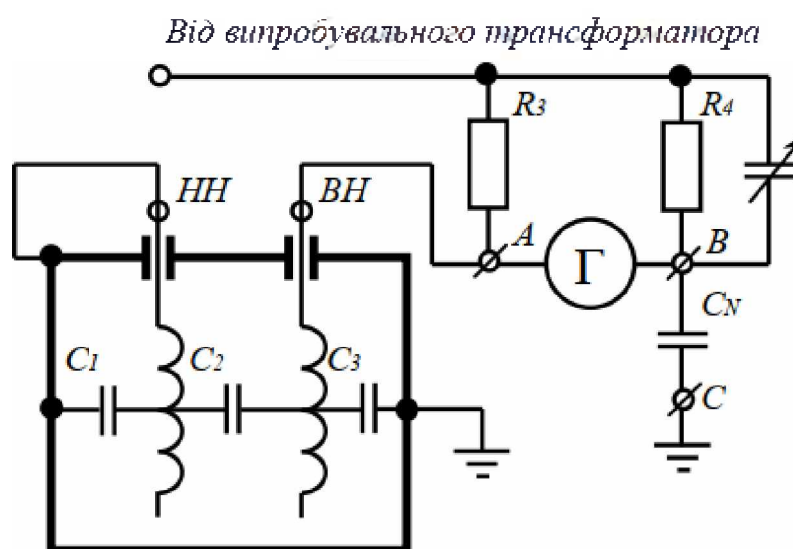


Рисунок 1.9 – Схема вимірювання діелектричних втрат в ізоляції трансформаторів

– несправності осердя – дані несправності в трансформаторах полягають у коротких замиканнях в осерді та порушеннях систем заземлення осердя, що може призвести до підвищеного шуму, вібрації та локального нагрівання. Ці несправності часто є результатом механічних пошкоджень, виробничих дефектів та/або погіршення стану ізоляції (рис. 1.10) [10],



Рисунок 1.10 – Облаштування ізоляції обмоток трансформатора навколо осердя

– вплив зовнішніх факторів – серед таких факторів можуть бути природні впливи, вандалізм та наслідки стихійних лих, які можуть пошкодити трансформатор несподівано/раптово. Ці події є практично не передбачуваними і можуть призвести до раптових та серйозних поломок трансформатора [11],

– неналежне технічне обслуговування – неадекватне або неналежне технічне обслуговування може посилити вплив існуючих проблем або створити нові. Нехтування регулярними перевірками, тестуванням та заміною деталей і мастила може призвести до зниження продуктивності трансформатора та збільшення ймовірностей виникнення поломок [10],

– проектні та виробничі помилки – іноді першопричиною несправностей трансформатора можна віднести до проектних та виробничих недоліків, що полягає у невідповідності конструкції трансформатора для визначених режимів роботи, хибний тепловий розрахунок, використання матеріалів низької якості або виробничі дефекти. Такі дефекти можуть призвести до передчасних відмов навіть за нормальних умов експлуатації [11],

– резонансні та коливальні процеси – на трансформатори можуть впливати системні резонанси та коливання, які викликають додаткові навантаження на обмотки та ізоляцію трансформаторі. Часто ці явища можуть бути викликані специфічною взаємодією трансформаторів з іншими елементами енергосистеми (кабелі, лінії передач, пристрої компенсації та інше) [11],

– невідповідність нормативним вимогам – необхідність дотримання вимог стандартів та проблем екологічного впливу (хімічне та електромагнітне забруднення). Трансформатори повинні відповідати встановленим стандартам ефективності, використовувати екологічно чисті матеріали та дотримуватися правил безпеки, що впливає на їх конструкцію, роботу та утилізацію [11],

– проблемність дотримання величини напруги – трансформатори є невід’ємною частиною підтримки заданих рівнів напруги у встановлених межах. Однак, проблеми старіння, коливання навантаження та дисбаланс систем можуть погіршити можливості регулювання напруги, що призводить до провалів або підвищень значень напруги в мережі, впливаючи на якість електропостачання та пошкоджуючи чутливе обладнання [11],

– наявність витоків мастила – витoki оливи є досить поширеною проблемою для силових трансформаторів. Витoki можуть виникнути через пошкодження ущільнень, погіршення їх якості або корозії та зниження якості матеріалу оливи. Такі витoki становлять небезпеку не тільки для

навколишнього середовища, але й погіршують ізоляційні та охолоджувальні властивості трансформаторного мастила, що призводить до зростання вірогідності виходу з ладу трансформатора,

- наявність нестабільності частоти – сучасні енергетичні системи, особливо при інтеграції альтернативних джерел енергії, характеризуються нестабільністю частоти. Ця нестабільність може вплинути на роботу трансформатора з точки зору обробки динамічних навантажень і підтримки ефективної їх роботи за змінних частотних параметрів [11],

- проблема насичення та пускових струмів – осердя трансформаторів можуть перенасичуватися під час їх приєднання до мереж, а пускові струми або перенапруги, призводять до надмірного нагрівання та пошкодження осердя трансформатора. Пускові струми можуть викликати суттєві механічні та термічні навантаження на трансформатор під час подачі напруги або в умовах наявності несправностей [11],

- неточність або обмеження моніторингу та отримання діагностичних даних – наявні засоби моніторингу та діагностики мають певні обмеження по застосуванню, можуть надавати неточні або неповні дані, що призводить до невірної інтерпретації стану трансформаторів, що може призвести до затримки або неналежного технічного обслуговування,

Трансформаторні установки і реактори оснащуються протипожежними засобами відповідно до вимог ПУЕ. Стаціонарні засоби пожежогасіння повинні бути у справному стані і підлягати перевіркам згідно із затвердженим графіком (рис. 1.11) [11].

Отже, силові трансформатори стикаються з широким спектром проблем і несправностей, починаючи від теплових, електричних і механічних навантажень і закінчуючи екологічними, нормативними та експлуатаційними проблемами. Розуміння цих питань має вирішальне значення для ефективного технічного обслуговування, надійної роботи та вдосконалення технології виготовлення та експлуатації трансформаторів для задоволення вимог сучасних енергосистем.

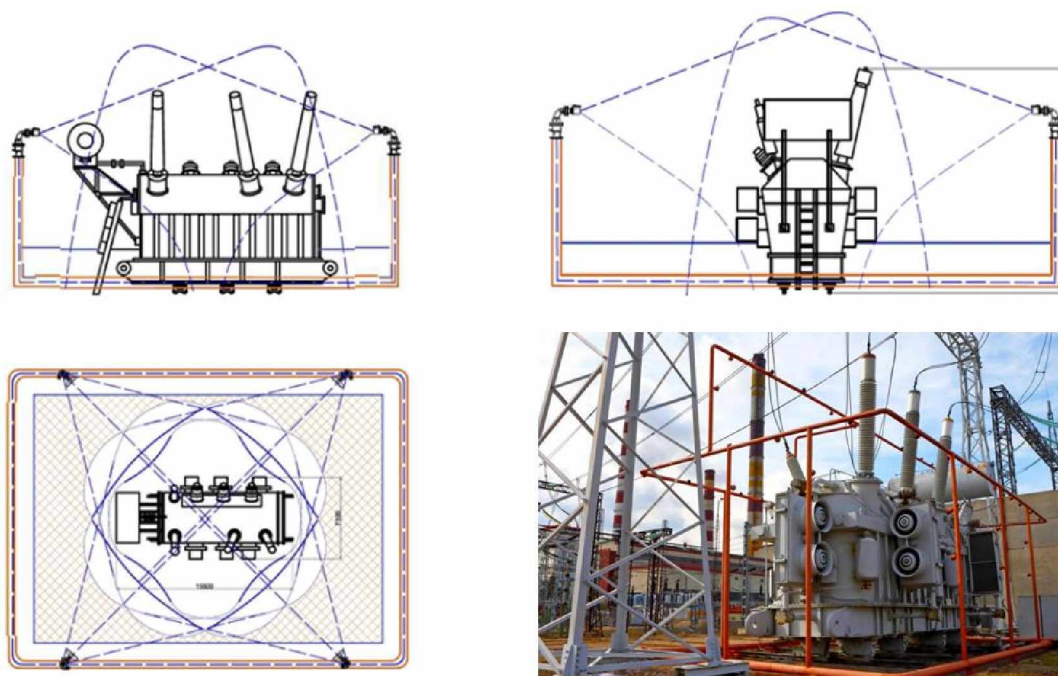


Рисунок 1.11 – Облаштування системи пожежогасіння трансформатора

1.3 Вплив режимів роботи силових трансформаторів на довговічність їх роботи

Трансформатори є критично важливими компонентами в системах електроенергії, які служать основою для ефективної передачі енергії на різних рівнях напруги. На довговічність і ефективність роботи трансформаторів суттєво впливають режими їх роботи. Ці режими визначають, чи здатні трансформатори впоратися з електричними навантаженнями та даних умов навколишнього середовища. Розуміння особливості цих режимів має важливе значення для подовження терміну служби трансформаторів та забезпечення оптимальної їх роботи.

Серед таких чинників можна виділити:

– використання способів і засобів керування навантаженням – навантаження на трансформатор значно впливає на довговічність його

роботи. Номенклатурний ряд трансформаторів розроблено для їх ефективної роботи в широкому діапазоні навантажень. Надмірне навантаження може призвести до перегріву, що прискорює деградацію ізоляції та збільшує ймовірність виходу трансформатора з ладу. Недостатнє навантаження також може негативний вплив – призводить до погіршення регулювання напруги та може спричинити зростання втрат холостого ходу та інше. Ефективне управління навантаженням, що відіграє ключову роль у довговічності трансформатора, передбачає балансування навантаження між окремими трансформаторами в мережі та забезпечує роботу кожного трансформатора в межах оптимального діапазону навантажень. Використання інтелектуальних мережевих технологій і алгоритмів прогнозування навантаження може значно допомогти в цьому процесі, забезпечуючи динамічне балансування навантаження та коригування в реальному часі на основі попиту [12],

– запровадження відповідних механізмів охолодження – механізми охолодження, що використовуються в трансформаторах, є досить визначними для забезпечення відповідної ефективності та довговічності роботи. Трансформатори здатні досить добре розсіювати тепло, що утворюється внаслідок електричних втрат, а ефективність забезпечення цього процесу безпосередньо впливає на термін їх служби. При цьому використовуються різноманітні методи охолодження (природне повітряне, природне масляне з повітряним, масляне з примусовим провітрюванням, рідкісне та інші), кожен з яких визначається умовами експлуатації та потужністю трансформаторів (рис. 1.12) [13],

– використання систем регулювання напруги – регулювання напруги є одним з ключових аспектів роботи трансформаторів, що впливає на їх ефективність та довговічність роботи. Трансформатори повинні підтримувати стабільність вихідної напруги, незалежно від коливань вхідної напруги та умов навантаження. Зазначене досягається за рахунок використання перемикачів, що здатні регулювати коефіцієнт

трансформації для ефективного регулювання вихідної напруги. Ці перемикачі можуть працювати як під навантаженням так без навантаження, забезпечуючи більшу гнучкість і чутливість до коливань напруги. Часті перемикання можуть призвести до механічного зношення та сплесків струму, що впливає на термін служби трансформатора. Вибір типу та задовільна експлуатація перемикачів повинно бути досить ретельним процесом для досягнення балансу при регулюванні напруги з міркувань довговічності [13],

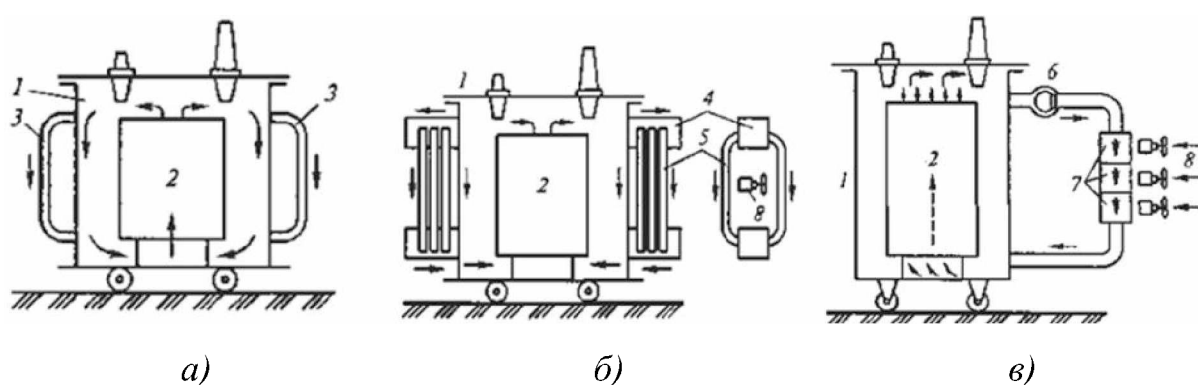


Рисунок 1.12 – Системи охолодження трансформаторів: а) типу М (ONAN); б) типу Д (ONAF); в) типу ДЦ (OFAF): 1 – бак; 2 – активна частина, 3 – охолоджувана поверхня, 4 – колектор, 5 – трубчатий радіатор, 6 – електронасос, 7 – охолоджувачі, 8 – вентилятори

– фактори навколишнього середовища – такі, як температура, вологість, наявність речовин, що викликають корозію, відіграють значну роль у ефективності та довговічності роботи трансформатора. Трансформатори, що працюють у суворих або мінливих умовах навколишнього середовища, можуть «старіти» швидше і виходити з ладу частіше,

– стан ізоляції – система ізоляції в трансформаторі має основне значення для його довговічності та ефективності – деградація ізоляції є основною причиною виходу трансформаторів з ладу. Ця деградація може

бути прискорена термічними, електричними та механічними навантаженнями. Високі робочі температури, перенапруги та коливання навантаження сприяють зношенню ізоляції з часом. Періодичне випробування ізоляції та моніторинг її стану є важливими для виявлення ранніх ознак деградації. Підтримка цілісності ізоляції має вирішальне значення, оскільки це безпосередньо впливає на здатність трансформатора протистояти електричним навантаженням і підтримувати ефективність їх роботи [13],

– профілактичне та прогнозне технічне обслуговування – полягає у важливості своєчасності і вірності рішень та стратегій, що приймаються для здійснення профілактичного та прогнозного технічного обслуговування, і має вирішальне значення для продовження терміну служби трансформатора та забезпечення його надійної роботи. Профілактичне технічне обслуговування включає регулярні перевірки, заміну оливи та заміну деталей відповідно до заздалегідь визначених графіків. При здійсненні прогнозного технічного обслуговування до уваги беруть дані, отриманні від засобів моніторингу стану та визначені шляхом проведення діагностики, що дозволяє передбачати можливі несправності до їх виникнення. Удосконалення принципів збирання даних, впровадження нових технологій аналізу та здійснення аналітики даних розширили можливості прогнозного технічного обслуговування. Завдяки можливостям раннього виявлення та вирішення проблем, прогнозне технічне обслуговування може запобігти катастрофічним збоям, мінімізувати час простою та подовжити термін експлуатації трансформаторів [14],

– вплив режиму роботи трансформатора – режим роботи трансформатора безпосередньо впливає на його ефективність. Трансформатори найбільш ефективні, коли працюють у безпосередній близькості до проектної навантажувальної здатності, що відповідає максимальному значенню коефіцієнта корисної дії (ККД). ККД набуває

незадовільних значень як при низьких, так і при високих навантаженнях через збільшення втрат холостого ходу. З огляду на це, оптимізація режиму навантаження через регулювання режиму роботи трансформатора є необхідною умовою для високоефективних показників [14].

Отже, режими роботи трансформаторів визначають їх довговічність та ефективність. Ефективне управління навантаженням, відповідні механізми охолодження, застосування способів регулювання напруги, забезпечення цілісності ізоляції, усунення гармонійних спотворень, а також широке впровадження профілактичного та прогностного обслуговування – все це є вирішальними факторами для досягнення експлуатаційної ефективності та довговічності.

Знання очікуваної «тривалості життя» трансформаторів має важливе значення для промисловості при планування заміни та модернізації. Типовий термін служби трансформатора може значно відрізнятися залежно від таких факторів, як його конструкція, техніка обслуговування та умови експлуатації. Очікувана «тривалість життя» трансформатора може залежати від якості матеріалів, з яких його виготовлено, рівня обслуговування, робочої температури [14].

Технології будови трансформаторів постійно розвиваються, що зумовлюється потребою у досягненні вищої ефективності, підвищенні надійності та інтеграції у різноманітні енергетичні системи. Серед новітніх тенденцій та інновацій у трансформаторобудуванні можна виділити [15]:

- розробку «розумних» трансформаторів – такі трансформатори ще на стадії проектування оснащуються датчиками та забезпечуються каналами зв'язку, що дозволяють здійснювати моніторинг і дистанційне керування в реальному часі. Вони можуть автономно регулювати свої робочі параметри для оптимізації за умови найвищої ефективності та зі швидким реагуванням на збої в мережі,

- впровадження «твердотільних» трансформаторів – такі трансформатори у своїй конструкції використовують напівпровідникові

пристрої замість традиційних магнітних осердь, завдяки чому підвищується ефективність при одночасному зменшенні розмірів і ваги,

– глибока інтеграція з джерелами відновлюваної енергії – вибір типу і типорозміру трансформаторів необхідно здійснювати у відповідності від планованої потужності та виду компонентів відновлюваних джерел, що інтегруються до існуючих мереж. Це дозволить ефективно перетворювати та розподіляти енергію з цих джерел,

– досягнення «нульових» викидів – при конструюванні трансформаторів необхідно намагатися застосовувати екологічно чисті ізоляційні рідини та матеріали для того, щоб зменшити вплив на навколишнє середовище під час експлуатації, обслуговування та утилізації трансформаторів.

2 РОЗРОБКА СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

2.1 Оцінка режимів роботи силових трансформаторів

Силові трансформатори є критично важливими компонентами систем електроенергії, відіграючи ключову роль для ефективної передачі та розподілу електроенергії. Оцінка різних режимів роботи силових трансформаторів має важливе значення для забезпечення їх надійності, ефективності та довговічності.

Одним з можливих підходів є аналіз характеристик навантаження. Трансформатори розроблені для ефективної роботи в певному діапазоні навантажень. Оцінка станів навантаження з плином часу допомагає зрозуміти, чи працює трансформатор у межах свого оптимального діапазону навантажень, чи піддається умовам перевантаження чи недовантаження. Перевантаження може призвести до надмірного виділення тепла, прискорюючи деградацію ізоляції, тоді як недостатнє навантаження може призвести до неоптимального рівня ефективності. Аналіз навантаження можна проводити на основі інформації від інтелектуальних датчиків та розвиненої інфраструктури вимірювання, яка дозволяє постійно контролювати навантаження та параметри ефективності роботи трансформатора [16].

Термічне моделювання та моніторинг теплового стану може також бути ефективним методом дослідження. Температурні режими роботи трансформаторів безпосередньо впливають на швидкість його старіння – високі робочі температури можуть значно скоротити термін служби трансформатора. Сучасні методи дослідження використовують тепловізори та постійний моніторинг температури, часто з використанням волоконно-оптичних датчиків, для виявлення місць перегріву та інших теплових аномалій. Отримані при вимірюванні дані можна проаналізувати

та порівняти з тепловими моделями трансформатора, щоб передбачити старіння та виникнення потенційних несправностей. Складені моделі враховують такі фактори, як температура навколишнього середовища, навантаження, конструкція трансформатора та ефективність роботи системи охолодження [17].

Іншим важливим аспектом є оцінка стану ізоляції, цілісність якої є ключовим фактором, що визначає загальний стан трансформатора. Методи аналізу розчинених газів можуть бути використані для виявлення характерних газів, що утворюються в результаті пробою ізоляції, що вказує на наявність несправностей або несправностей, що розвиваються. Інші методи можуть здійснювати аналіз діелектричної проникності, які допомагають зрозуміти та виявити поточний стан ізоляції без виведення трансформатора з експлуатації [18].

Серед основних способів оцінки режимів роботи силових трансформаторів можна виділити [19, 20]:

- тестування теплової ефективності – даний метод передбачає моніторинг робочої температури трансформатора і визначення потрапляння вимірюваних величин у визначені діапазони робочих температур, а відхилення можуть вказувати на неефективність роботи або потенційні збої. Надмірне тепловиділення може свідчити про перевантаження, погане охолодження або погіршення стану ізоляції. Цей метод може бути використаний для профілактичного обслуговування та подовження терміну служби трансформатора,

- оцінка електричних характеристик, яка включає оцінку таких параметрів, як напруги, струми, опори, втрати (без навантаження та під навантаженням) і загальне значення ККД. Регулювання напруги означає здатність трансформатора підтримувати постійність вихідної напруги за змінних вхідних умов,

- визначення параметрів під навантаженням – це тестування передбачає роботу трансформатора в різних умовах навантаження для

розуміння його поведінки. Такі дослідження допомагають виявляти потенційні проблеми в умовах високого навантаження, такі як деформація обмоток або проблеми з ізоляцією,

- оцінка діелектричного стану ізоляційних систем трансформатора, що передбачає вимірювання опору ізоляції та дозволяє оцінити якість і цілісність ізоляції, що має вирішальне значення для запобігання електричних несправностей і забезпечення безпеки роботи трансформаторів,

- здійснення акустичного тестування – даний аналіз дозволяє виявляти непритаманні внутрішні процеси та порушення умов роботи окремих частин трансформатора. Специфічні акустичні частоти можуть вказувати на такі проблеми, як іскрові розряди, вібрації осердя, електромагнітні рухи, що пропонує ідентифікувати зазначені проблеми, що можуть розвиватися досить повільно,

- аналіз стану оливи – трансформаторна олива діє як ізолятор і охолоджувач. Аналіз зразків оливи на діелектричну міцність, вміст вологи, кислотність та розчинені гази дозволяє оцінити внутрішній стан трансформатора – наявність певних газів може вказувати на певні типи несправностей (наприклад, надмірні дугові переходи або перегрів обмоток),

- аналіз частотних характеристик – цей діагностичний інструмент дозволяє виявляти деформації та зміщення обмоток шляхом розподілу і вивчення діапазону частот, як реакція трансформаторів на зміни в роботі,

- онлайн-моніторинг – за допомогою спеціалізованих систем відбувається збирання даних в реальному часі про стан робочих параметрів. Безперервний моніторинг дозволяє проводити поточну оцінку та прогнозувати технічне обслуговування на основі фактичного стану обладнання,

- гармонійний аналіз – аналіз вмісту гармонік у формах сигналів струмів і напруг допомагає визначити наявність «шкідливих» коливань, які

можуть спричинити додаткове нагрівання та викликати додаткові втрати, впливаючи на довговічність роботи трансформатора.

