

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИ-
СТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій

д.т.н., проф. /КАПЛУН В.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

доц., к.т.н. /ОКУШКО О.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

„_____” _____ 2025 р.
число місяць рік

„_____” _____ 2025 р.
число місяць рік

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТА АПАРАТНОГО ЗА-
БЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДІАГНОСТУВАННЯ
СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ»**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

к.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Усенко С.М.
(ПІБ)

Керівник магістерської роботи

к.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Наливайко В.А.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Копійка О. О.
(ПІБ)

Київ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій**

Окушко О.В.

_____ (підпис) (ПІБ)

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Копійки Олександра Олексійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської роботи: **«Розроблення технологій та апаратного забезпечення для проведення діагностування силових трансформаторів»**

Керівник магістерської роботи: **Наливайко Віталій Адамович, к.т.н., доцент.**

Затверджена наказом ректора НУБіП України від _____ р. № _____

Термін подання завершеної роботи на кафедру 1.11.2025.

Вихідні дані до магістерської роботи:

Завдання кафедри на дипломне проектування. Матеріали обстеження об'єкту дослідження.

Нормативні документи по проектуванню енергетичних об'єктів. Наукова література з тематики магістерських робіт

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Огляд літератури наукового-технічної літератури.
2. Метод акустичної локалізації точкових зарядів.
3. Вимірювання опору в обмотках постійного струму .
4. Тепловізійний контроль.
5. Перевірка коефіцієнту стану трансформатора.
6. Моніторинг стану трансформатора.
7. Проведення ремонтних робіт силових трансформаторів.
8. Техніко-економічні розрахунки.

Дата видачі завдання 26.02.2025 р.

Керівник магістерської роботи

_____ (підпис)

Наливайко В.А.

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

Копійка О.О.

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Актуальність роботи: В сучасних умовах ринкової економіки серед різноманітності проблем, зв'язаних із забезпеченням нормального та ефективного розвитку підприємств та організацій, головною і вирішальною є проблема ефективного використання енергетичних ресурсів.

Силові трансформатори - це один із найважливіших елементів електричних мереж. Якщо з ладу виходить трансформатор, то це є загрозою для функціонування підстанції і це безпосередньо впливає на надійність всієї енергосистеми. Отже, важливим завданням для підтримки працездатності та підвищення довговічності силових трансформаторів є якість технічного обслуговування в процесі експлуатації.

Мета роботи: Підвищення експлуатаційної надійності силових трансформаторів.

Завдання роботи:

- Провести аналіз поточного стану сучасних методів неруйнівного контролю силових трансформаторів;
- Розробити способи та апаратне забезпечення для контролю технічного стану трансформатора під час нормальної роботи;
- Адаптувати систему неруйнівного контролю стану трансформатора для потреб електротехнічних служб;
- Обґрунтувати методи та апаратне забезпечення для виявлення виткових замикань;
- Розрахувати електричні мережі та потужність джерела живлення для сервісного центру.

Предметом дослідження є ремонтні роботи та післяремонтні випробування силових трансформаторів.

Об'єктом дослідження є силовий масляний та сухий трансформатори.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети в процесі дослідження, крім абстрактно-логічного та розрахункового, використовувалися наступні методи: при розробці теоретичних положень – методи математичного моделювання; при розробці системи моніторингу – розрахунково-конструкторський та ін.

Ключові слова: Силовий трансформатор, масляний та сухий трансформатор, моніторинг стану трансформатора, діагностичне випробування силових трансформаторів, проведення ремонтних робіт, огляд активної частини силового трансформатора.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТО- РІВ	7
1.1. Основи роботи та експлуатації силових трансформаторів.....	7
1.2. Типові дефекти та методи діагностування.....	17
1.3. Технології поточного ремонту й післяремонтних випробувань.....	20
1.4. Сучасні засоби автоматизації контролю технічного стану.....	23
1.5. Завдання досліджень	26
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ	28
2.1. Обґрунтування вибору напряму досліджень.....	28
2.2. Методика проведення випробувань і вимірювань.....	29
2.3. Вимоги до апаратного та програмного забезпечення.....	32
2.4. Загальна структура запропонованої системи.....	34
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	38
3.1. Модель електромагнітних процесів у силовому трансформаторі.....	38
3.2. Вибір параметрів контролю та оцінки технічного стану.....	41
3.3. Теоретичне обґрунтування розробленого апаратного комплексу.....	43
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	46
4.1. Модель апаратно-програмного комплексу для випробувань.....	46
4.2. Проведення експериментального моделювання.....	49
4.3. Аналіз результатів та порівняння з нормативними даними.....	55
4.4. Розрахунок економічного ефекту від покращення параметрів.....	55
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	59
5.1 Нормативно-правова база щодо охорони праці під час ремонту та випробу- вань силових трансформаторів.....	59