Зазначені методи можуть забезпечити всебічну оцінку та ефективну, надійну роботу силових трансформаторів в електричних системах.

2.2 Способи підвищення надійності роботи силових трансформаторів

Надійність роботи силових трансформаторів безпосередньо впливає на ефективність і стабільність функціонування електромереж. Щоб підвищити надійність роботи силових трансформаторів, необхідно застосовувати різні стратегії та методи, зокрема зосереджуючись на оптимізації конструкції, техніці та частоті обслуговування і використанні технологічних досягнень у сфері машинобудування, конструкційних матеріалів та електротехніки.

Розглянемо більш детально окремі способи:

1. Оптимізація конструкції трансформатора – початковий етап підвищення надійності трансформатора полягає в його передбачуваному конструюванні. При цьому першочергове значення має використання високоякісних ізоляційних матеріалів, що може забезпечити довговічність та стійкість до термічних навантажень. Під час проектування необхідно закладати оптимальні методи охолодження, встановлення інтелектуальних датчиків для моніторингу в режимі реального часу та критичних параметрів і які можуть завчасно попередити про можливі проблеми [21].

2. Регулярне технічне обслуговування та поточне і періодичне тестування – регулярність здійснення цих заходів є життєво важливим для забезпечення довговічності та надійності силових трансформаторів. При цьому здійснюється періодичне тестування оливи для перевірки наявності забруднень та вологи, що може вказувати на різні несправності [22].

3. Здійснення ефективного керування навантаженням – ці дії мають важливе значення для запобігання перевантаженню трансформаторів, що може призвести до прискореного старіння та виходу їх з ладу. Впровадження систем прогнозування навантаження та керування цим процесом може забезпечити роботу трансформаторів у межах номінальної потужності, тим самим подовжуючи термін їх служби та зберігаючи встановлений рівень ефективності [23].

4. Запровадження заходів по захисту від теплового перевантаження – встановлення таких систем захисту може значно підвищити надійність роботи трансформатора завдяки контролю температури трансформатора і технічній здатності відключати навантаження або активувати системи охолодження, якщо температура перевищує встановлені межі [24].

5. Розширене використання інструментів моніторингу та діагностики – онлайн-вимірювання, інфрачервона термографія та інші дозволяють завчасно виявляти потенційні проблеми, перш ніж вони переростуть у серйозні збої роботи. Ці інструменти забезпечують своєчасність технічного обслуговування на основі умов роботи трансформаторів [25].

6. Покращення систем охолодження трансформатора – ефективність систем охолодження безпосередньо впливає на термін його служби. Модернізація систем охолодження або оптимізація існуючих для забезпечення ефективного розсіювання тепла може значно підвищити надійність трансформатора. Ці покращення можуть включати використання більш ефективних охолоджувачів, покращену конструкцію радіаторів або інтеграцію розумних систем охолодження, що адаптуються до навантаження та умов навколишнього середовища [24].

7. Модернізація систем ізоляції є критично важливим методом підвищення надійності силових трансформаторів. З часом ізоляція трансформаторів може погіршуватися через термічне «старіння», коливання електричного навантаження та факторів впливу навколишнього середовища. Застосування ізоляційних матеріалів вищого класу та

удосконалених термостійкого паперу може підвищити термостійкість і подовжити термін служби трансформатора. Впровадження і використання належних моделей старіння ізоляції може спрогнозувати закінчення терміну служби ізоляції та прийняти рішення щодо обслуговування та заміни.

8. Застосування захисту від стрибків напруги – силові трансформатори досить чутливі до пошкоджень через стрибки напруги, що можуть бути спричинені ударами блискавки або комутаційними перемикачами. Встановлення пристроїв захисту від перенапруг може ефективно захищати трансформатори, запобігаючи пробоям ізоляції та іншим пошкодженням.

9. Регулярне очищення та регенерація оливи – трансформаторна олива відіграє вирішальну роль при ізоляції та охолодженні. З часом олива може забруднюватися водою, газами або твердими частками. Впровадження процесів очищення та регенерації оливи може відновити її властивості тим самим підвищуючи довговічність роботи трансформатора.

10. Підтримання належного стану вводів – вводи трансформатора є важливими з'єднувальними елементами між шинами високої напруги та трансформатором. Модернізація вводів шляхом виготовлених їх зі стійких матеріалів, які забезпечують кращі електричні та механічні властивості, може зменшити ризик поломок вводів.

11. Реалізація резервування елементів та впровадження модульної конструкції трансформаторів – проектування трансформаторних систем з резервуванням важливих елементів і модульної конструкції може підвищити параметр надійності. При збоях в окремих частинах трансформаторних систем, резервні компоненти можуть перейняти на себе частину роботи, мінімізуючи час простою та перерви при обслуговуванні.

12. Впровадження принципів навчання та підготовки обслуговуючого персоналу може знизити вплив «людського фактору» на роботу трансформаторних систем. Забезпечення комплексного навчання та

вивчення новітніх технологій у трансформаторах, використанню інструментів діагностики та найкращих практик технічного обслуговування може мати вирішальне значення для забезпечення довговічності та надійності роботи трансформаторів.

13. Підвищення відмовостійкості під час проектування трансформаторів може забезпечити подовжену їх роботу в умовах часткової несправності, що підвищує загальну надійність системи. Це можна забезпечити також шляхом секціонування обмоток та впровадженням систем оперативного керування, які дозволяють перемикати трансформатори на роботу зі зниженою потужністю і не вимикатися повністю у разі несправності.

14. Налаштування роботи трансформатора для конкретних умов – адаптація конструкції та режимів роботи трансформатора до конкретних застосувань і умов навколишнього середовища, що може значно підвищити їх надійність, і що потребує використання спеціальних конструкцій та матеріалів, щоб ефективно протистояти цим впливам [26].

Зазначені методи є невід’ємною частиною ефективної та надійної роботи силових трансформаторів в електричних системах. Ці методи охоплюють термічну, електричну та структурну оцінку, забезпечуючи оптимальну роботу трансформаторів за різних умов. Удосконалені методи діагностики та моніторинг у реальному часі дозволяють удосконалювати стратегії технічного обслуговування, подовжуючи термін служби та запобігаючи їх збоям. Кінцево, економічні міркування та відповідність нормативним вимогам мають вирішальне значення для сталого та безпечного управління трансформаторами. Зазначений комплексний підхід необхідний для задоволення мінливих вимог сучасних енергосистем і підтримки стабільності функціонування електричних мереж.

2.3 Огляд літературних джерел з питань підвищення надійності роботи силових трансформаторів

У статті [27] автор зосереджується на важливості планового тестування та обслуговування силових трансформаторів. Основна мета цих випробувань – оцінка цілісності корпусу трансформатора та інших елементів, оцінка якості ізоляції та оливи з визначенням та перевіркою ознак погіршення стану. У роботі наголошується на необхідності здійснення регулярного технічного обслуговування, що дозволить запобігти виникненню проблем функціонування та збоєм. Стаття призначена для користувачів трансформаторів і має відомості, що містяться у посібниках з технічного обслуговування з різних джерел і наголошуючи на необхідності планового технічного обслуговування. Документ охоплює різні випробування та перевірки, починаючи від простих візуальних перевірок і закінчуючи більш складними аналізами, такими як газова хроматографія. Підкреслюється важливість регулярного тестування та технічного обслуговування силових трансформаторів для забезпечення їх довгострокової експлуатації.

У статті [28] увага зосереджена на впливі температури на методи випробування діелектричної проникності в частотній області для оцінки трансформаторних масляно-паперових ізоляційних систем. Досліджується вплив коливання температури на розподіл вологи між маслом і папером в ізоляції трансформатора. Підкреслюється необхідність розуміння фізичної поведінки системи ізоляції при зміні температур для правильного аналізу результатів діелектричних випробувань. Моделювання дозволило встановити кореляцію між робочою температурою та діелектричною проникністю. Дослідження мало на меті прояснити труднощі в інтерпретації результатів діелектричних випробувань через коливання температури та термічну нестабільність. Одним із ключових аспектів, що

обговорюється, був вплив температури на коефіцієнт дисипації та комплексну ємність ізоляції трансформатора. З підвищенням температури зростають як реальні, так і уявні значення ємності, що вказує на зміни провідності та динаміки носіїв заряду. Дослідження сприяє розумінню діагностики ізоляції, допомагаючи в розробці більш надійних і ефективних методів моніторингу та оцінки стану силових трансформаторів.

У статті [29] проводився поглиблений аналіз того, як вологість і температура впливають на ефективність роботи силових трансформаторів. Дослідження було проведено з використанням частотної спектроскопії для оцінки стану масляно-паперової ізоляції трансформаторів. Було зазначено, що на результати випробувань суттєво впливає робоча температура та потрапляння вологи на паперову ізоляцію. Дослідники провели контрольовані лабораторні експерименти на моделі трансформатора, щоб зрозуміти ці ефекти більш повно. Експерименти були розроблені, щоб охопити діапазон умов вологості та температури, які можуть виникнути під час експлуатації силового трансформатора. У статті представлено детальну теоретичну базу, яка пояснює такі ключові поняття, як коефіцієнт дисипації та комплексна ємність. Було відзначено, що коефіцієнт дисипації збільшується з температурою на низьких частотах, і частота, на якій виникають критичні точки, також змінюється з температурою. Отримані результати говорять про необхідність врахування отриманих факторів для точної оцінки та обслуговування трансформаторів.

У статті [30] досліджується вплив гармонійних струмів навантаження на підвищення температури трансформатора та очікувану тривалість його функціонування. Розроблена в Matlab модель, базується на стандартах, встановлених посібниками із завантаження. Особлива увага була зосереджена на визначенні температури у верхньому шарі масла, які є вирішальним фактором, що визначає навантажувальну здатність трансформатора та тривалості його служби. Модель імітує теплову реакцію трансформатора на зміни струму навантаження, враховуючи

теплові константи часу, масу осердя, котушок, мастила та швидкість розсіювання тепла. Важливим аспектом дослідження є врахування гармонійних струмів навантаження, які все більше переважають у сучасних енергосистемах через наявність нелінійних навантажень. Гармонічні струми можуть призвести до додаткових втрат і нагрівання в трансформаторах, таким чином потенційно зменшуючи очікуваний термін їх служби. Дослідження демонструє, що наявність гармонік може значно підвищити температуру трансформатора, тим самим прискорюючи деградацію ізоляції та скорочуючи термін її служби. У статті пропонується комплексний та науково-обґрунтований підхід до розуміння та прогнозування температур трансформатора за різних умов навантаження, включаючи вплив гармонійних струмів.

У статті [31] здійснено поглиблене дослідження стратегій керування для трансформаторів із регулюванням потужності під навантаженням. Дослідження виявило відсутність систематичних досліджень стратегій управління експлуатацією та технічним обслуговуванням таких трансформаторів, що призвело до необхідності широкого застосування пристроїв керування, які часто не мають повної функціональності. Критичні аспекти цього дослідження включають обговорення контролю перетворення потужності, функціонування експертних систем і запобігання операційним помилкам. Стверджується, що основою трансформаторів регулювання потужності під навантаженням є перетворення між великою та малою потужностями, а основною метою цього перетворення є енергозбереження, зокрема контроль змінних втрат. З цією метою в статті створено аналітичну модель, яка розглядає трансформатор як два резервних трансформатора з відповідною великою та малою потужністю. Значна частина дослідження включає аналіз експлуатаційних втрат при різних потужностях і встановлення моделей розрахунку значення навантаження. Оптимальною точкою регулювання потужності, на думку авторів, є значення навантаження, при якому

експлуатаційні втрати рівні між собою. У документі пропонується встановити інтервальне керування для перетворення потужності, щоб мінімізувати вплив коливань навантаження та максимізувати збереження енергії. Обговорюючи стратегії запобігання неправильної роботи, у документі підкреслюється важливість усунення функцій ручного керування, суворого контролю за операціями дистанційного регулювання потужності та необхідності запиту інформації про навантаження трансформатора та рівень мастила перед виконанням будь-якої операції регулювання потужністю. Зрештою, дослідження стверджує, що для ефективного використання трансформаторів, що регулюють потужність під навантаженням, і управління ними необхідні комплексне розуміння та реалізація стратегій інтелектуального керування. Уявлення авторів ґрунтуються на практичному досвіді застосування та управління енергозберігаючим обладнанням і інтелектуальними пристроями.

У статті [32] досліджується новаторський підхід до обслуговування силових трансформаторів. Автори дослідження обговорюють розробку та застосування web-систем моніторингу в реальному часі. Ця система є значним прогресом у моніторингу стану трансформатора, пропонуючи рішення для обмежень періодичних випробувань і проблем створення стратегій технічного обслуговування. Система дозволяє здійснювати постійний дистанційний моніторинг одразу кількох силових трансформаторів, надаючи дані в режимі реального часу щодо різноманітних критичних параметрів. Архітектура вимірювальної системи була розроблена на основі технології віртуальних приладів, здатних отримувати дані від різних датчиків і передавати цю інформацію в центральний реєструючий пристрій через мережу GSM за допомогою служби GPRS. Це дозволяє отримати миттєвий доступ до стану працездатності трансформаторів, забезпечуючи своєчасне втручання та знижуючи ризик виходу їх з ладу. Моніторинг у реальному часі дозволив на ранній стадії виявити аномалії, які можуть призвести до потенційних

збоїв, демонструючи здатність системи запобігати дорогим поломкам і збільшувати довговічність трансформатора.

У статті [33] була досліджена складна сфера обслуговування силового трансформатора та керування ним. Особлива увага була зосереджена на оцінці технічного стану масляно-паперової ізоляції в трансформаторах. У роботі було представлено новий метод оцінки стану ізоляції трансформатора за допомогою меншої кількості тестів моніторингу стану при збереженні високої точності. Проблему традиційних підходів у моніторингу станів – їх дороговизна та ресурсомісткість – вирішується дослідниками шляхом розробки прогностичної моделі на основі індексів стану, що дозволяє зменшити кількість необхідних тестів. Створена модель використовує штучний інтелект, зокрема штучні нейронні мережі (ШНМ) для прогнозування індексів стану трансформаторів з обмеженою підмножиною тестових вхідних даних. Запропонована модель на основі ШНМ досягає точності прогнозування 95% за допомогою меншої кількості вхідних функцій, демонструючи свою ефективність. Модель прогнозування стану зі зменшеним набором функцій не тільки забезпечує економічну ефективність, але й підтримує високу точність оцінки працездатності трансформатора. Висока точність прогнозування моделі була перевірена на різних базах даних трансформаторів, що підкреслює її надійність і застосовність у різних сценаріях.

У статті [34] розглядається серйозна проблема у сфері систем розподілу електроенергії. Зниження надійності трансформаторів у електромережах пояснюється невідповідністю між традиційними підходами до планування надійності з боку постачальника та фактичними вимогами до надійності з боку споживача. У дослідженні запропоновано методику оцінки гранично допустимого використання трансформаторів, що забезпечує відповідність конкретним вимогам замовника щодо надійності. Ця методологія структурована як задача оптимізації зі змішаним двійковим цілим числом, що дозволяє задовольнити потреби

клієнта в надійності як на системному, так і на локальному рівнях. Автори стверджують, що в системах з високим рівнем використання кожен трансформатор потребує резервування на випадок непередбачених ситуацій і надзвичайних ситуацій. Стаття ретельно досліджує різні аспекти функціонування, пропонуючи новий підхід, який гарантує надійність обслуговування, а також максимізує використання трансформатора. Розроблена методологія є значним кроком вперед у плануванні розподілу електроенергії, демонструючи, як комунальні компанії можуть оптимізувати використання трансформаторів, зберігаючи та потенційно покращуючи надійність обслуговування клієнтів.

У статті [35] досліджується інноваційний підхід до діагностики несправностей силових трансформаторів. Силові трансформатори вимагають точних і надійних методів виявлення несправностей для підвищення безпеки електричної системи та надійності електропостачання. Традиційні методи аналізу дерева несправностей, які в основному базуються на теорії ймовірностей, часто не дають результатів через складність структур силових трансформаторів і випадковість робочих умов. Це обмеження ускладнюється обмеженістю статистики несправностей, через низьку частоту несправностей трансформаторів. У дослідженні представлено новий метод аналізу дерева несправностей, який включає теорію нечітких множин, що дозволяє перетворювати індекс частоти несправностей у нечітке число. Цей підхід дозволяє оцінювати ймовірність несправностей без потреби в наявності широкого кола статистичних даних. Дослідники описують процес проектування нечітких чисел і демонструють застосування цього методу на прикладі. Результати вказують на те, що запропонований метод аналізу нечіткого дерева несправностей є адаптивним та ефективним для діагностики несправностей у силових трансформаторах, що робить його цінним інженерним інструментом у цій галузі. Новизна цього дослідження полягає в застосуванні теорії нечітких множин для подолання обмежень

традиційного аналізу дерева відмов. Цей метод особливо підходить для аналізу подій несправності, коли точна інформація про ймовірність несправності недоступна. Підхід нечітких множин, застосований у дослідженні, може обробляти різні форми ймовірнісних даних, такі як лінгвістичні значення, точні значення та значення розділів, і перетворювати їх у трикутні нечіткі числа. Практичне застосування методу продемонстровано шляхом експериментального аналізу на основі дерева відмов силового трансформатора. Запропонований інноваційний підхід не тільки підвищує точність діагностики несправностей у силових трансформаторах, але й сприяє загальній надійності та безпеці енергосистем.

У статті [36] представлено новий діагностичний метод оцінки деформації обмотки трансформаторів, що можуть бути спричинені експлуатаційними параметрами, блискавками або аваріями на підстанціях. Традиційні методи виявлення таких деформацій є дорогими та трудомісткими. Таким чином, розробка ефективних неруйнівних методів, є життєво необхідним. Цей метод характеризується швидкістю вимірювання, здатністю нехтувати перешкодами та точністю діагностики, економить час та зусилля, зменшує ймовірність помилок. Дослідження для діагностики стану обмотки трансформатора вводить новий статистичний показник – коефіцієнт кореляції. Цей коефіцієнт базується на передавальних функціях трансформатора та розраховується для різних діапазонів частот, забезпечуючи комплексну оцінку працездатності трансформатора. Це дослідження прокладає шлях до більш надійних і ефективних методів технічного обслуговування енергетичних систем, забезпечуючи довговічність і безпеку критичної енергетичної інфраструктури.

У статті [37] пропонується новий ймовірнісний метод розрахунку індексів надійності та відповідних витрат для розподільних підстанцій. Представлено передовий підхід до оцінки надійності в системах живлення,

зосереджуючись на відмовах трансформаторів. Однак ця практика не позбавлена недоліків, включаючи витрати на зберігання, ризик пошкодження запасного обладнання, адміністративні витрати та потенційне моральне старіння через розвиток нових технологій. Щоб вирішити ці проблеми, автори представили алгоритм на основі моделювання Монте-Карло, який покращує розрахунок індексів надійності шляхом впровадження аварійних дій, таких як передача навантаження на сусідні розподільчі пристрої та підключення мобільних підстанцій. Ця методологія знаменує собою значний прогрес у порівнянні з попередніми моделями, забезпечуючи більш реалістичний і комплексний підхід до управління відмовами трансформаторів і потребами в запасних трансформаторах. Одним із ключових внесків цієї статті є розробка обчислювального алгоритму, який точно моделює різні сценарії надзвичайних ситуацій, включаючи використання запасних трансформаторів. Результати показують більш точний розрахунок індексів надійності та пов'язаних з цим витрат на перебої в обслуговуванні споживачів, пропонуючи цінну інформацію для керівників комунальних служб. Дослідження також досліджує вплив старіння трансформатора на надійність системи та експлуатаційні витрати, забезпечуючи детальне розуміння проблем у підтримці ефективної та надійної системи розподілу електроенергії. Представлена методологія не тільки покращує розуміння продуктивності трансформатора в різних сценаріях експлуатації, але також допомагає оптимізувати кількість запасних трансформаторів.

У статті [38] розглядається вплив гармонійних коливань у навантаженнях на розподільні трансформатори. Використовуючи метод кінцевих елементів була змодельована поведінка розподільного трансформатора під гармонійним навантаженням. Цей метод дозволяє детально проаналізувати щільність магнітного потоку в обмотках трансформатора, що є вирішальним фактором для оцінки роботи трансформатора під напругою. У статті ретельно оцінюються втрати

навантаження трансформатора, зосереджуючись на втратах міді та вихрових струмах, які значно збільшуються під гармонічним навантаженням. Критичним аспектом дослідження є вивчення необхідності зниження номінальних характеристик трансформаторів та зменшення навантажувальної здатності трансформатора під гармонійними навантаженнями, що має важливе значення для безпечної роботи в умовах несинусоїдного струму. Дослідження показало, що гармонічні навантаження призводять до значного підвищення температури обмотки трансформатора, потенційно прискорюючи деградацію ізоляції, ефективна потужність трансформатора зменшується, а втрати збільшуються.