5.2. Виробничі небезпечні та шкідливі фактори.....	60
ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	65

Перелік умовних позначень

СТ-Силовий трансформатор

ВН-обмотка вищої напруги

НН-обмотка нижчої напруги

ЧР-частковий розряд

РПН-регулювання напруги під навантаженням

ТК-тепловізійний контроль

ЦДП- центральний диспетчерський пункт

МНІ-метод низьковольтного імпульсу

ПТО-пункт технічного обслуговування

ВСТУП

З кожним роком розвиток промисловості та сільського виробництва стає більш енергоємним, тому важливим є автоматизація, електрифікація нових та ремонт і оновлення електромереж на старих підприємствах. Силові трансформатори - це один із найважливіших елементів електричних мереж. Якщо з ладу виходить трансформатор, то це є загрозою для функціонування підстанції і це безпосередньо впливає на надійність всієї енергосистеми. Отже, важливим завданням для підтримки працездатності та підвищення довговічності силових трансформаторів є якість технічного обслуговування в процесі експлуатації.

У наш час планово-попереджувальні ремонти іноді є малоефективними і тому перехід до нової стратегії вимагає розробки нових технологій діагностування із застосуванням комп'ютерних технологій обробки та аналізу даних.

Метою роботи є удосконалення існуючих технологій та розробка нових для проведення поточних ремонтів та післяремонтних випробувань силових трансформаторів, що дозволить об'єктивно оцінити технічний стан усіх систем трансформатора, адже алгоритм роботи деяких технологій не завжди дає змогу достовірно оцінити технічний стан трансформаторів в умовах експлуатації технічних мереж, оскільки враховується тільки граничний контроль за вимірними діагностичними параметрами, крім того одним із головних завдань є мінімізація витрат, що пов'язані з виходом з ладу трансформатора за рахунок своєчасного виявлення виникаючих дефектів у процесі експлуатації.

Предметом дослідження є ремонтні роботи та післяремонтні випробування силових трансформаторів.

Об'єктом дослідження є силовий масляний та сухий трансформатор

Структура магістерської роботи :

У першому розділі проведено огляд науково-технічної літератури. Розглянуту структуру та основні види силових трансформаторів.

У **другому розділі** розглянуто діагностування та випробування силових трансформаторів. Досліджено наступні питання:

- Метод акустичної локалізації точкових зарядів.
- Вимірювання опору в обмотках постійного струму .
- Тепловізійний контроль силових трансформаторів
- Перевірка коефіцієнту стану трансформатора
- Характеристики вібрацій
- Перевірка групи з'єднань обмоток трифазних трансформаторів

В **третьому розділі** проведений огляд на моніторинг та проведення ремонтних та післяремонтних випробувань.

В **четвертому розділі** розроблено питання електропостачання та економії енергетичних ресурсів і енергоносіїв.

РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

1.1. Основи роботи та експлуатації силових трансформаторів

Силовий трансформатор (рис. 1.1) – це статичний електро-магнітний пристрій, який має дві або більше обмотки та призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або декількох систем змінних напруги та струму в одну або декілька інших систем змінних напруги та струму, які мають інші значення при тій самій частоті. За допомогою трансформаторів також можна змінювати частоту, кількість фаз, форму вихідної напруги. [1-8]

Електрична енергія виробляється на електричних станціях при напругах від 6 до 30 кВ, а передача електроенергії на довгі відстані здійснюється при значно більших напругах – 110, 220, 330, 400, 500, 750, 1150 кВ. Тому на кожній електростанції встановлюють трансформатори, що збільшують напругу.

Розподілення електричної енергії між промисловими підприємствами, містами, сільськими районами, а також всередині промислових підприємств здійснюється по повітряних та кабельних лініях. Отже, в усіх вузлах розподільних мереж повинні встановлюватися трансформатори, що знижують напругу. Такі трансформатори також необхідно встановлювати безпосередньо у споживачів електроенергії, тому що більшість споживачів змінного струму працюють при напругах 220, 380, 660 В. [1-8]

Головними конструктивними елементами силового трансформатора є: магнітопровід, обмотки, система регулювання напруги, вводи, бак (рис. 1.2).