3 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРИФАЗНОГО ДВООБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

3.1 Вихідні дані та визначення задач розрахунку

Вихідні дані для розрахунку режимів роботи трансформатора наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку режимів роботи трансформатора

Параметр	Позначення, од. вимірювання	Значення параметра
Номінальна потужність	S_N , кВА	2500
Напруги обмотки:		
ВН	$U_{ВН}$, кВ	35
НН	$U_{НН}$, кВ	6,3
Втрати:		
холостого ходу (ХХ)	P_X , кВт	5,1
короткого замикання (КЗ)	P_K , кВт	23,5
Напруга КЗ	U_K , %	6,5
Струм КЗ	I_K , %	1,1
Схема та група з'єднання обмоток	—	Y/Δ-II

При розрахунку режимів роботи трифазного двообмоткового трансформатора визначимо параметри Т-подібної схеми заміщення трансформатора; розрахуємо для однієї фази величини для будови повних векторних діаграм трансформатора для трьох видів навантаження (активного, активно-індуктивного та активно-ємнісного); розрахуємо та побудуємо залежність коефіцієнта корисної дії (ККД) від навантаження при різних значеннях коефіцієнта навантаження; визначимо максимальне значення ККД; визначимо зміну вторинної напруги аналітичним та графічним методом; побудуємо зовнішні характеристики трансформатора.

3.2 Визначення параметрів схеми заміщення трансформатора в режимі холостого ходу

Для того, щоб визначити параметри схеми заміщення трансформатора розрахуємо на основі вихідних даних визначальні електричні параметри.

Номінальний струм первинної обмотки трансформатора [39]:

$$I_{BH} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{BH}} = \frac{2500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 71,43 \text{ A.} \quad (3.1)$$

Фазний струм первинної обмотки трансформатора (при з'єднанні за схемою «зірка») [39]:

$$I_{1\phi} = I_{BH} = 71,43 \text{ A.} \quad (3.2)$$

Фазна напруга первинної обмотки (при з'єднанні за схемою «зірка») [39]:

$$U_{1\phi} = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3}} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 20207 \text{ V.} \quad (3.3)$$

Фазна напруга вторинної обмотки (при з'єднанні за схемою «трикутник») [39]:

$$U_{2\phi} = U_{HH} = 6300 \text{ V.} \quad (3.3)$$

Фазний струм холостого ходу трансформатора [39]:

$$I_{X\phi} = I_{1\phi} \cdot \frac{I_X}{100} = 71,43 \cdot \frac{1,1}{100} = 0,786 \text{ A.} \quad (3.4)$$

Потужність втрат холостого ходу на фазу (кількість фаз $m = 3$) [39]:

$$P_{X\phi} = \frac{P_X}{m} = \frac{5100}{3} = 1700 \text{ Вт.} \quad (3.5)$$

Повний опір гілки намагнічування схеми заміщення трансформатора при холостому ході [39]:

$$Z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_{X\phi}} = \frac{20207}{0,786} = 23709 \text{ Ом.} \quad (3.6)$$

Активний опір гілки намагнічування [39]:

$$r_0 = \frac{P_{X\phi}}{I_{X\phi}^2} = \frac{1700}{0,786^2} = 2752 \text{ Ом.} \quad (3.7)$$

Реактивний опір ланцюга намагнічування [39]:

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{23709^2 - 2752^2} = 23549 \text{ Ом.} \quad (3.8)$$

Фазний коефіцієнт трансформації трансформатора [39]:

$$k_\phi = \frac{U_{2\phi}}{U_{1\phi}} = \frac{6300}{20207} = 0,312. \quad (3.9)$$

Значення лінійного коефіцієнту трансформації [39]:

$$k_n = \frac{U_{HH}}{U_{BH}} = \frac{6300}{35000} = 0,18. \quad (3.10)$$

3.3 Визначення параметрів схеми заміщення трансформатора у режимі короткого замикання

У режимі короткого замикання вторинна обмотка трансформатора замикається накоротко, а напруга, що підводиться до первинної обмотки підбирається таким чином, щоб струм обмотки трансформатора дорівнював номінальному.

Схему заміщення трансформатора у режимі короткого замикання наведено на рис. 3.1.

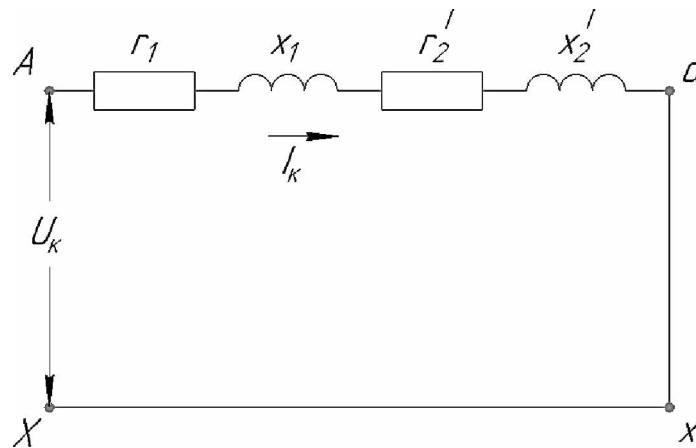


Рисунок 3.1 – Схема заміщення трансформатора у режимі короткого замикання

Фазна напруга короткого замикання [39]:

$$U_{к.ф.} = U_{1ф} \cdot \frac{U_K}{100} = 20207 \cdot \frac{6,5}{100} = 1313,5 \text{ В}. \quad (3.11)$$

Повний опір короткого замикання [39]:

$$Z_{\kappa} = \frac{U_{\kappa.\phi.}}{I_{\kappa.\phi.}}, \quad (3.12)$$

де $I_{\kappa.\phi.}$ – фазний струм короткого замикання (при з’єднанні за схемою «зірка») [39]:

$$I_{\kappa.\phi.} = I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{BH}} = \frac{2500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 41,23 \text{ A.} \quad (3.13)$$

$$z_{\kappa} = \frac{1313,5}{41,23} = 31,86 \text{ Ом.}$$

Потужність втрат короткого замикання на фазу [39]:

$$P_{\kappa.\phi.} = \frac{P_K}{m} = \frac{23,5 \cdot 10^3}{3} = 7833 \text{ Вт.} \quad (3.14)$$

Активний опір короткого замикання [39]:

$$r_{\kappa} = \frac{P_{\kappa.\phi.}}{I_{\kappa.\phi.}^2} = \frac{7833}{41,23^2} = 4,61 \text{ Ом.} \quad (3.15)$$

Індуктивний опір короткого замикання [39]:

$$x_{\kappa} = \sqrt{z_{\kappa}^2 - r_{\kappa}^2} = \sqrt{31,86^2 - 4,61^2} = 31,52 \text{ Ом.} \quad (3.16)$$

Значення опорів на схемі заміщення:

– активний опір первинної обмотки трансформатора [39]:

$$r_1 \approx r_2' = 0,5 \cdot r_{\kappa} = 0,5 \cdot 4,61 = 2,305 \text{ Ом}, \quad (3.17)$$

– наведений активний опір вторинної обмотки трансформатора [39]:

$$r_2 = \frac{r_2'}{k_{\phi}^2} = \frac{2,305}{0,312^2} = 23,68 \text{ Ом}, \quad (3.18)$$

– індуктивний опір первинної обмотки трансформатора, обумовлений магнітним потоком розсіювання $\Phi_{l\delta}$ [39]:

$$x_1 \approx x_2' = 0,5 \cdot x_{\kappa} = 0,5 \cdot 31,52 = 15,76 \text{ Ом}, \quad (3.19)$$

– наведений індуктивний опір вторинної обмотки трансформатора, обумовлений магнітним потоком розсіювання $\Phi_{2\delta}$ [39]:

$$x_2 = \frac{x_2'}{k_{\phi}^2} = \frac{15,76}{0,312^2} = 161,9 \text{ Ом}. \quad (3.20)$$

Активний опір короткого замикання [39]:

$$r_k = r_{\kappa} = r_1 + r_2' = 2,305 + 23,68 = 25,99 \text{ Ом}. \quad (3.21)$$

Індуктивний опір короткого замикання [39]:

$$x_k = x_{\kappa} = x_1 + x_2' = 15,76 + 161,9 = 177,66 \text{ Ом}. \quad (3.22)$$

Для здійснення будови векторної діаграми скористаємося Т-подібною схемою заміщення (рис. 3.2).

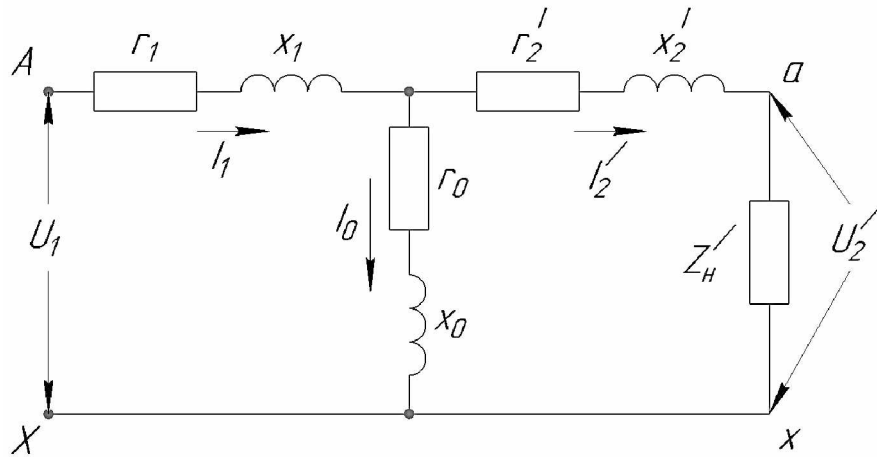


Рисунок 3.2 – Схема заміщення трансформатора у режимі короткого замикання

3.4 Будова графічних залежностей

Номінальний струм вторинної обмотки трансформатора [39]:

$$I_{2н} = I_{2л} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{HH}} = \frac{2500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 229,1 \text{ A.} \quad (3.23)$$

Фазний струм вторинної обмотки трансформатора (при з'єднанні за схемою «трикутник») [39]:

$$I_{2\phi} = \frac{I_{2н}}{\sqrt{3}} = \frac{S_H}{3 \cdot U_{HH}} = \frac{2500 \cdot 10^3}{3 \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 132,3 \text{ A.} \quad (3.24)$$

Наведений вторинний струм [39]:

$$I'_{2\phi} = \frac{I_{2\phi}}{k_{\phi}} = \frac{132,3}{0,312} = 424,0 \text{ A.} \quad (3.25)$$

Наведена вторинна напруга фази обмотки [39]:

$$U'_{2\phi} = U_{2\phi} \cdot k_{\phi} = 6300 \cdot 0,312 = 1965,6 \text{ В.} \quad (3.26)$$

Кут магнітних втрат [39]:

$$\alpha = \arctg \frac{r_0}{x_0} = \arctg \frac{2752}{23549} = 6,67^{\circ} \quad (3.27)$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора за будь-якого навантаження [39]:

$$\eta = 1 - \frac{P_x + k_{н2}^2 \cdot P_K}{S_H \cdot k_{н2} \cdot \cos \varphi_2 + P_x + k_{н2}^2 \cdot P_K} = 1 - \frac{23,5 \cdot k_{н2}^2 + 5,1}{23,5 \cdot k_{н2}^2 + 1700 \cdot k_{н2} + 5,1} \quad (3.28)$$

Максимальне значення коефіцієнта корисної дії має місце за умови [39]:

$$k_{н2}^2 \cdot P_K = P_X. \quad (3.29)$$

Тобто, коефіцієнт навантаження, що відповідає максимальному ККД [39]:

$$k_{н2max} = \sqrt{\frac{P_X}{P_K}} = \sqrt{\frac{5100}{23500}} = 0,466. \quad (3.30)$$

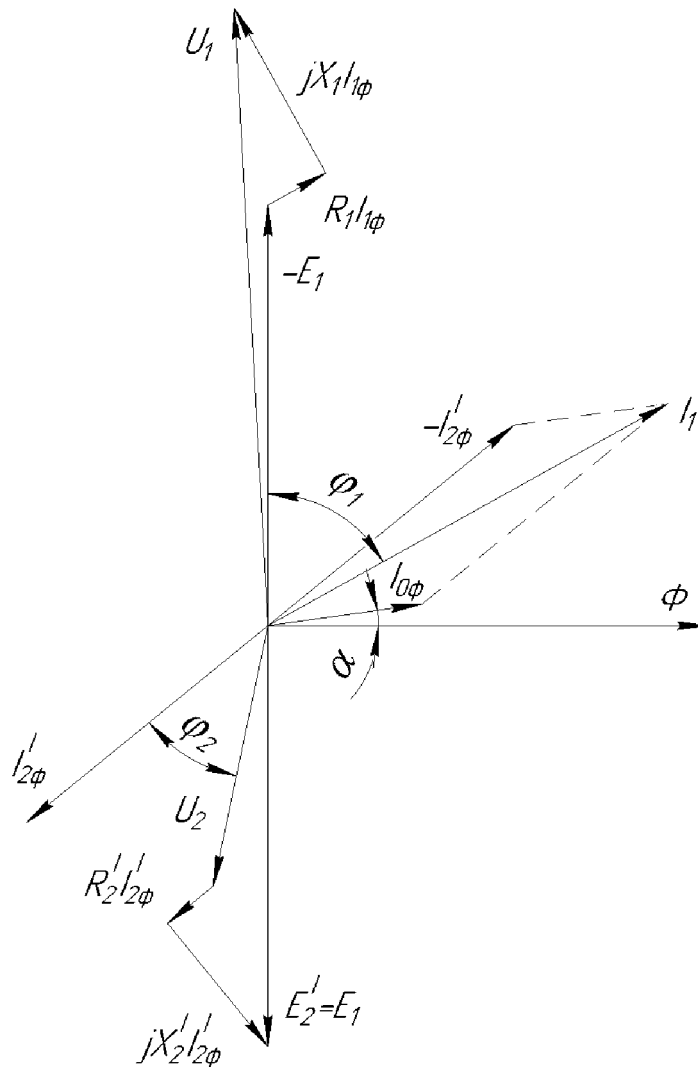


Рисунок 3.3 – Векторна діаграма трансформатора

Розрахуємо ККД трансформатора для ряду значень коефіцієнта навантаження $k_{нз}$, що відповідає частинам від номінального вторинного струму $I_{2н}$ – результати розрахунків зводимо до табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків ККД трансформатора

$k_{нз}$	0	0,25	0,466	0,5	0,75	1,25	1,5
η	0	0,985	0,987	0,987	0,986	0,981	0,978

За результатами у табл. 3.3 будемо залежність $\eta = f(k_{нз})$ – рис. 3.4.

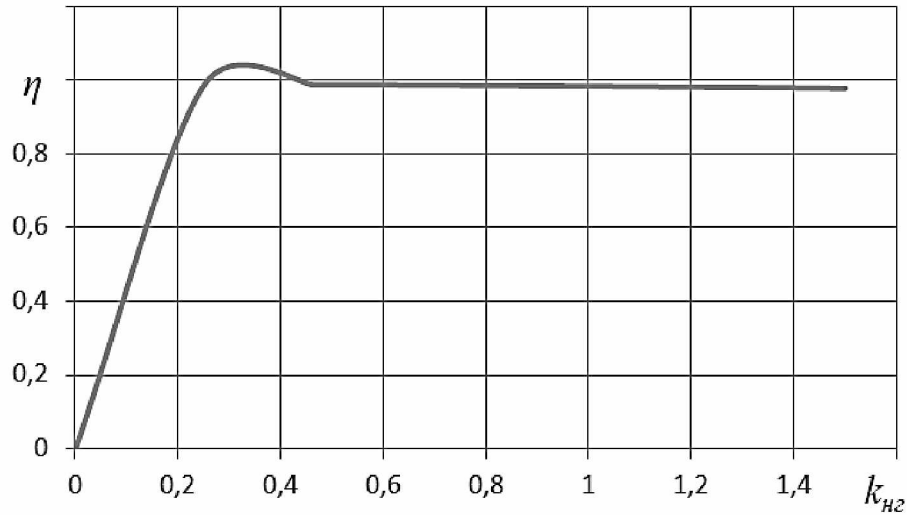


Рисунок 3.4 – Графік ККД трансформатора при різних навантаженнях

3.5 Визначення зміни напруги трансформатора при навантаженні

Зміна вторинної напруги трансформатора у відсотках від номінального значення [39]:

$$\Delta U_{\%} = (U_{\kappa.a\%} \cos \varphi_2 + U_{\kappa.p\%} \sin \varphi_2) k_{нз} \quad (3.31)$$

де $U_{\kappa.a\%}$ – активна складова напруги короткого замикання при номінальному струмі [39]:

$$U_{\kappa.a\%} = U_{K3\%} \cdot r_K / Z_K = 6,5 \cdot 25,99 / 31,86 = 5,3\%. \quad (3.32)$$

$U_{\kappa.p\%}$ – реактивна складова напруги короткого замикання, виражена у % [39]:

$$U_{\kappa.p\%} = \sqrt{U_{\kappa\%}^2 - U_{\kappa.a\%}^2} = \sqrt{6,5^2 - 5,3^2} = 3,76\%. \quad (3.33)$$

$$\Delta U_{\%} = (5,3 \cdot 0,6 + 3,76 \cdot 0,8) \cdot 0,466 = 2,88\%.$$

3.6 Будова зовнішньої характеристики трансформатора

Зовнішню характеристику трансформатора будують за двома точками: одну відкладають на осі U_2' , а другу на лінії, що відповідає $k_{нз} = 1$, відкладаючи вгору значення U_2' [39]:

$$U_2' = U_{20} \pm \Delta U \quad (3.34)$$

де

$$\Delta U = \frac{U_{20} \cdot \Delta U_{\%}}{100} = \frac{6630 \cdot 2,88}{100} = 190,9 \text{ В.} \quad (3.35)$$

– при активно-індуктивному навантаженні [39]:

$$U_2' = U_{20} - \Delta U = 6630 - 190,9 = 6439,1 \text{ В.} \quad (3.36)$$

– при активно-ємнісному навантаженні [39]:

$$U_2' = U_{20} + \Delta U = 6630 + 190,9 = 6820,9 \text{ В.} \quad (3.37)$$

Виконані розрахунки дозволяють глибоко зрозуміти принципи роботи та характеристики трифазних двообмоткових трансформаторів. Розрахунки параметрів схеми заміщення, включаючи активні та індуктивні опори, фазні напруги та струми, дають можливість аналізувати робочі умови трансформатора при різних режимах навантаження. Особливо

важливим є визначення коефіцієнта корисної дії, що допомагає оцінити ефективність трансформатора. Будова векторних діаграм та графічних залежностей сприяє візуальному розумінню взаємозв'язків між параметрами, підвищуючи інтуїтивне розуміння процесів. Аналіз зміни напруги та зовнішніх характеристик при різних навантаженнях, що є важливим для оптимізації експлуатаційних параметрів трансформаторів.

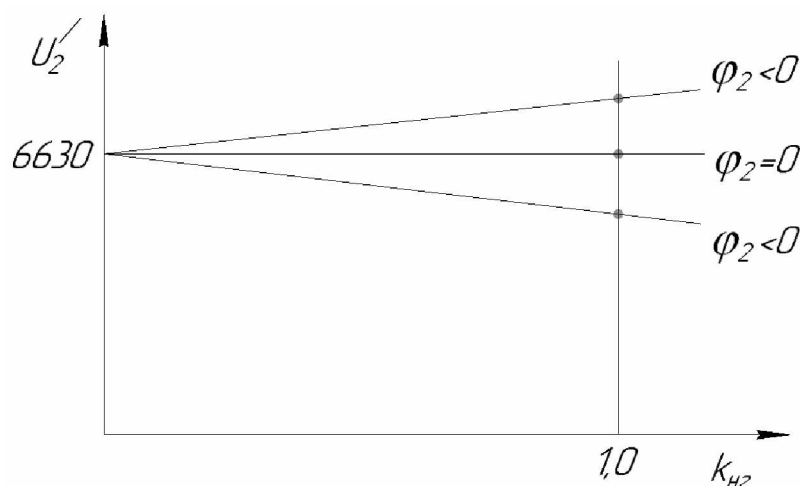


Рисунок 3.4 – Зовнішня характеристика трансформатора

Перенапруги у трансформаторах зазвичай є результатом резонансних явищ у внутрішніх обмотках трансформаторів. Для ефективного вирішення цих проблем необхідно глибоке розуміння основних причин і факторів, що сприяють резонансу. Основним фактором, що призводить до резонансу в трансформаторах, є часте перемикання обмоток, що підтверджується імпульсними тестуваннями, які імітують перехідні явища в трансформаторах. Порушення ізоляції часто виникають у тих частинах трансформатора, де перенапруги найменше очікуються, особливо в умовах недовантаження.

4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З ТРАНСФОРМАТОРАМИ

4.1 Аналіз основних методів моделювання в роботі трансформатора при перехідних процесах

Моделювання роботи трансформаторів дозволяє зрозуміти їх поведінку в умовах, які відхиляються від нормального режиму.

Моделювання може відігравати ключову роль у розумінні та вдосконаленні роботи трансформаторів, воно дозволяє не тільки аналізувати існуючі конструкції, але й прогнозувати поведінку трансформаторів в нових або невизначених умовах, що має велике значення для підвищення надійності електроенергетичних систем. При моделюванні реакції системи з трансформатором на короткі замикання у приєднаній мережі можна визначити, як змінюються параметри трансформатора – струм і напруга, при цих перехідних процесах. Це допомагає визначити потенційні ризики та розробити дії для мінімізації шкоди від цих процесів [40].

При моделюванні перепадів напруги можна побачити, яким чином трансформатори відгукуються на раптові зміни напруги, що може бути визначним для розробки заходів захисту від таких процесів.

При визначенні загальної ефективності роботи трансформатора під час перехідних процесів має суттєве значення для експлуатаційної надійності.

Моделювання цілком підтверджує теоретичні передбачення і можуть мати практичні рекомендації для покращення конструкції та управління силовими трансформаторами і вказують на необхідність здійснення подальших досліджень у цій галузі, особливо з урахуванням швидких змін у технологіях електроенергетичних систем [41].

Моделювання у середовищі Matlab може бути використано для створення деталізованих моделей трансформаторів, здатних відтворювати різноманітні перехідні процеси і дозволяє визначати реакцію трансформатора на різні зовнішні впливи. Моделювання дозволяє оцінити ризики та розробити заходи для зниження потенційних негативних наслідків. При перехідних процесах досліджується, яким чином зміна напруг, струмів та інших параметрів впливає на загальну ефективність та безпеку роботи трансформатора. Симуляції, що виконуються у Matlab, дозволяють отримати дані щодо поведінки трансформаторів під час різних перехідних процесів (наприклад, при коротких замиканнях, перепадах напруги та інше) [42].

4.2 Створення моделі поведінки трансформатора при перехідних процесах

У більшості випадків трансформатори працюють не поодинокі, а у складі підстанцій, що говорить про необхідність здійснення моделювання роботи трансформатора з урахуванням цього зауваження.

На представленій схемі (рис. 4.1) зображено модель системи вимірювання та аналізу трьохфазної електричної системи, створену за допомогою Matlab/Simulink.

Складові елементи схеми [42]:

- джерело трифазної напруги («Three-Phase Source»), що забезпечує трифазний вхідний сигнал,
- блоки вимірювання напруги («Voltage Measurement») та струму («Current Measurement») для моніторингу параметрів лінії,
- блоки безперервної дії («RMS» та «CRMS»), що обчислюють ефективні значення напруги та струму,

– двохобмотковий трансформатор («Three-Phase Transformer (Two Windings)»), який забезпечує гальванічну розв'язку електричних кіл та забезпечує відповідні рівні напруги і роботу якого ми будемо досліджувати при виникненні перехідних процесів,

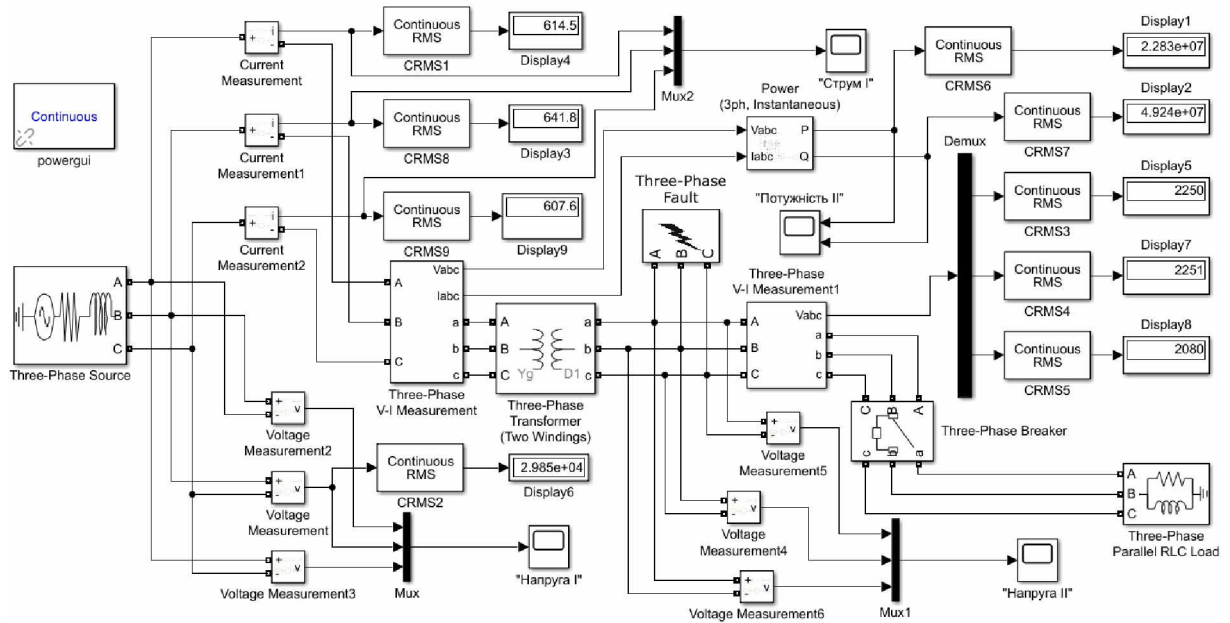


Рисунок 4.1 – Модель дослідження роботи трансформатора

– блоки відображення значень вимірюваних параметрів («Display»), що показують розрахункові значення в режимі реального часу і по закінченню моделювання,

– блоки перемикачів («Mux/Demux»), завданням яких є забезпечення комутації та сортування окремих сигналів,

– блоки вимірювання потужності у трифазній мережі («Power (3ph, Instantaneous)»), які обчислюють миттєві значення потужності для кожної фази,

– осцилографи («Scope»), які забезпечують графічне відображення вимірюваних параметрів/сигналів у часі,

– блок вимірювання трьохфазної напруги та струму («Three-Phase V-I Measurement»), які надають дані для обчислення потужності та інших параметрів,

- блок симуляції трифазного короткого замикання («Three-Phase Fault»), що здатен здійснити моделювання умов короткого замикання та аналізувати реакцію системи,
- трифазний перемикач («Three-Phase Breaker»), що здійснює підключення нелінійного споживача у певний період часу,
- нелінійний трифазний споживач («Three-Phase Parallel RLC Load»), параметри якого можна змінювати та завдавати йому активний, індуктивний, ємнісний або мішаний характер.

Робота моделі полягає у наступному: напруга з джерела трифазної напруги подається на блоки вимірювання та трансформатор, від роботи яких залежать показники напруги та струму, що вимірюються; блоки CRMS приєднуються до блоків вимірювання напруги та струму та обчислюють середньоквадратичні значення на основі вимірних показників; трансформатор перетворює напругу та струм, які вимірюються у вторинних колах; мультиплікатори та демюльтиплікатори керують напрямком сигналів для їх відображення та здійснення аналізу; потужність, що вимірюється блоками потужності, залежить від даних, які надходять з блоків вимірювання напруги та струму; сценарії короткого замикання задаються блоком «Three-Phase Fault», що може змінити показники роботи електричної системи та відобразитись на роботі інших її компонентів. Результати моделювання представимо у вигляді графічних залежностей [42].

На рис. 4.2 – 4.4 наведено результати моделювання у режимі «холостого ходу».

На рис. 4.2 зображення коливань напруги первинної обмотки при «холостому ході» – хвилі напруги мають фазовий зсув, проте коливаються синхронно. Такі коливання напруги на первинній обмотці можуть вказувати на магнітні властивості трансформатора при роботі без навантаження. Ці відомості можуть бути використані для здійснення оптимізації при проектуванні обмоток та магнітопроводу трансформаторів,

що зменшить втрати енергії та покращити їх ефективність. Аналіз цих графіків може визначити необхідність впровадження додаткових заходів для забезпечення стабільності роботи трансформаторів – використання захисних пристроїв для поглинання зайвих гармонік або вдосконалення систем живлення.

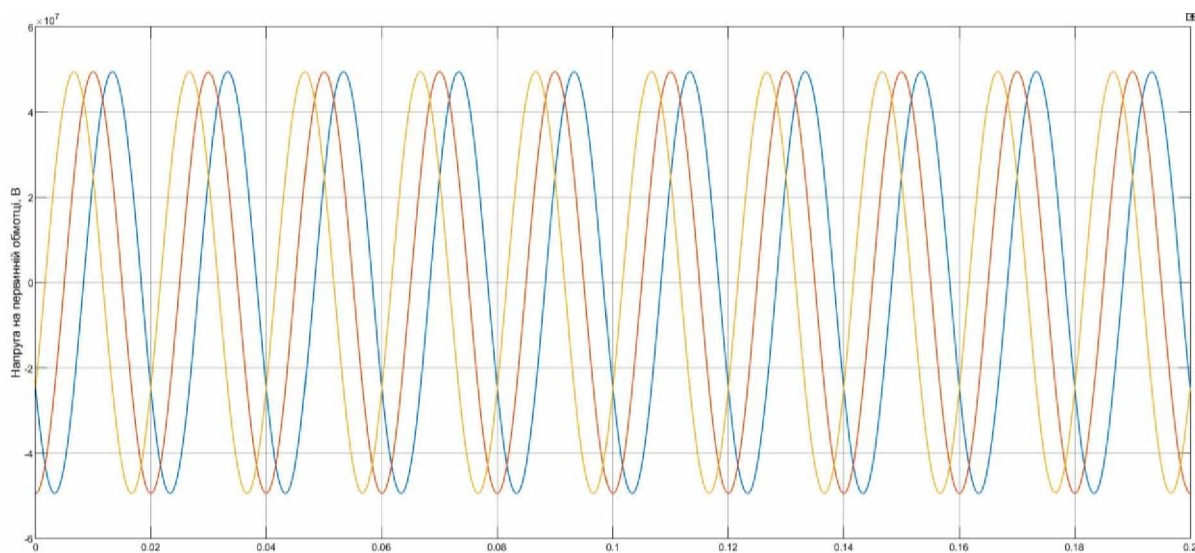


Рисунок 4.2 – Графіки зміни напруги первинної обмотки на холостому ходу

Графік на рис. 4.3 ілюструє зміни струму в первинній обмотці на «холостому ходу». Усі три фазні струми коливаються з однаковою частотою, але зсувом фаз, характерним для трифазної системи. Кожна крива має синусоїдальну форму, що свідчає про відсутність гармонійних складових або перехідних процесів. Рівномірність і симетрія коливань вказують на стабільність системи і правильність функціонування трансформатора в даному режимі. Графіки на рис. 4.4 демонструють зміну напруги вторинної обмотки на «холостому ходу». На графіку представлені три криві, які, подібно до первинної обмотки, мають синусоїдальний характер і синхронність коливань, властиву для трифазної системи. Рівномірність амплітуд і фазова симетрія кривих свідчать про стабільне перетворення енергії в трансформаторі і відсутність перехідних явищ [43].

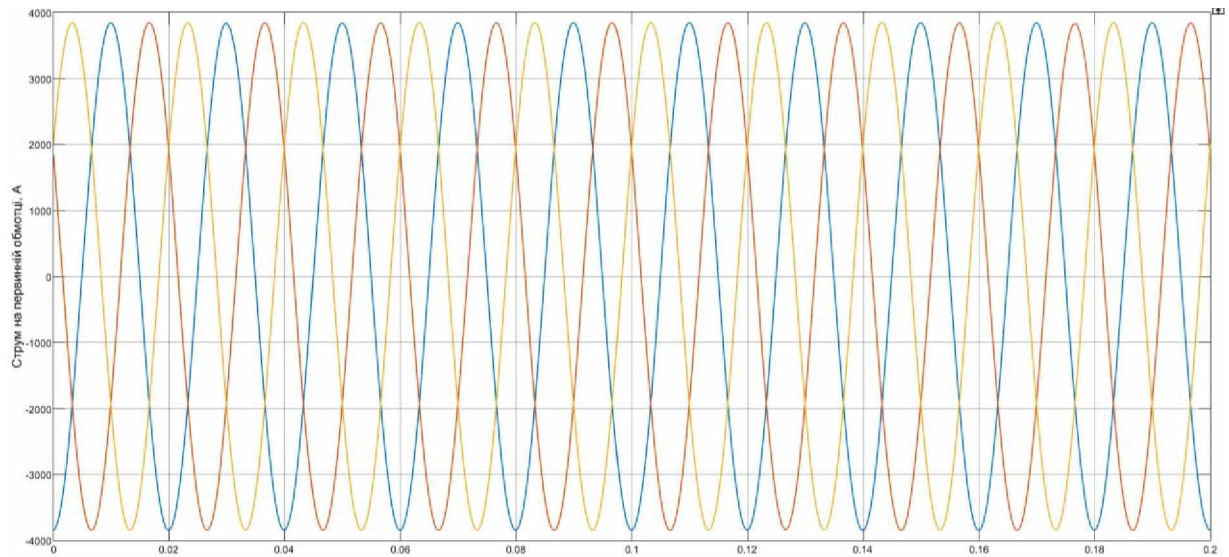


Рисунок 4.3 – Графіки зміни струму у первинної обмотки на холостому ході

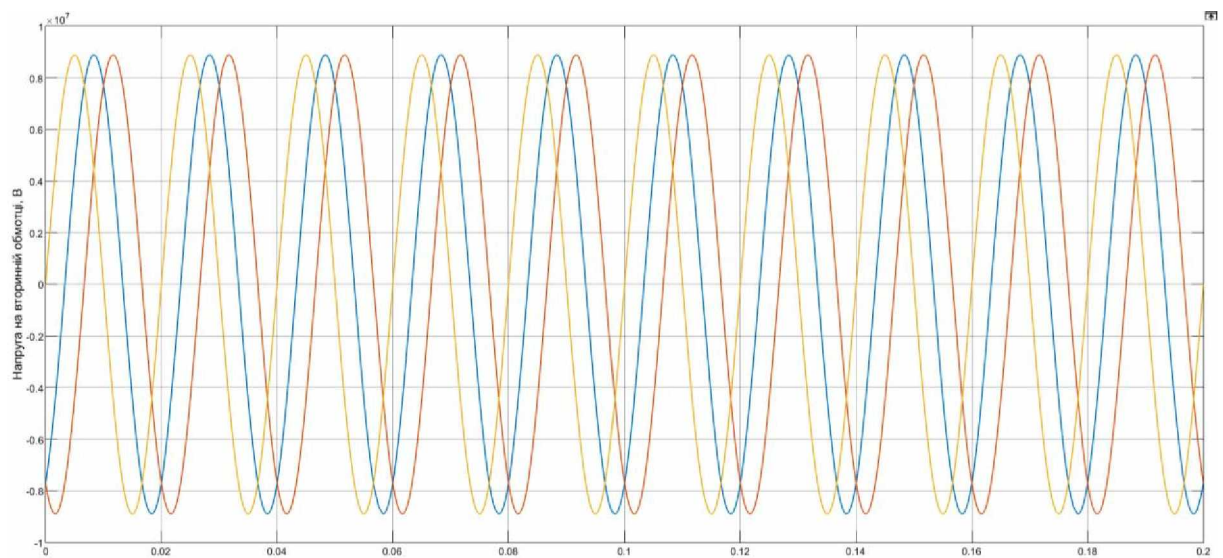


Рисунок 4.4 – Графіки зміни напруги вторинної обмотки на холостому ході

На рис. 4.5 представлено графіки змін активної та реактивної потужності на холостому ході. З графіків видно, що активна і реактивна потужності демонструють стабільність. Стабільність обох типів потужності на холостому ході вказує на низькі втрати в системі та ефективність її конструкції [43].

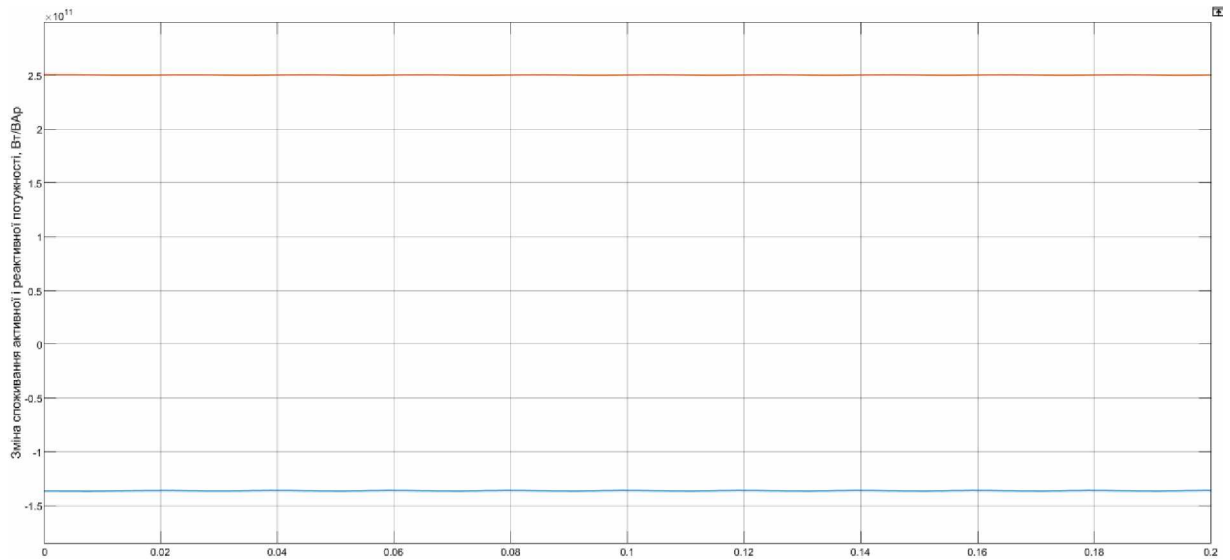


Рисунок 4.5 – Графіки зміни споживання активної і реактивної потужності на холостому ходу

На рис. 4.6 – 4.9 наведено результати моделювання у режимі «трифазного короткого замикання» на стороні вторинної обмотки.

На рис. 4.6 представлено графіки змін напруги первинної обмотки при трифазному короткому замиканні на стороні вторинної обмотки. Коливання напруг мають синусоїдальну форму, однак амплітуди зменшені в порівнянні з режимом холостого ходу, що є типовим для стану короткого замикання, коли загальний опір стає надзвичайно малим (фактично маємо режим короткого замикання для трансформатора). Криві на графіку демонструють синхронізацію і фазовий зсув, який є характерним для нормальної роботи трифазної системи, але в цьому випадку вони також відображають вплив короткого замикання. Зменшення амплітуди може вказувати на те, що система ефективно обмежує зростання струму, яке може виникнути через коротке замикання. Це важливо для захисту обладнання і забезпечення безпеки експлуатації. Аналіз таких графіків дозволяє оцінити реакцію системи на аварійні режими та адекватність роботи захисних пристроїв.

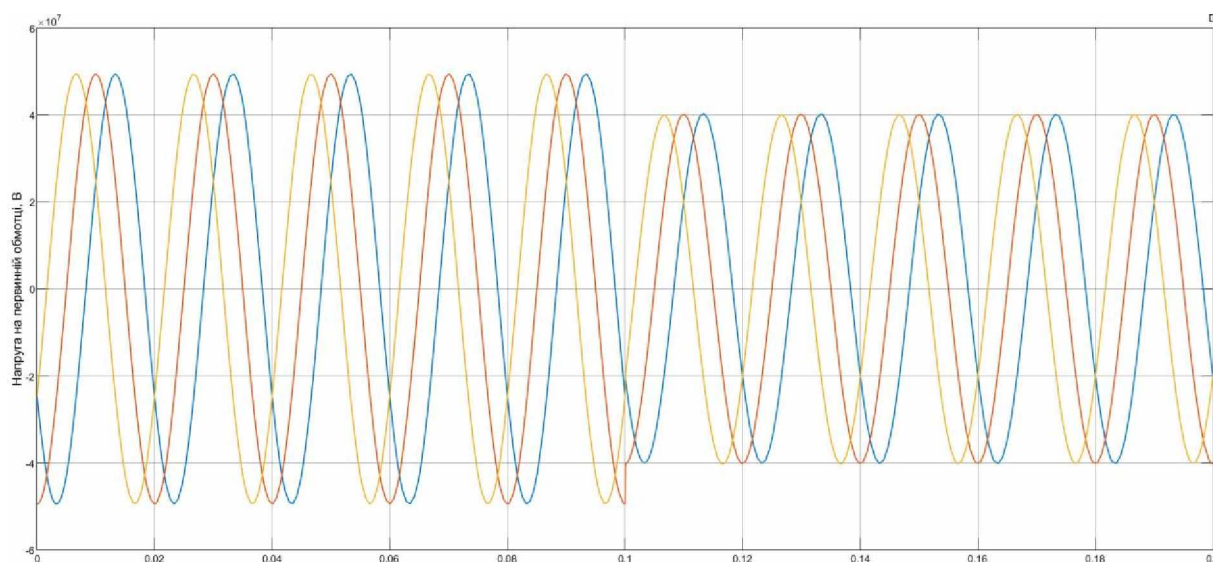


Рисунок 4.6 – Графіки зміни напруги первинної обмотки при трифазному короткому замиканні на стороні вторинної обмотки

На рис 4.7 представлено графіки змін струму в первинній обмотці при природному короткому замиканні на стороні вторинної обмотки. На графіку зображені три основні криві, які показують струм для кожної фази. В порівнянні з режимом холостого ходу, коли струм зазвичай низький, ці криві виявляють значне збільшення амплітуди, що є типовим для короткого замикання. Синусоїдальна форма кривих збережена, але збільшена амплітуда свідчить про високий ступінь індуктивності обмоток трансформатора, що обмежує швидкість зростання струму. Аналіз цих даних є критично важливим для визначення параметрів захисту та для розрахунку теплових та динамічних навантажень на обладнання в умовах аварійних режимів.

На рис. 4.8 показано графіки зміни напруги вторинної обмотки при трифазному короткому замиканні на стороні вторинної обмотки. Графіки ілюструють різкий спад напруги до майже нульових значень після моменту короткого замикання, що вказує на ефективне відключення або обмеження електричного струму в системі. Отримані дані є критично важливими для визначення параметрів захисту електричних систем і для оцінки їх надійності у випадку аварій у мережі.