Магнітна система трансформатора (магнітопровід) є його конструктивною основою та служить для локалізації в ній основного (робочого) магнітного поля. [1-8]

Магнітопроводи трансформаторів виготовляються із електротехнічної сталі з підвищеним (до 5%) вмістом кремнію. Це приводить до збільшення магнітної проникності сталі її питомого електричного опору, зниження втрат на гістерезис, від вихрових струмів. Крім того, кремній послаблює старіння сталі, зменшує її магнітострикцію і, отже, шум трансформаторів. Однак, наявність кремнію в сталі приводить до підвищення її крихкості та ускладнює її механічну обробку.



Рис. 1.1. Силовий трансформатор

Магнітні властивості електротехнічної сталі залежать від напрямку, у якому здійснюється намагнічування листів. Це пов'язано з тим, що кристалічні

решітки сталі являють собою об'ємно центрований куб з трьома типами кристалографічних напрямків (рис. 1.4). Якщо у кристалі напрямок вздовж ребра куба збігається з напрямком прокатки сталі то це напрямок легкого намагнічування I, якщо з напрямком вздовж діагоналі грані – то це напрямок середнього намагнічування II, а якщо з напрямком вздовж просторової діагоналі – це напрямок важкого намагнічування III. [1-8]

Таким чином, для одержання того самого значення індукції за напрямках легкого, середнього і важкого намагнічування необхідно прикласти відповідно слабке, середнє і сильне магнітне поле.

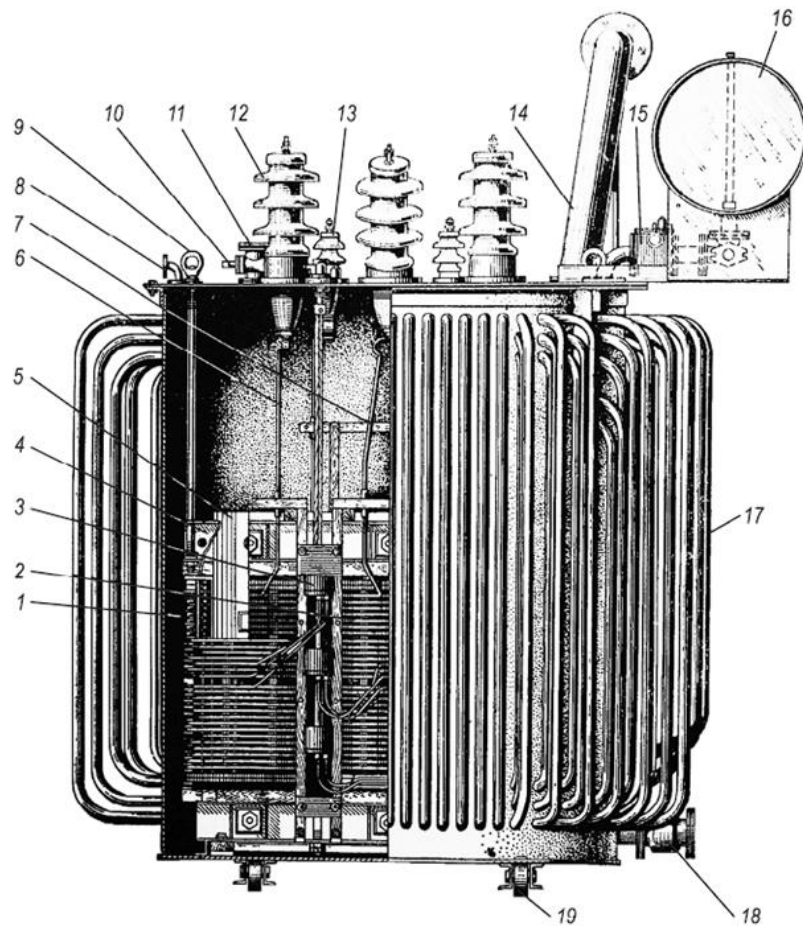


Рис. 1.2. Силовий трансформатор із трубчатим баком

1-обмотка ВН; 2 – обмотка НН; 3 – перемикач відгалуджень обмотки ВН; 4 – балка, для спесовування ярма; 5 – шихтований магнітопровід; 6 – виводи ВН; 7

– виводи НН; 8 – патрубок для приєднання вакуумного насоса; 9 – кільце для підйому виємної частини; 10 – привод ПБЗ; 11 – кран для заливання оливи; 12 – ізолятор ВН; 13 – ізолятор НН; 14 – вихлопна труба; 15 – газове реле; 16 – розширювач; 17 – бак; 18 – кран для зливу оливи; 19 – транспортний ролик.