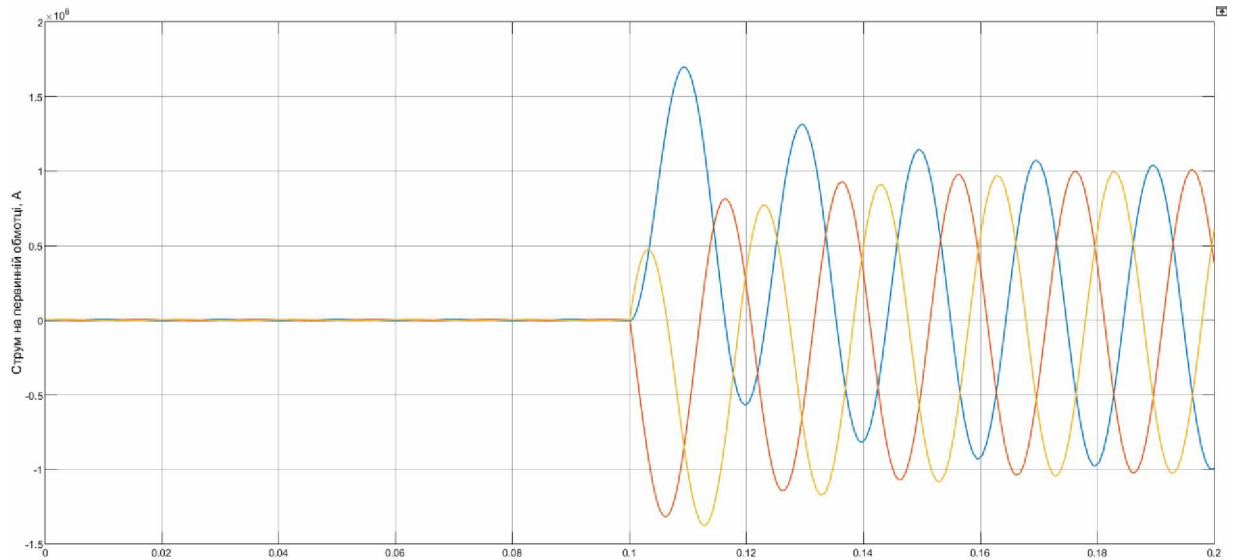


Рисунок 4.7 – Графіки зміни струму у вторинній обмотці при трифазному короткому замиканні на стороні вторинної обмотки

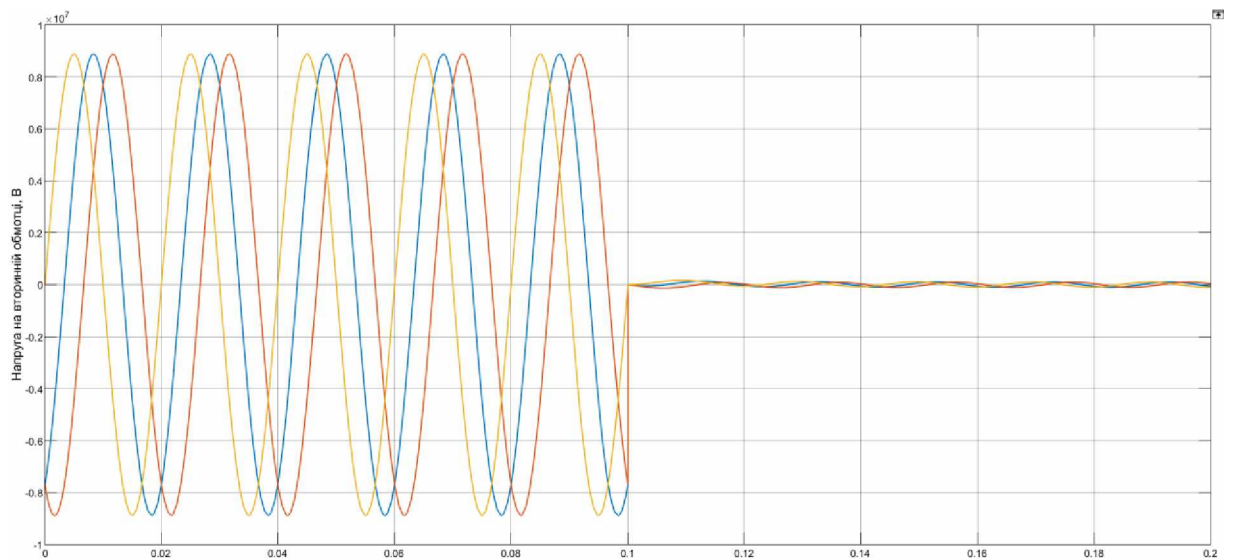


Рисунок 4.8 – Графіки зміни напруги вторинної обмотки при трифазному короткому замиканні на стороні вторинної обмотки

На рис. 4.9 відображено коливання активної та реактивної потужності під час трифазного короткого замикання на стороні вторинної обмотки. Верхня крива, що позначає активну потужність, виявляє зменшення амплітуди коливань в момент замикання, що вказує на зниження споживаної потужності через зменшення навантаження на електричну систему. Нижня крива, що представляє реактивну потужність, також

показує коливання, які зменшують свою амплітуду в момент короткого замикання, що свідчає про миттєву зміну енергетичного балансу в системі. Ці зміни в активній та реактивній потужності є важливими для розуміння впливу коротких замикань на стабільність та ефективність електричних систем. Адекватна відповідь захисних механізмів на такі події є критичною для запобігання пошкодженням та забезпечення безперебійної роботи обладнання. Динаміка коливань потужності дає можливість оцінити характеристики трансформатора та системи захисту від перевантажень.

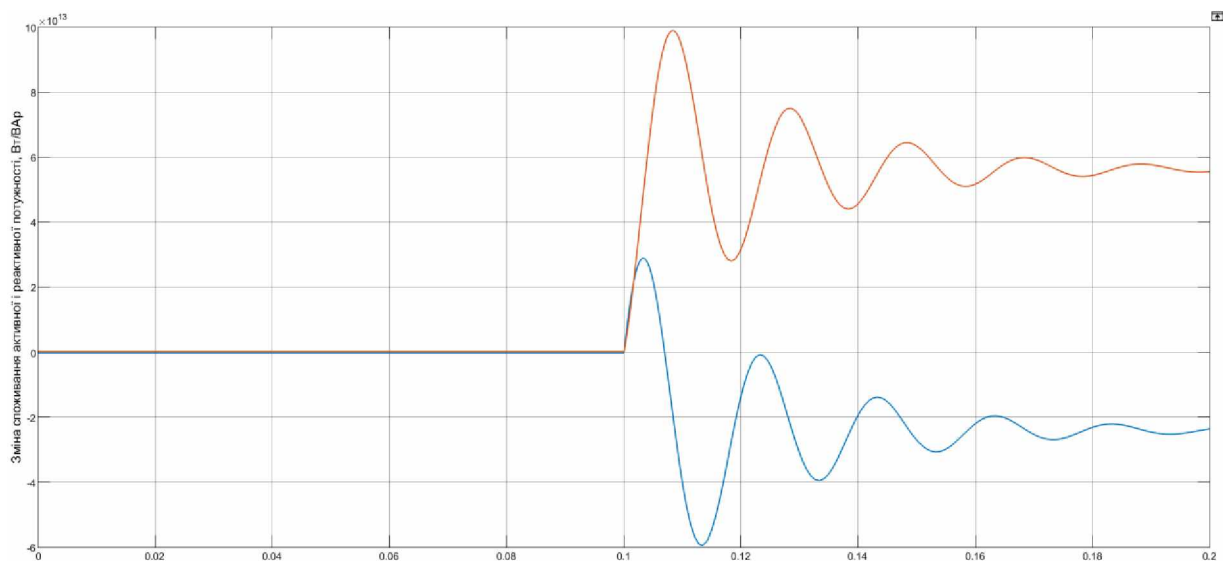


Рисунок 4.9 – Графіки зміни споживання активної і реактивної потужності при трифазному короткому замиканні на стороні вторинної обмотки

На рис. 4.10 – 4.13 наведено результати моделювання у режимі приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача (що має ярко виражений індуктивний характер) на стороні вторинної обмотки трансформатора – початок приєднання 0,2 с, кінець приєднання (від'єднання) – 0,83 с.

На рис. 4.10 показано зміни напруги на первинних обмотках трансформатора в режимі приєднання та від'єднання потужного

нелінійного споживача. З графіків видно, що в момент приєднання споживача з'являються флуктуації в амплітудах напруги, які стабілізуються після завершення процесу приєднання. Це може вказувати на вплив індуктивного характеру споживача, який викликає збільшення реактивної складової у системі та може викликати перехідні процеси в обмотках трансформатора. Коли споживач від'єднується, напруга повертається до свого нормального режиму без помітних викривлень. Стабілізація напруги після таких перехідних процесів є індикатором надійності та ефективності силових трансформаторів та захисних пристроїв, які забезпечують захист від можливих перевантажень та коротких замикань.

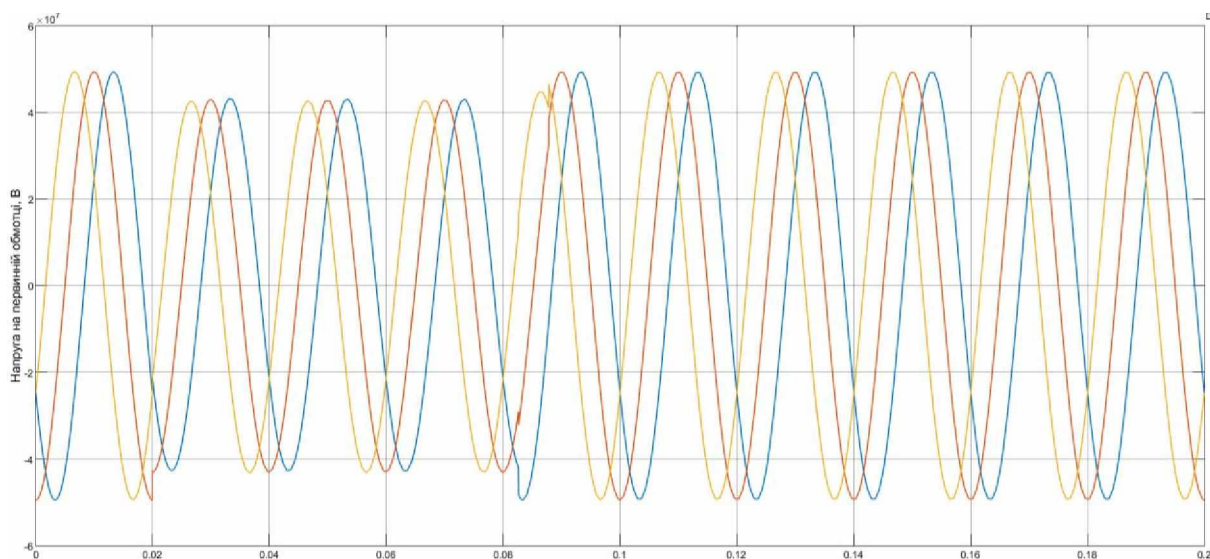


Рисунок 4.10 – Графіки зміни напруги первинної обмотки в режимі приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача

На рис. 4.11 показано графіки зміни струму в первинній обмотці трансформатора в моменти приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача. Спостерігається збільшення амплітуди струму при приєднанні споживача, що є індикатором зростання навантаження на систему. Ці піки струму можуть викликати перевантаження або навіть пошкодження компонентів системи, якщо вони перевищують їх номінальні

значення. Після від'єднання споживача струм повертається до своїх звичних значень, що свідчить про зняття навантаження з трансформатора. Ця зміна струму під час приєднання та від'єднання навантаження, що є критичним для розуміння динаміки системи та для розробки заходів захисту, щоб запобігти перевантаженням та забезпечити стабільну роботу трансформатора.

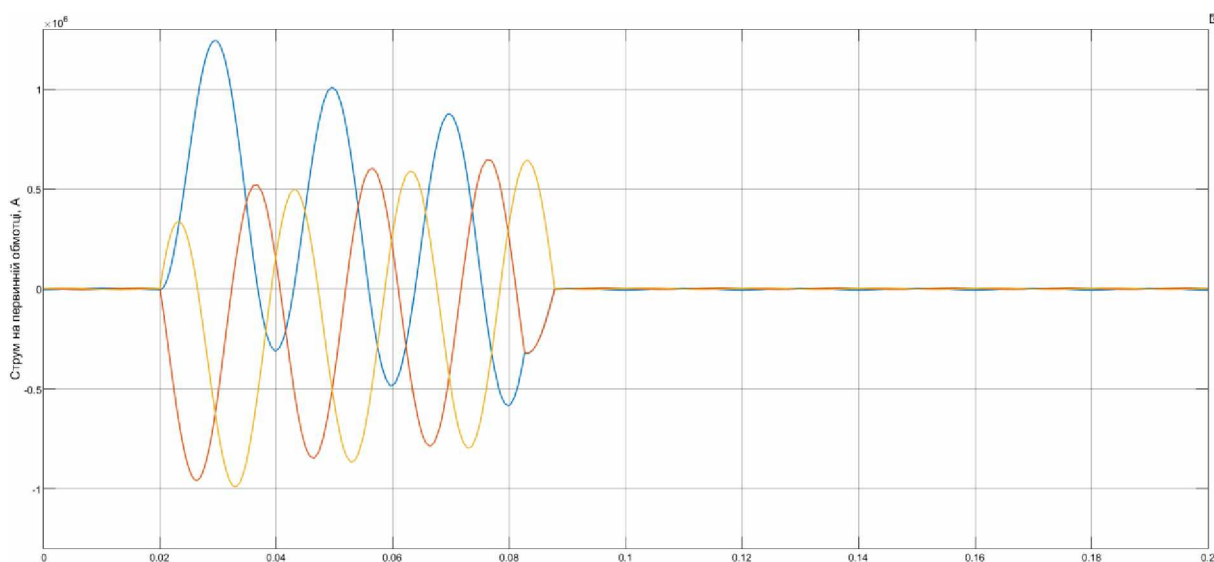


Рисунок 4.11 – Графіки зміни струму у первинній обмотці в режимі приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача

На рис. 4.12 проілюстровано зміну напруги на вторинних обмотках трансформатора під час приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача – видно, що під час приєднання виникають значні коливання напруги, які відображають миттєву відповідь системи на змінене навантаження. Ці коливання можуть бути пов'язані з індуктивними властивостями навантаження, які впливають на фазовий зсув та реактивну потужність у системі. Після від'єднання споживача напруга стабілізується, повертаючись до вихідного стабільного рівня, що свідчить про відновлення нормального режиму роботи трансформатора. Це вказує на наявність ефективної системи регулювання та захисту, здатної компенсувати вплив нелінійних змін навантаження. Результати такого

моделювання корисні для аналізу якості роботи трансформатора та розробки оптимальних стратегій захисту.

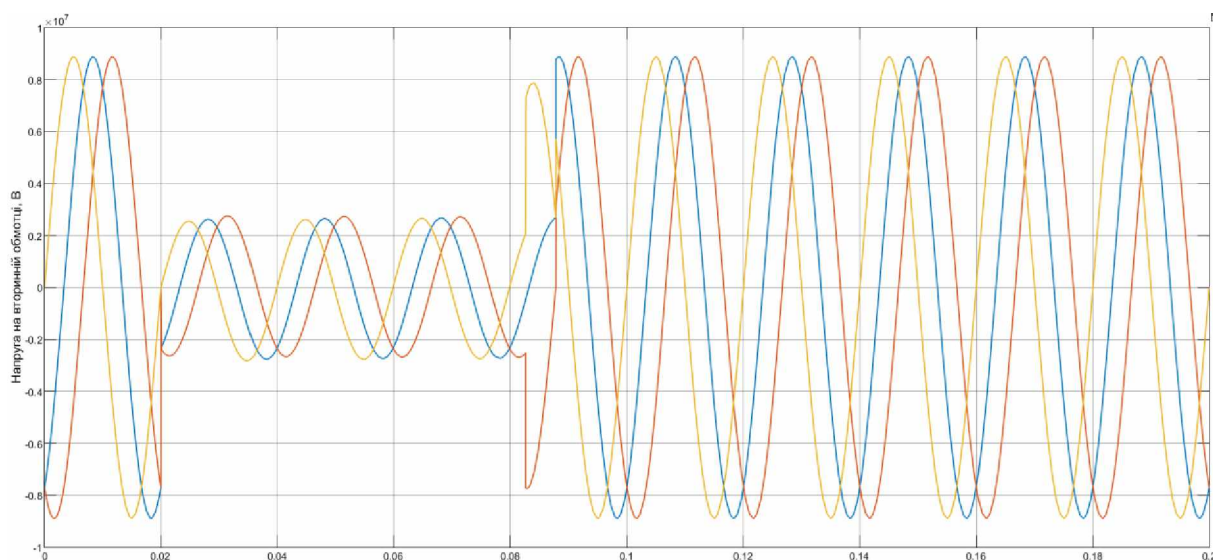


Рисунок 4.12 – Графіки зміни напруги вторинної обмотки в режимі приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача

На рис. 4.13 представлено графіки зміни активної та реактивної потужності в режимі приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача. Верхня крива відображає зміну активної потужності – пікові значення активної потужності підвищуються, що вказує на додаткове енергоспоживання з мережі. Після від'єднання навантаження активна потужність повертається до рівнів, близьких до початкових. Нижня крива представляє реактивну потужність, що показує більш виражені коливання в момент приєднання навантаження, і що є характерним для індуктивних навантажень, що впливають на фазовий зсув в системі. Ці зміни у потужностях вказують на те, що система зазнає динамічних змін під час приєднання та від'єднання нелінійних навантажень, що вимагає від системи електропостачання швидкої адаптації для підтримки стабільності напруги та частоти в мережі.

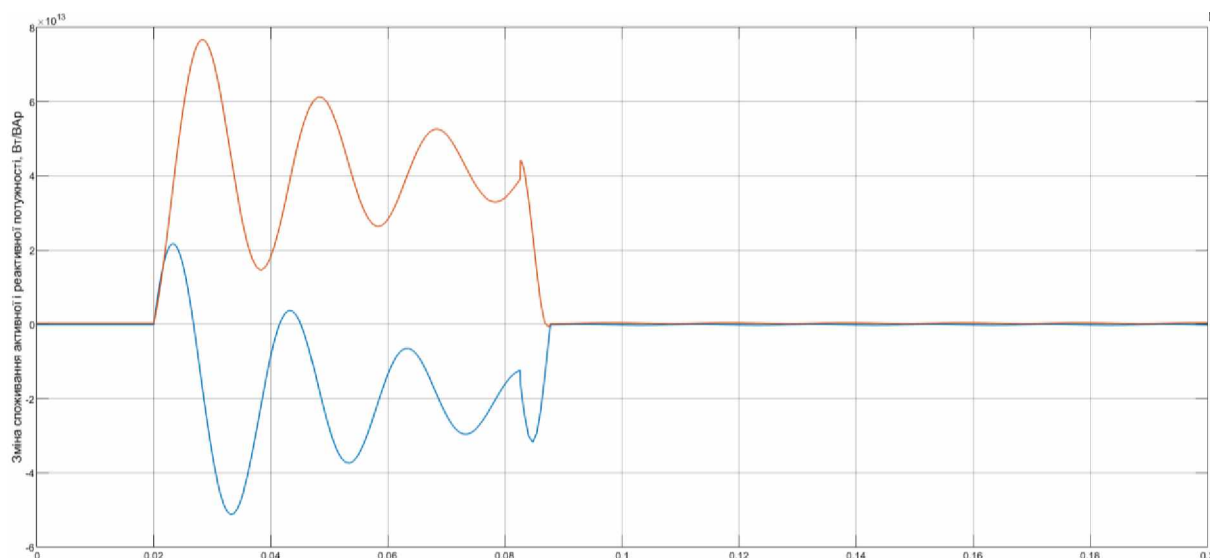


Рисунок 4.13 – Графіки зміни споживання активної і реактивної потужності в режимі приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача

На рис. 4.14 – 4.17 наведено результати моделювання у режимі приєднання потужного нелінійного споживача (що має ярко виражений індуктивний характер) – початок приєднання 0,2 с і виникнення у час 0,8 с трифазного короткого замикання (усе це відбувається на стороні вторинної обмотки трансформатора).

Моделювання демонструє те, як система реагує на внесення значних змін у навантаження, а також на критичні аварійні умови. На рис. 4.14 зображено зміну напруг на первинних обмотках трансформатора, де спостерігаються сплески, що свідчать про вплив зміненого навантаження в системі. На рис. 4.15 показано відповідні зміни струму первинної обмотки, з коливаннями, що відбивають зростання навантаження та його різке зменшення під час короткого замикання. На рис. 4.16 представлено зміни напруги вторинної обмотки, які різко падають під час короткого замикання, демонструючи миттєву реакцію системи на аварійну ситуацію. На рис. 4.17 відображено відповідні зміни в активній та реактивній потужностях – можна спостерігати зниження потужності через відсутність навантаження під час короткого замикання.

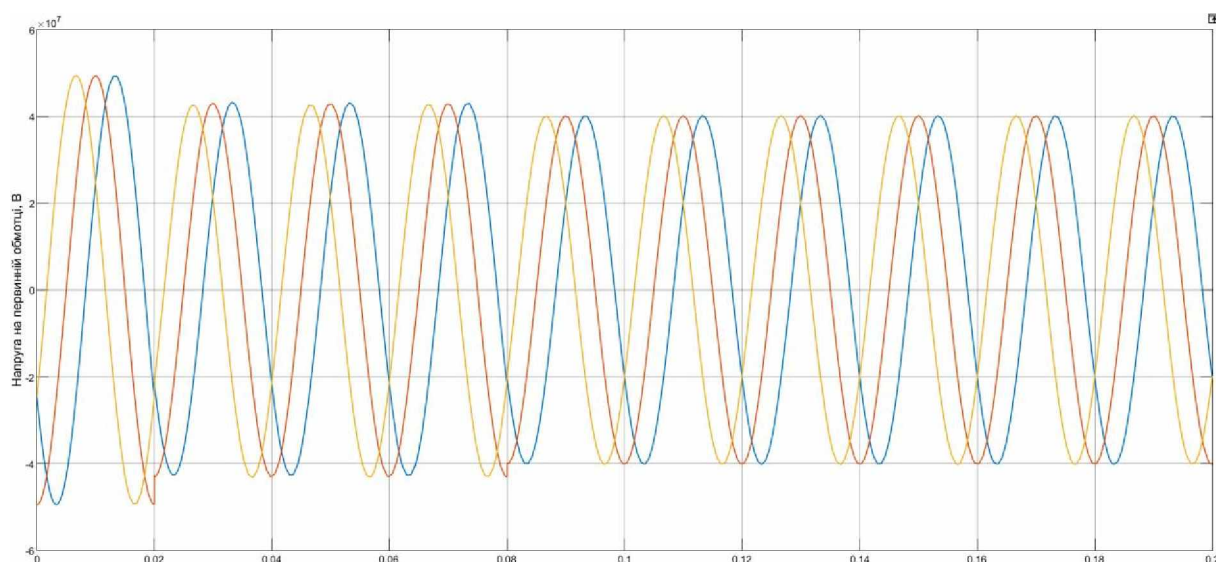


Рисунок 4.14 – Графіки зміни напруги первинної обмотки в режимі приєднання потужного нелінійного споживача і при виникненні трифазного короткого замикання

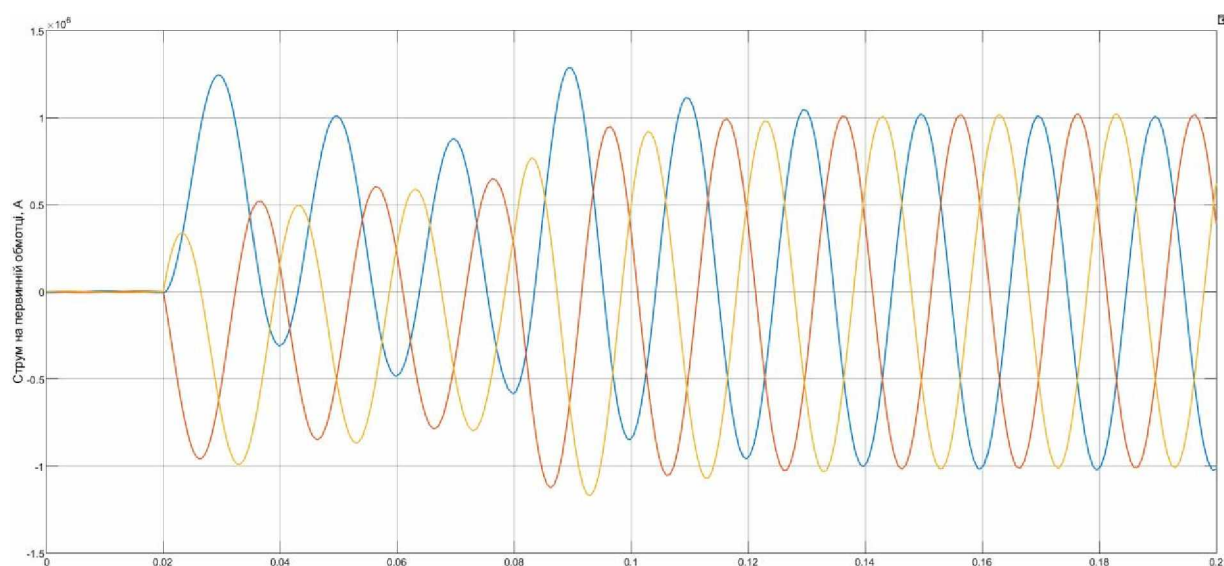


Рисунок 4.15 – Графіки зміни струму у первинної обмотки в режимі приєднання потужного нелінійного споживача і при виникненні трифазного короткого замикання

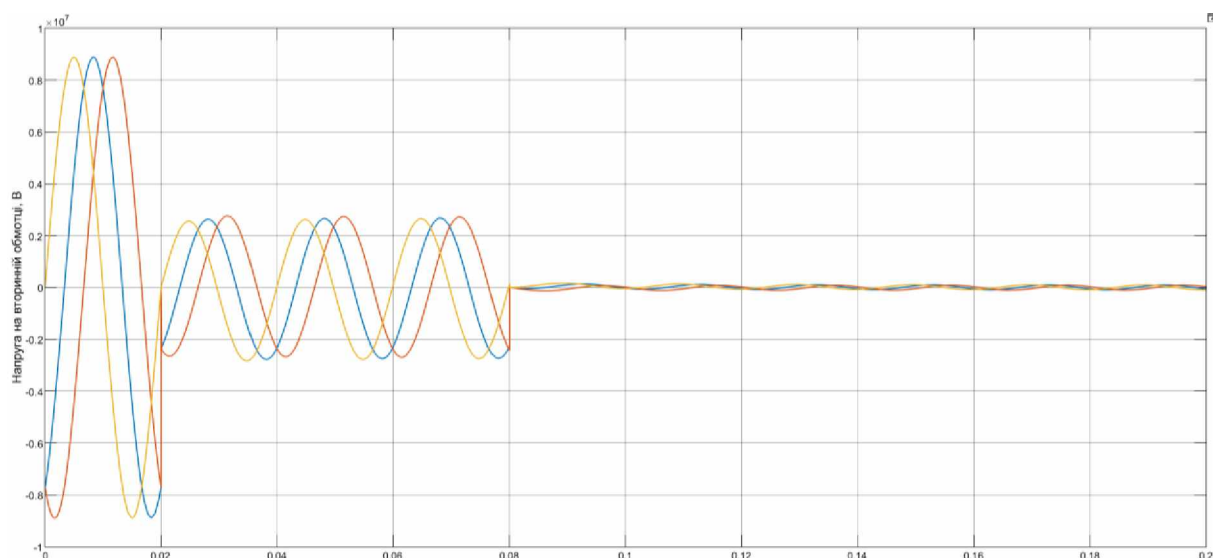


Рисунок 4.16 – Графіки зміни напруги вторинної обмотки в режимі приєднання потужного нелінійного споживача і при виникненні трифазного короткого замикання

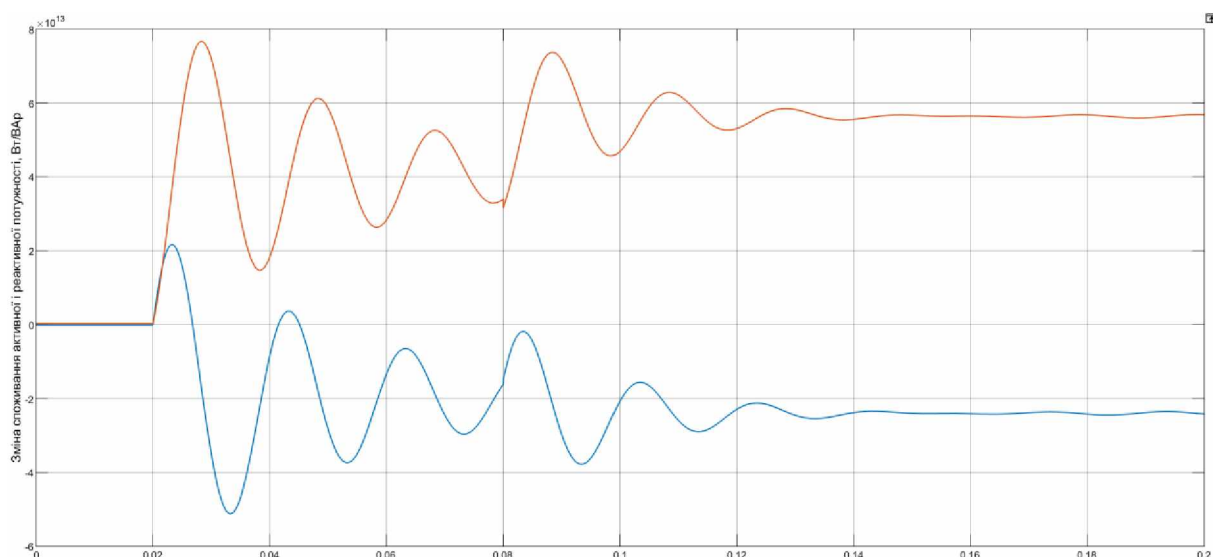


Рисунок 4.17 – Графіки зміни споживання активної і реактивної потужності в режимі приєднання потужного нелінійного споживача і при виникненні трифазного короткого замикання

Ці графіки надають інформацію про стійкість системи до перепадів навантаження та її здатність швидко реагувати на аварійні ситуації, що є ключовими аспектами для забезпечення надійності та безпеки в електричних мережах.

Аналіз графіків дозволяє зробити наступні висновки:

- наявний у системі трансформатор ефективно витримує коливання в режимах холостого ходу та при зміні навантажень, підтримуючи стабільність напруги та струму,

- приєднання індуктивного споживача викликає очікувані коливання у параметрах, що відображає здатність системи адаптуватися до змін,

- при виникненні короткого замикання спостерігається швидка реакція системи, що вказує на наявність ефективних захисних пристроїв, здатних забезпечити безпечне відключення від навантаження,

- зміни в активній та реактивній потужностях демонструють наявність і протікання перехідних процесів, які система витримує без перевищення номінальних параметрів,

- незважаючи на значні зміни умов роботи, досліджені електричні параметри показують, що система працює ефективно, адекватно розподіляючи навантаження.

ВИСНОВКИ

Силові трансформатори є одними з найважливіших елементів електричних мереж, що відіграють важливу роль у підтримці стабільності, ефективності та безпеки всієї системи. Їх надійність, що характеризується стабільною роботою в різних умовах і довговічністю, має вирішальне значення для функціональності роботи мереж. Надійність при роботі трансформаторів не тільки забезпечує ефективну передачу електричної енергії, але і зменшують кількість перебоїв в роботі підприємств, сприяють інтеграції відновлюваних джерел енергії та інше.

Широке розуміння і визначення навантажувальних характеристик силового трансформатора та електричних параметрів є досить важливим. Ефективна робота в оптимальних діапазонах навантаження запобігає таким проблемам, як деградація ізоляції через перевантаження або неефективність через недовантаження. Регулярний аналіз з використанням інтелектуальних датчиків і сучасної діагностики забезпечує надійність і довговічність трансформатора, захищаючи цілісність енергосистем.

Трансформатори у більшості випадків загалом добре справляються з імпульсними перевантаженнями. Дослідження виявили випадки стрибків напруги, які з'являються на певних частотах або в результаті несинусоїдних форм сигналів напруги. Однозначно можна казати про те, що несправності трансформаторів відбуваються переважно через перенапруги, що викликає перегрів окремих частин.

Використання сучасних програмних комплексів дозволяють удосконалювати методи моделювання, більш точно прогнозувати контрольовані параметри та визначити впливи зміни потужності з обох боків трансформатора. Здійснення прогнозного аналізу дозволяє приймати вірні рішення при виборі відповідного енергетичного обладнання та при впровадженні методів контролю, що здатні підвищити надійність та

безпеку силових трансформаторів. Моделювання дозволяє здійснювати попередню ідентифікацію та вирішувати потенційні проблеми, мінімізувати ризик відмови трансформатора із забезпеченням ефективної роботи електричної мережі.

В цілому, результати моделювання вказують на високу надійність трансформатора та системи електропостачання в цілому. Подальший аналіз цих даних може бути використаний для оптимізації дизайну трансформатора, покращення систем захисту та забезпечення стійкості електричної мережі при різноманітних умовах експлуатації.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки більш надійних та ефективних конструкцій трансформаторів. Зокрема, вдосконалити системи захисту від перепадів напруги та коротких замикань. Використання отриманих даних при проектуванні дозволить створювати трансформатори, краще пристосовані до складних умов експлуатації, що збільшить їх довговічність та зменшить потребу в частих ремонтах. Також, отримані в результаті моделювання знання, можуть бути застосовані для покращення стратегій управління енергетичними системами, особливо в ситуаціях, коли є ризик виникнення перехідних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Яцун М.А. Електричні машини: Навч. посібник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 440 с.
2. Експлуатація електроустановок: Навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Г.Г. Півняк, А.В. Журахівський, Г.А. Кігель, Б.М. Кінаш, А.Я. Рибалко; Нац. гірн. ун-т, Нац. ун-т «Львів, політехніка». – Д.: НГУ, 2005. – 446 с.
3. Петренко А.В. Технології обслуговування та ремонту електричних установок. Частина 1 / А.В. Петренко, С.С. Макаревич // К.: ЦП «Компринт», 2017 – 360 с.
4. Куценко Ю.М., Яковлев В.Ф. Електричні машини і апарати/ Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.
5. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел, норми оцінювання якості: СОУ-Н ЕЕ 43.101:2009. – Офіц. Вид. – К. ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, ДП НЕК «Укренерго» // Видавництво ДП «НТУКЦ АсЕлЕнерго», КВЩ, 2007. – 149 с. (Нормативний документ мінпаливенерго України. Норми).
6. Несправності силового електрообладнання / О.С.Марченко, Ю.М. Лавріненко, Є.Л. Жулай, М.Т. Лут та ін. за ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1994. – 288с.
7. Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні: монографія / А.І.Шевченко, С.В.Барановський, О.В.Білокобильський та інші [За заг. ред. А.І.Шевченка], Київ: ІШІ, 2023 – 305 с.
8. Експлуатація електрообладнання систем електропостачання. Навч. посібник / В.М.Буряк. – 2-ге вид. перероб. та випр. – Х.: 2008. – 496 с.

9. Експлуатація та діагностування електричних машин і трансформаторів: Навч. посіб. для студ. електромех. спец. вищ. навч. закл. / М.А. Яцун; Нац. ун-т «Львів, політехніка». – Л., 2003. – 179 с.
10. Трансформатори. Монтаж, обслуговування та ремонт: навч. посіб. / М.В. Принц, В.М. Цимбалістий. – Л.: Оріяна-Нова, 2007. – 184 с.
11. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник / М. В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – Київ: Знання, 2009. – 399 с.
12. Інтелектуальні системи керування потоками електроенергії у локальних об'єктах / О.В. Кириленко, Ю.С. Петергеря, Т.О. Терещенко, В.Я. Жуйков. – К.: Медіа ПРЕС, 2005. – 212 с.
13. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник/ М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К. Знання, 2009. – 399 с.
14. Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицький С.М. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 219 с.
15. 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.
16. Енергетичний аудит: Навчальний посібник / О.І. Соловей, В.П. Розен, Ю.Г. Лета, О.О. Ситник А.В. Чернявський, Г.В. Курбаса. – Черкаси, 2005. – 299 с.
17. Притискач І.В. Особливості використання уточнених теплових моделей силового трансформатора в системах діагностування / І.В. Притискач // Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал. – 2017. – № 2 (48). – С. 13–20.
18. Денисенко М.А. Оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів за критерієм термічного зносу їх ізоляції / М.А. Денисенко, І.В. Притискач // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – № 3. С. 78-84.

19. Хавтирко В.В. Дослідження дефектів в силових трансформаторах. XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету. Вінниця, 2018. – С. 958-960.
20. Писклярова А.В., Добровольський В.А. Дослідження методів діагностування силових трансформаторів. XLVIII науково-технічна конференція підрозділів ВНТУ, Вінниця, 2019. – С. 24-26.
21. Colonel Wm.T. McLyman Transformer and Inductor Design Handbook, Fourth Edition Electrical and Computer Engineering. US, Taylor & Francis Inc , 2011. – 667 p.
22. 2. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. - Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 376 с.
23. Стжалка-Голушка К. Зміни принципів визначення перенавантажень трансформаторів за нормою PN-EN 60345: 1999 / К. Стжалка-Голушка, Я. Стжалка // Електроінформ № 2. – 2008. – С. 14-17.
24. ДСТУ 3463-96. Керівництво з навантаження силових масляних трансформаторів. – Введ. 1999- 01-01. – 101с.
25. Ковальчук А.М., Поліщук О.В. Інтелектуальне діагностування стану силового трансформатора із застосуванням мультиагентного підходу, зб. наук, праць «LOGOS. The art of scientific mind» з матеріалами міжнар. наук.-практ. конф., м. Івано-Франківськ, 05.12.2018 р. Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2018 Т.4. – С. 77-79.
26. Піротті О.Є., Баленко О.І., Бречко В.О., Гузін М.Ю., Гонтар Ю.Г. Аналіз принципів побудови та функціональних можливостей систем моніторингу стану високовольтних силових трансформаторів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика надійність та енергоефективність, № 1 (1), 2020.
27. Smith S.D. Periodic testing and maintenance of power transformers to extend life and improve reliability. EIC 13th Electrical/Electronics Insulation Conference. 1977. doi:10.1109/eic.1977.7461936.

28. Yew J.H., Saha T.K., Thomas A.J. Impact of temperature on the frequency domain dielectric spectroscopy for the diagnosis of power transformer insulation. IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2006. doi:10.1109/pes.2006.1709037.
29. Yew J.H., Pradhan M. K., Saha T. K. Effects of moisture and temperature on the frequency domain spectroscopy analysis of power transformer insulation. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. 2008. doi:10.1109/pes.2008.4596244.
30. Gouda O.E., Amer G.M., Salem W.A. Predicting transformer temperature rise and loss of life in the presence of harmonic load currents. Ain Shams Engineering Journal, 3(2). 2012. p. 113–121. doi:10.1016/j.asej.2012.01.003.
31. Jianjun L., Jinlei H., Xiaoping L., Jingtao Y., Zhongyu Z., Shulin L. Control Strategy Study and Discussion of On-Load Capacity Regulating Transformer. 8th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA). 2015. doi:10.1109/icicta.2015.91.
32. Wagle A.M., Lobo A.M., Santosh Kumar. A., Patil S., Venkatasami A. Real time web based condition monitoring system for power transformers – Case study. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. 2008. doi:10.1109/cmd.2008.4580216.
33. Alqudsi A., El-Hag A. Assessing the power transformer insulation health condition using a feature-reduced predictor mode. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 25(3). 2018. p. 853–862. doi:10.1109/tdei.2018.006630.
34. Wang J., Kirtley J., Carvalho P.M.S. Improving transformer's utilization under customer reliability requirements. IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2013. doi:10.1109/pesmg.2013.6672530.
35. Wu T., Tu G., Bo Z.Q., Klimek A. Fuzzy Set Theory and Fault Tree Analysis based Method Suitable for Fault Diagnosis of Power Transformer.

International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems. 2007. doi:10.1109/isap.2007.4441664.

36. Wu J., Mao C., Han Y., Huang G., Yang C., Yang F., Ren F. Influence factor on sweep frequency impedance to detect winding deformation within power transformer. IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). 2016. doi:10.1109/ipmhvc.2016.8012832.

37. Costa J.G. de C., Leite da Silva A. M., Hamoud G. A., Pureza I. M., Silva Neto N. Probabilistic evaluation of distribution power transformers reliability indices considering load transfers and mobile unit substations. Electric Power Systems Research, 187, 106501. 2020. doi:10.1016/j.epsr.2020.106501.

38. Iskender I., Najafi A. Evaluation of transformer performance under harmonic load based on 3-D time stepping finite element method. 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). 2014. doi:10.1109/ichqp.2014.6842827.

39. Електричні машини: підручник / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, О.Б. Котов та ін.; за заг. ред. Б.Т. Кононова. – Харків: ХУПС, 2015. – 493 с.

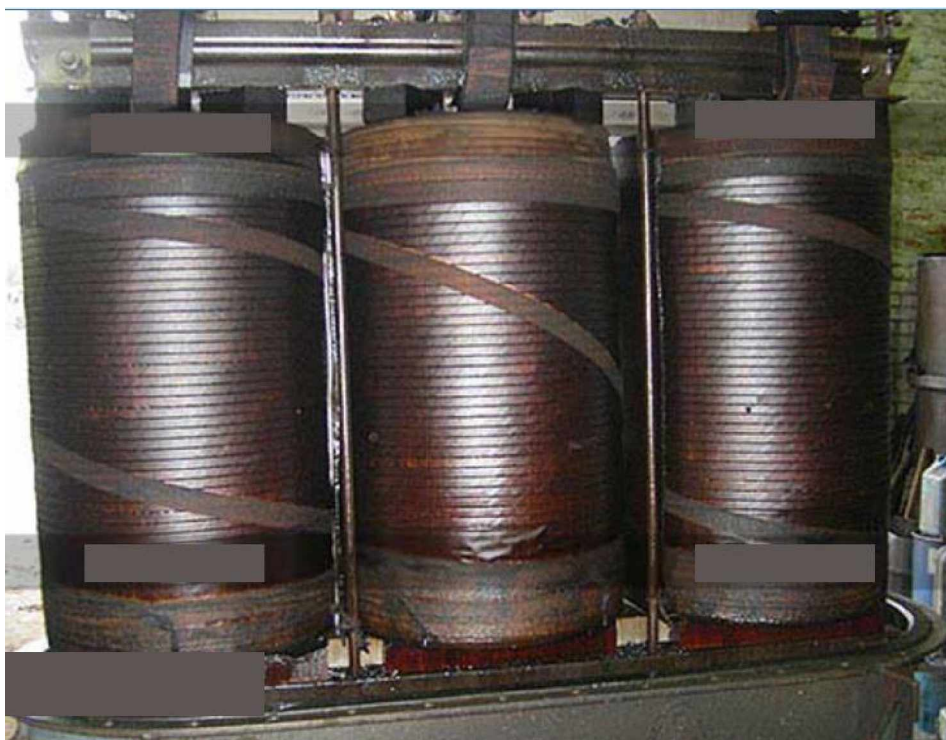
40. Методи моделювання трансформаторів та реакторів: Монографія / В. Ф. Іванков, А. В. Басова, І. В. Хімюк. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2017. – 490 с.

41. Гліненко Л. К. Основи моделювання технічних систем: навч. посіб. для студ. ВНЗ / Л. К. Гліненко, О. Г. Сухоносів. - Львів : Бескид Біт, 2003. – 176 с.

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

43. Белікова Л.Я. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Л.Я. Белікова, В.П. Шевченко. – Одеса: Наука і техніка, 2012. – 478 с.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



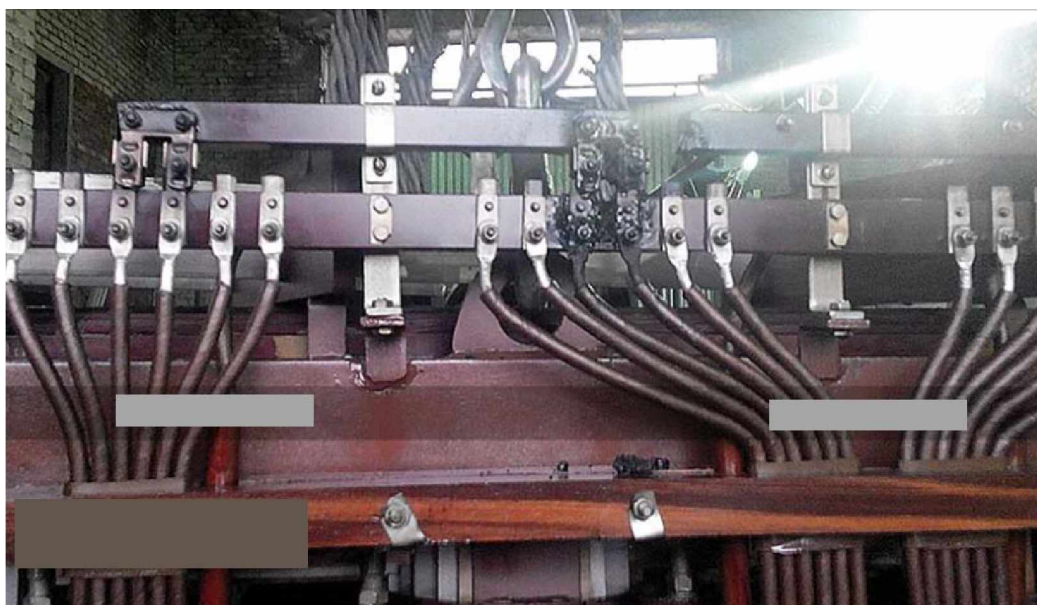
Зношення ізоляції внаслідок нагріву і коксоутворення оливи (грілися місця з'єднання демферів з виводами низької напруги)



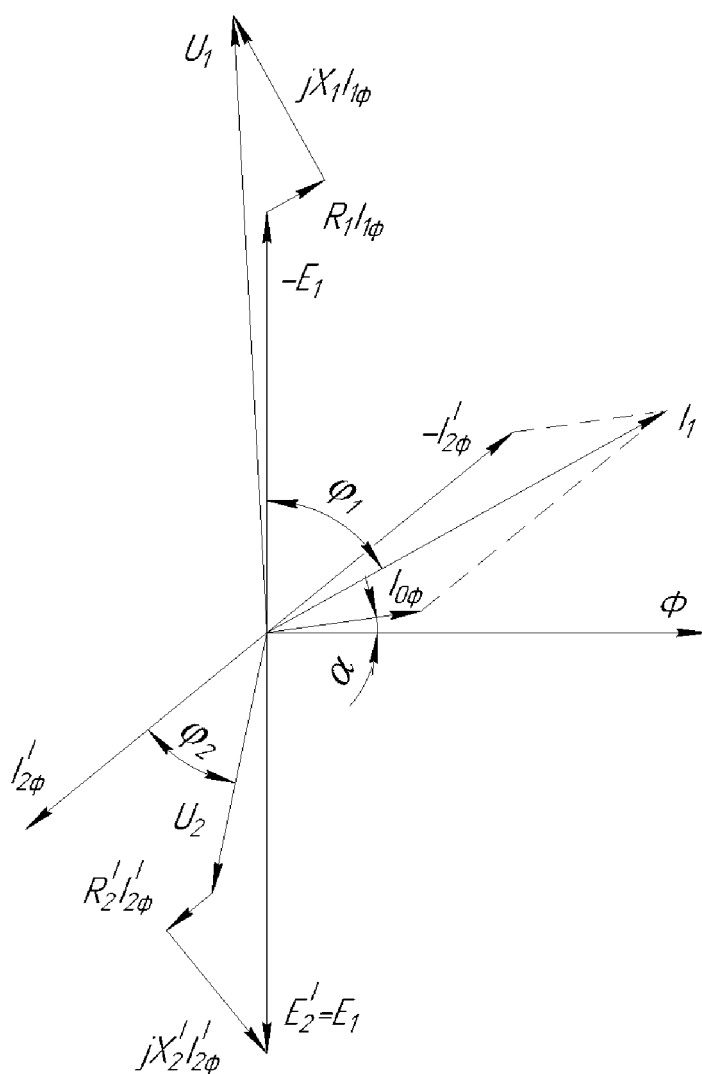
Коротке замикання обмотки високої напруги трансформатора потужністю 2500 кВА в литій ізоляції



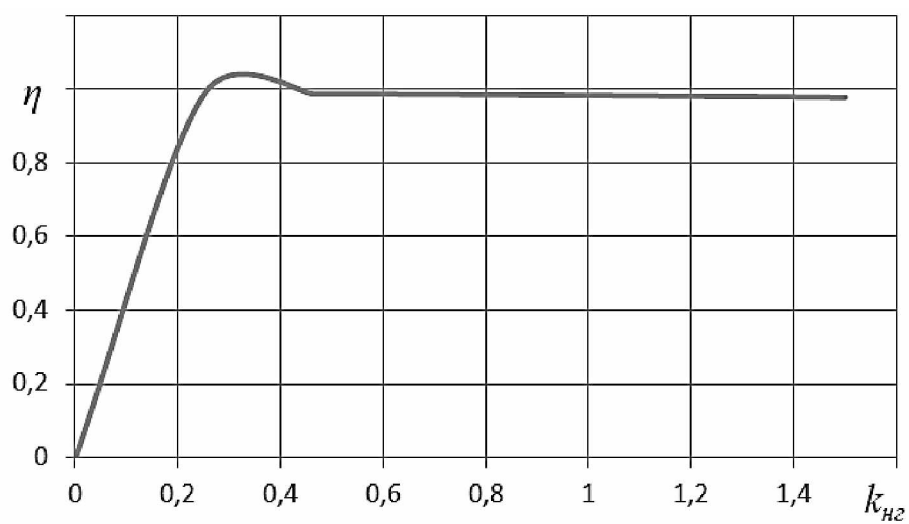
Прогар і механічне пошкодження обмотки високої напруги внаслідок потужного короткого замикання на трансформаторі



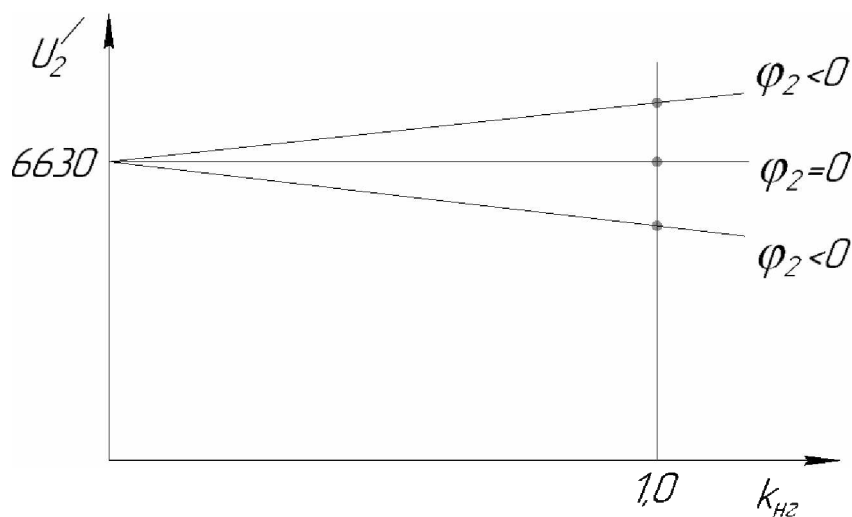
Перемикач трансформатора, що вийшов з ладу



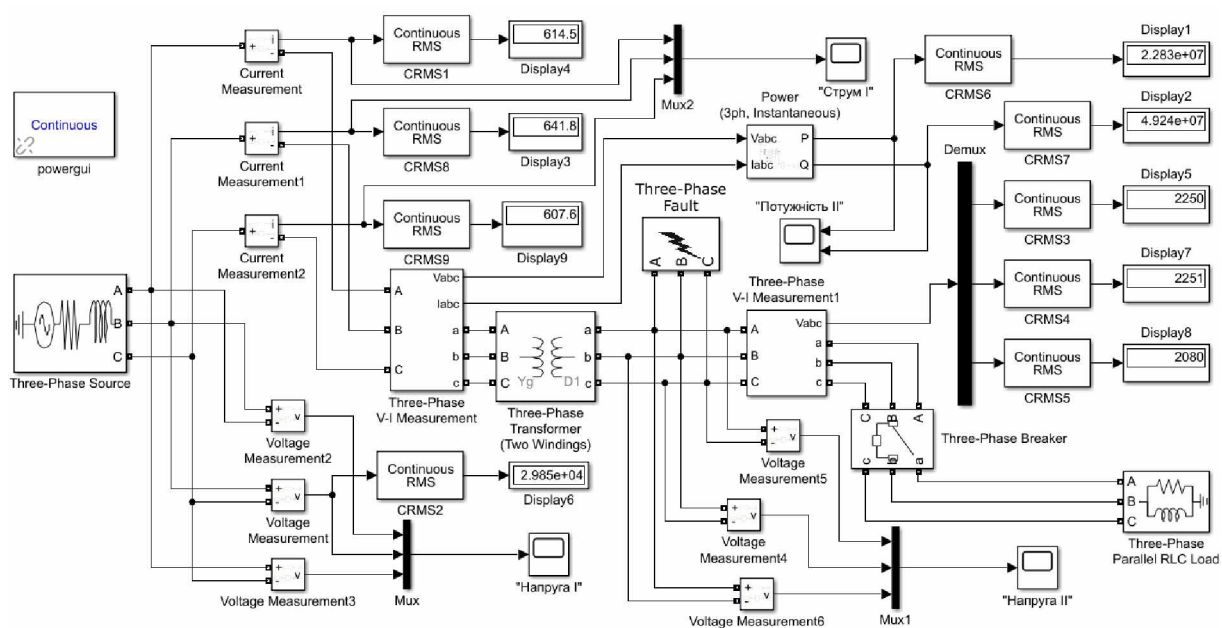
Векторна діаграма трансформатора



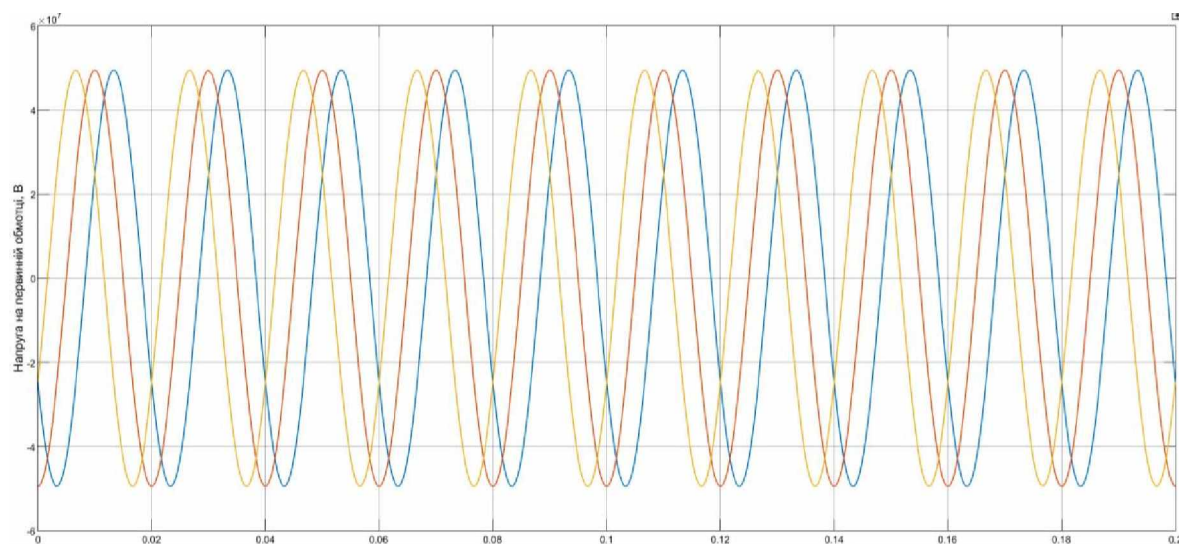
Графік ККД трансформатора при різних навантаженнях



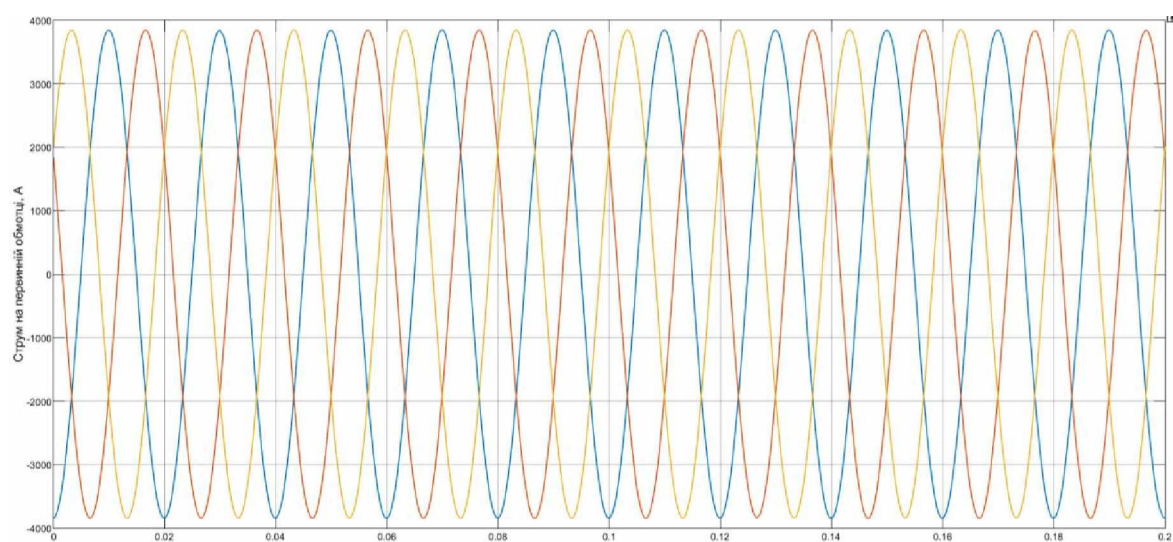
Зовнішня характеристика трансформатора



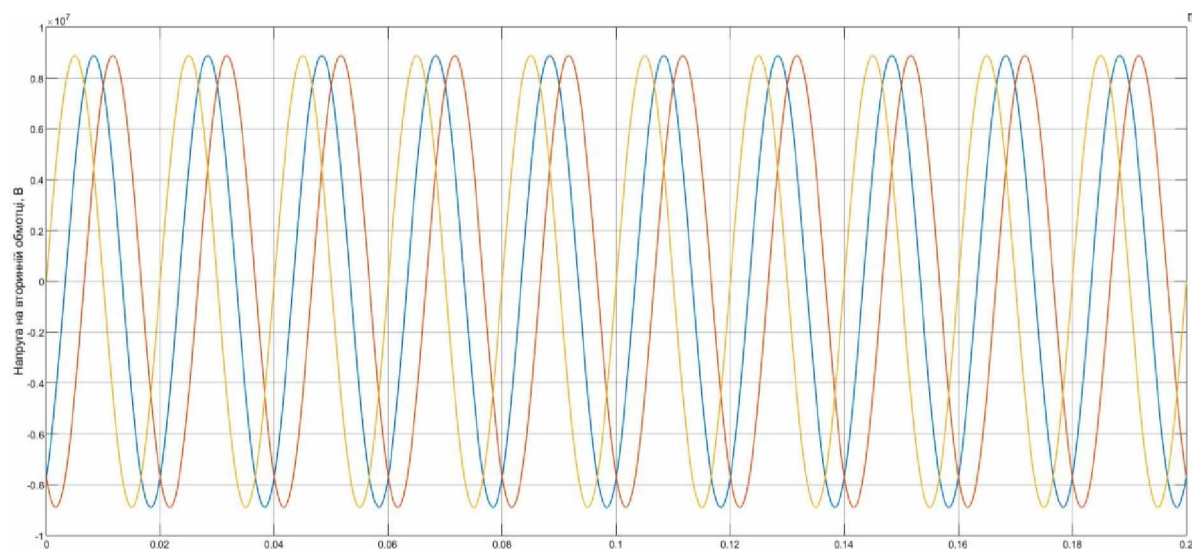
Модель дослідження роботи трансформатора



Графіки зміни напруги первинної обмотки на холостому ході



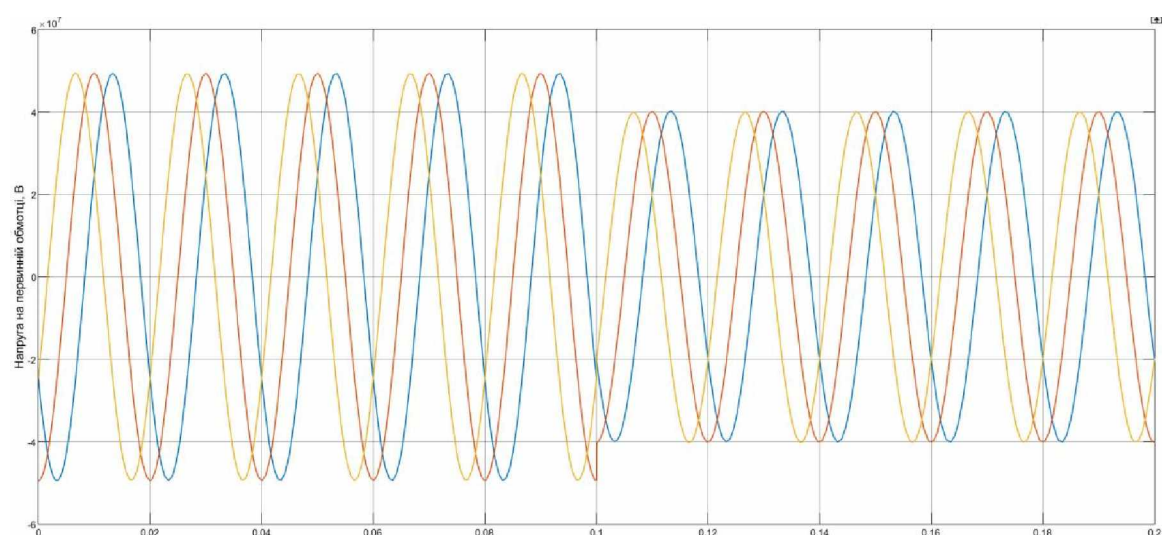
Графіки зміни струму у первинній обмотки на холостому ході



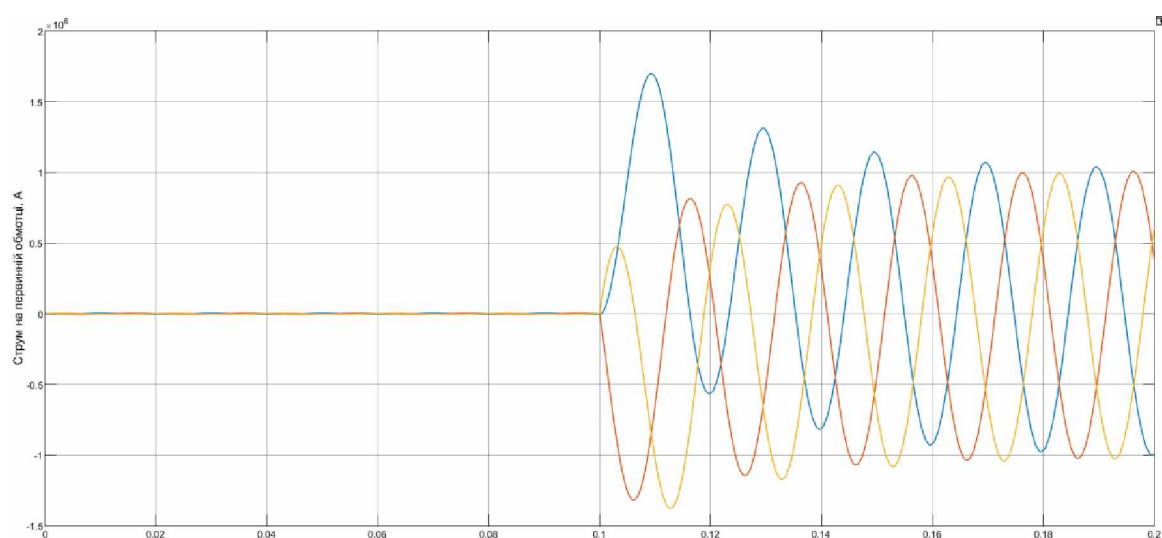
Графіки зміни напруги вторинної обмотки на холостому ході



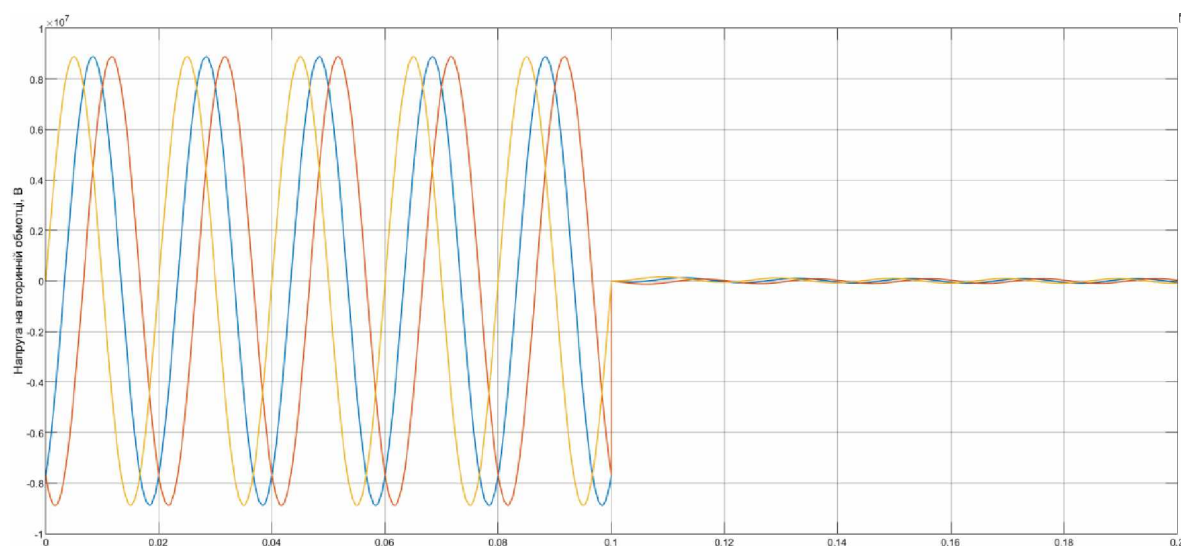
Зміна споживання активної і реактивної потужності на холостому ході



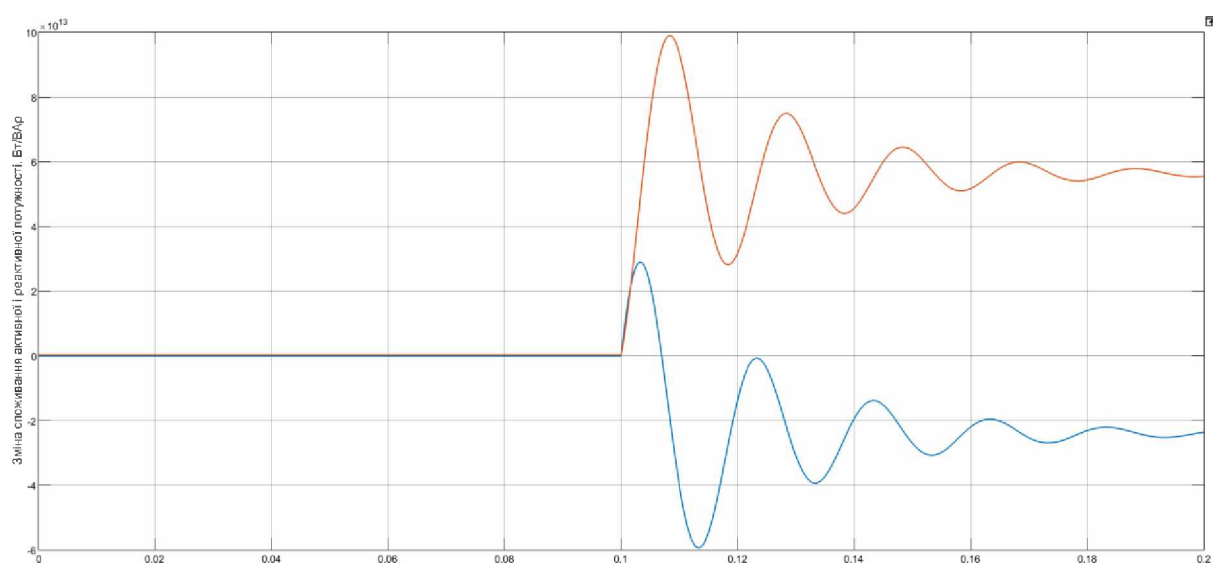
Графіки зміни напруги первинної обмотки при трифазному короткому замиканні на стороні вторинної обмотки



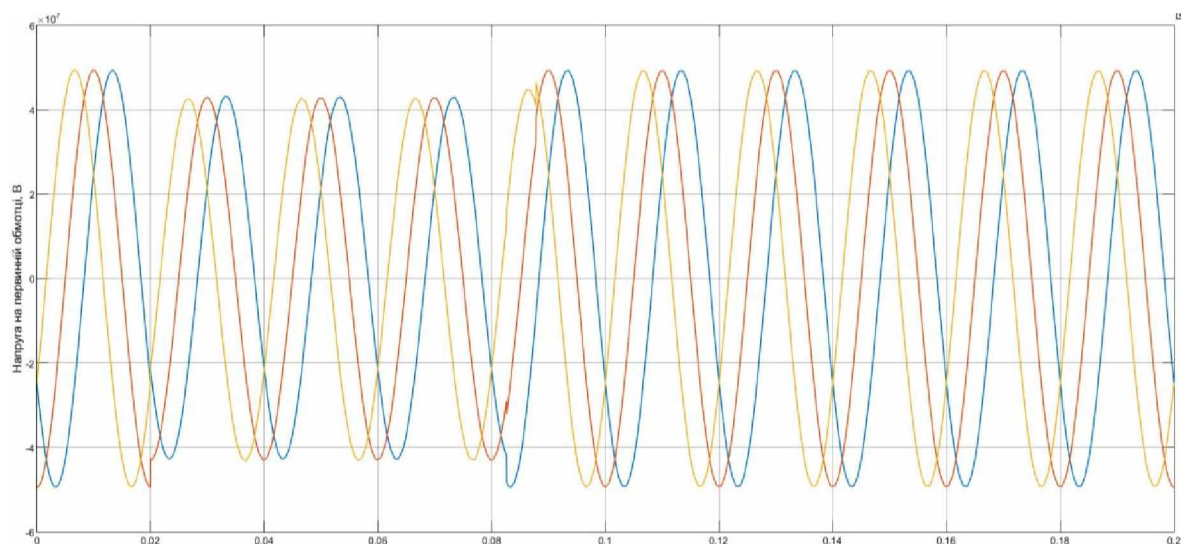
Графіки зміни струму у первинній обмотки при трифазному короткому замиканні на стороні вторинної обмотки



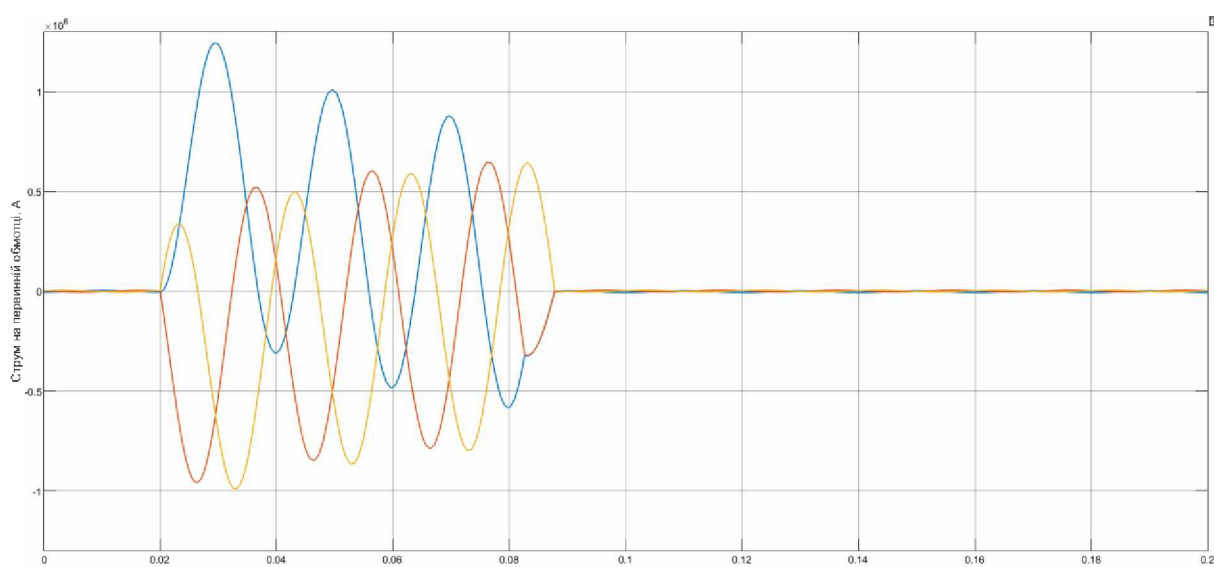
Графіки зміни напруги вторинної обмотки при трифазному короткому замиканні на стороні вторинної обмотки



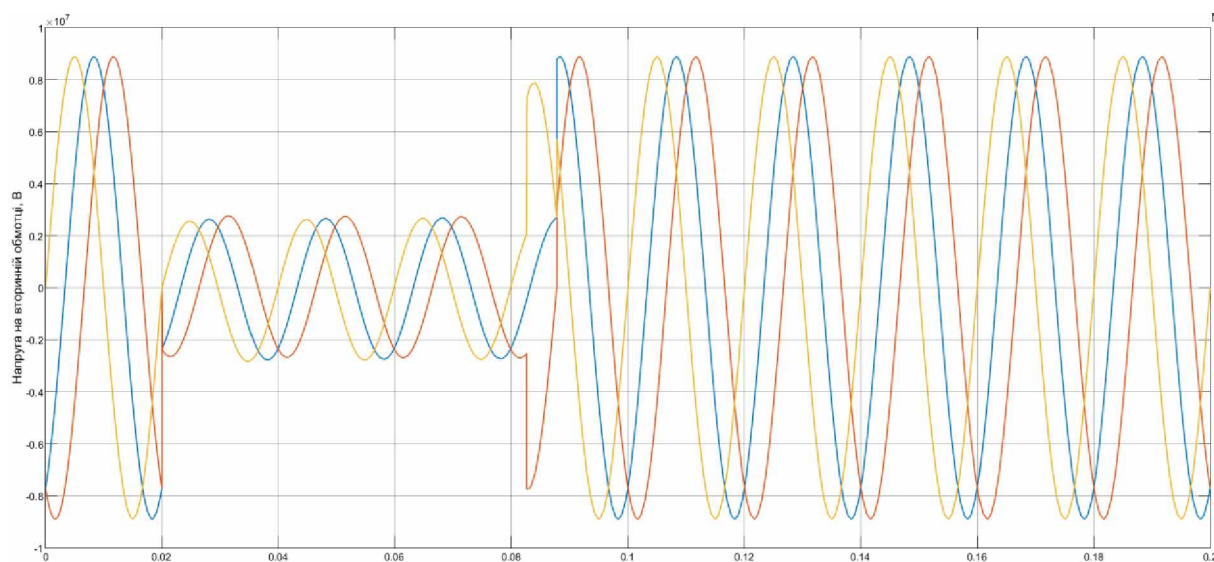
Графіки зміни споживання активної і реактивної потужності при трифазному короткому замиканні на стороні вторинної обмотки



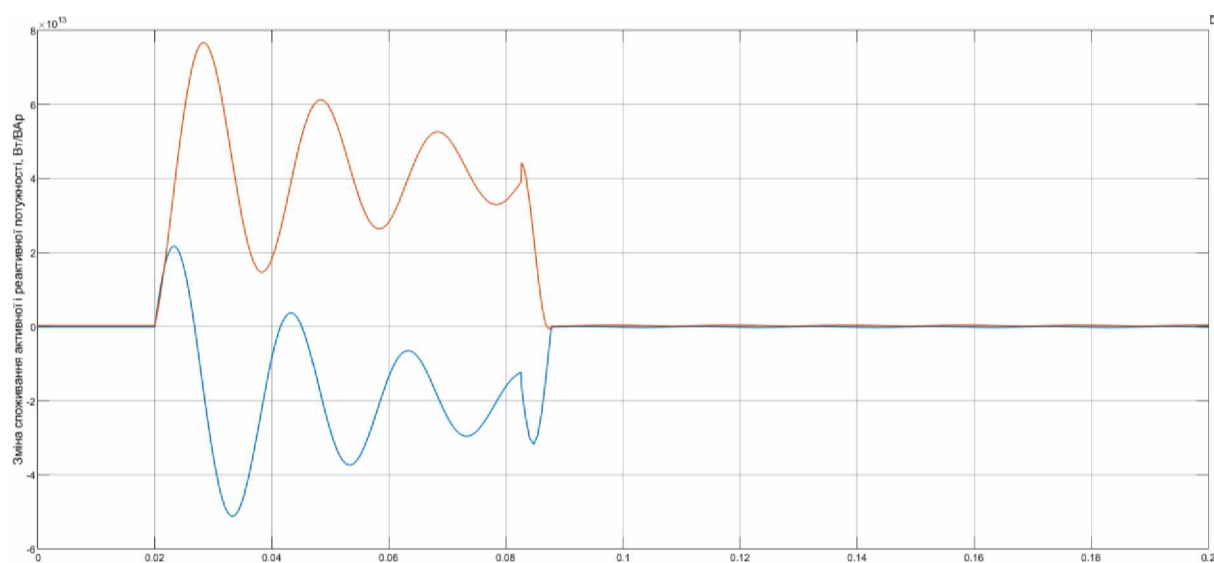
Графіки зміни напруги первинної обмотки в режимі приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача



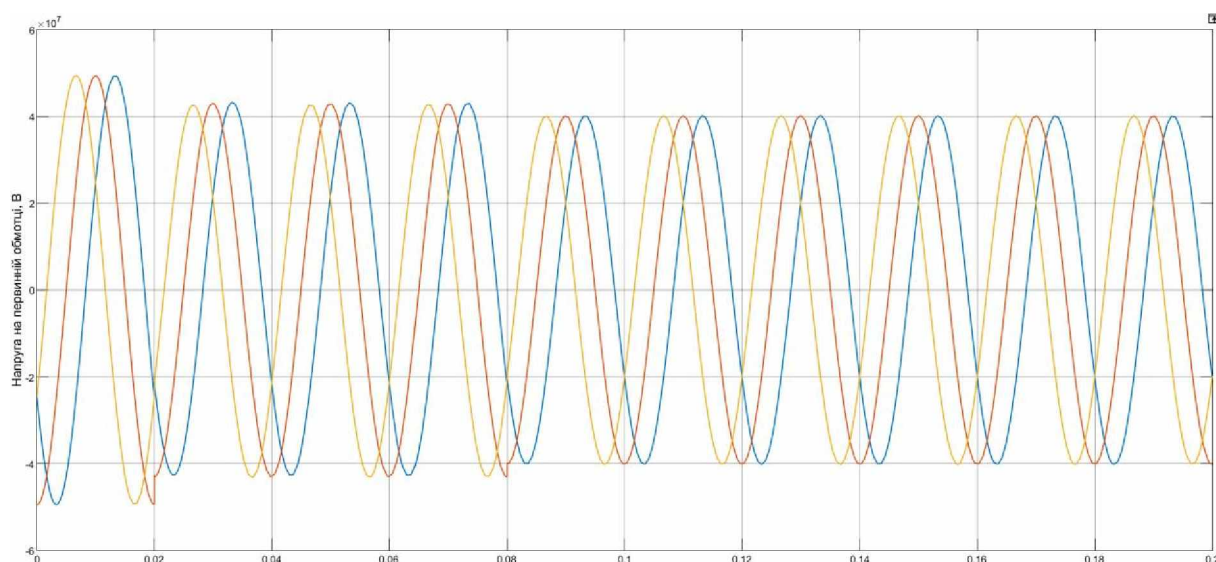
Графіки зміни струму у первинній обмотки в режимі приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача



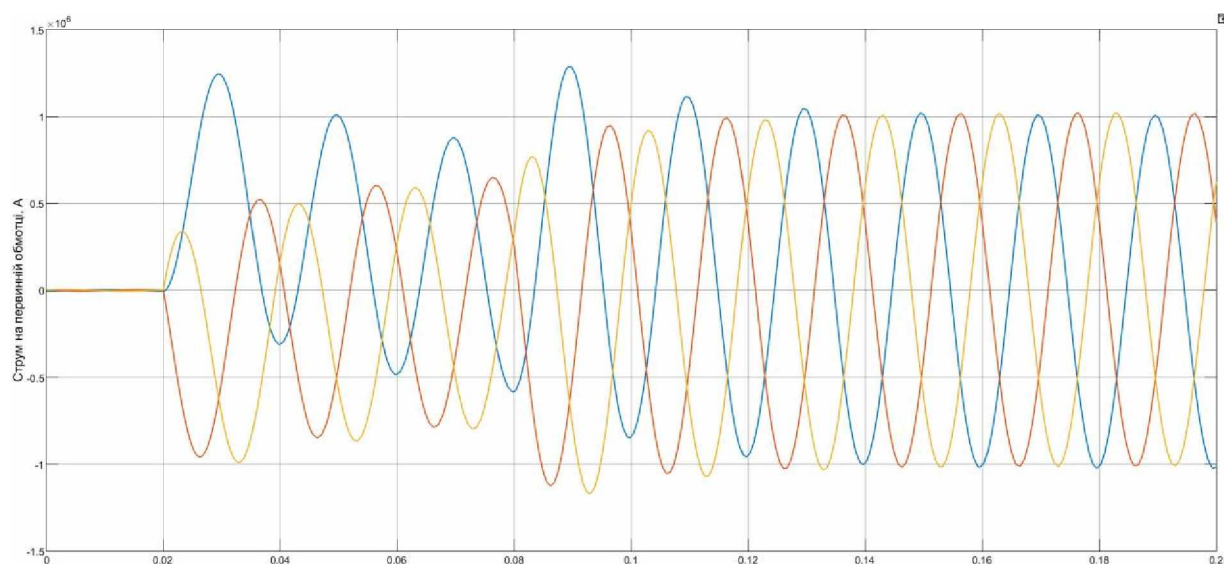
Графіки зміни напруги вторинної обмотки в режимі приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача



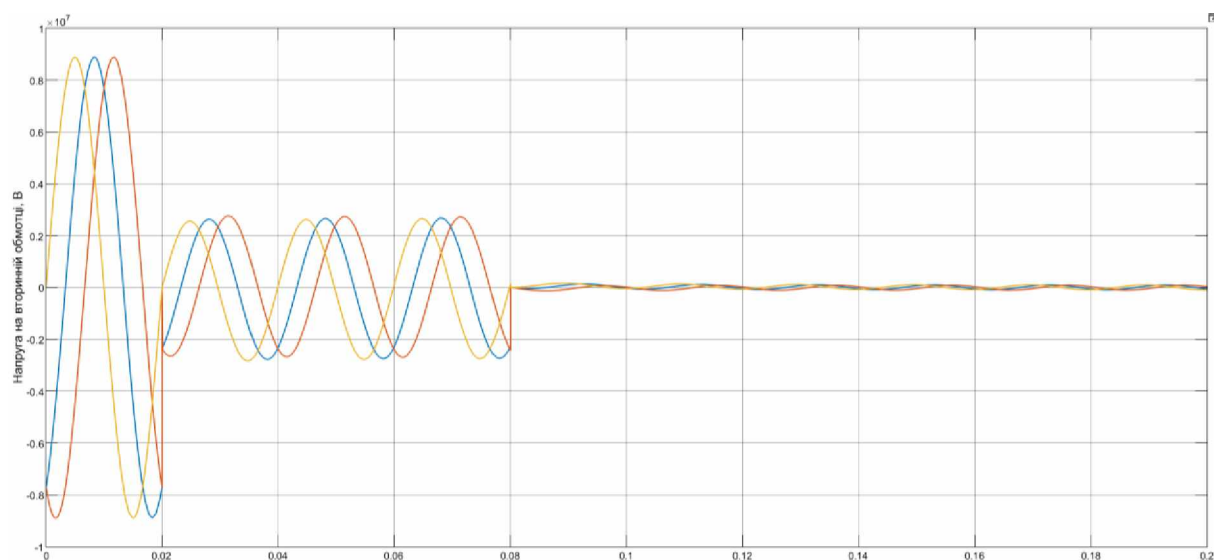
Графіки зміни споживання активної і реактивної потужності в режимі приєднання та від'єднання потужного нелінійного споживача



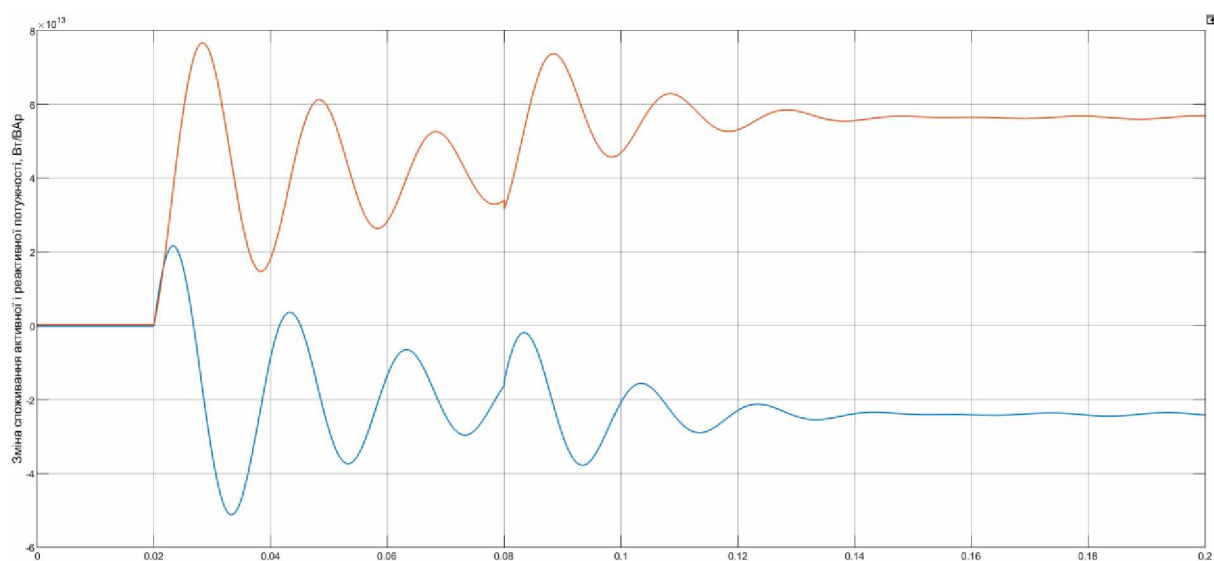
Графіки зміни напруги первинної обмотки в режимі приєднання потужного нелінійного споживача і при виникненні трифазного короткого замикання



Графіки зміни струму у первинній обмотки в режимі приєднання потужного нелінійного споживача і при виникненні трифазного короткого замикання



Графіки зміни напруги вторинної обмотки в режимі приєднання потужного нелінійного споживача і при виникненні трифазного короткого замикання



Графіки зміни споживання активної і реактивної потужності в режимі приєднання потужного нелінійного споживача і при виникненні трифазного короткого замикання

ДОДАТОК В

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____