Раніше для виготовлення магнітних систем трансформаторів використовувалася гарячекатана сталь товщиною 0,5 і 0,35 мм з робочою індукцією в магнітопроводі 1,4-1,45 Тл. Гарячекатана сталь має полікристалічну структуру, у якій кристали розташовані хаотично (рис. 1.3) це приводить до ізотропності її магнітних властивостей у всіх напрямках.

У даний час для виготовлення магнітопроводів застосовується холоднокатана електротехнічна анізотропна сталь товщиною 0,23, 0,27, 0,30, 0,35 мм [8], питомі втрати якої в 2-2,5 рази нижчі, ніж у гарячекатаної (рис. 1.4, а, б). Холоднокатана сталь дозволяє збільшити індукцію в магнітопроводі до 1,6-1,65 Тл при одночасному зменшенні маси сталі магнітопроводу та маси металу обмоток. У сучасних трансформаторах втрати неробочого ходу складають 0,1-0,25% від номінальної потужності. [1-8]

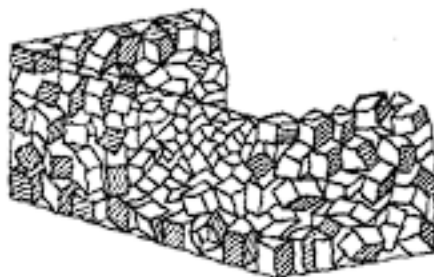


Рис. 1.3. Схематичне розташування кристалів гарячекатаної електротехнічної сталі

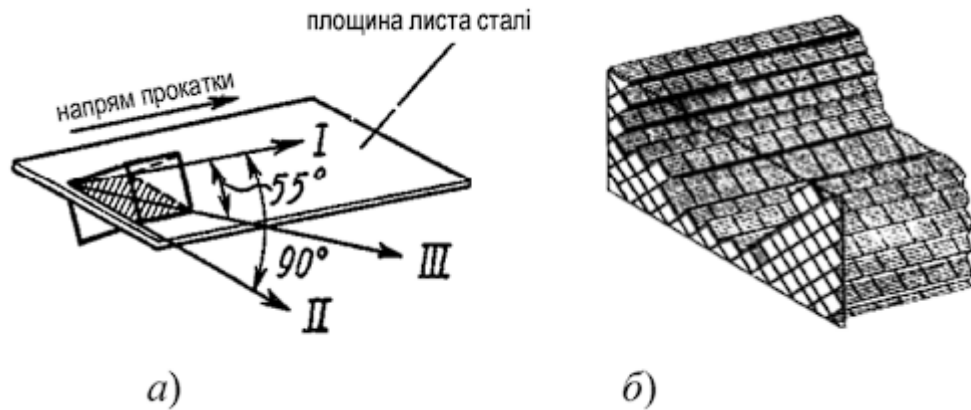


Рис. 1.4. Холоднокатана електротехнічна сталь з ребровою структурою
 а) напрямок кристалографічних осей; б) схематичне розташування кристалів

Згідно з [1-8] холоднокатана анізотропна електротехнічна сталь випускається у виді текстурованих листів і штаб звичайної якості (марки Т110-23S – Т145-35S), з високою магнітною індукцією (марки Т90-27Р – Т111-30Р) та з оптимізованою доменною структурою (марки Т95-23D – Т110-30D).

Для виготовлення магнітопроводів використовуються сталі зі спеціальними електроізоляційними покриттям з товщиною на сторону 0,005 мм і коефіцієнтом заповнення 0,945-0,96.

У магнітопроводі розрізняють стержні та ярма. Стержень – це та частина магнітопроводу, на якій розташовані обмотки. Ярмо – це частина магнітопроводу, що з'єднує стержні.

Найбільшого розповсюдження отримали такі типи магнітопроводів:

- стержневі;
- бронестержневі;
- броньові;
- просторові;
- тороїдальні.

У стержньовому магнітопроводі (рис. 1.5, а) ярма з'єднують кінці різних стержнів і кожне ярмо розташовується тільки з боку торців стержнів і обмоток трансформатора. При цьому по ярму проходить магнітний потік, що дорівнює потокові стержня. Даний тип магнітопроводу набув переважного застосування.

У силових трансформаторах потужністю 100 000 кВ·А і вище, застосовують бронестержневий магнітопровід (рис. 1.5, б). Для нього характерним є те, що тільки два стержні з трьох мають бічні ярма і потік ярма менший потоку стержня в $\sqrt{3}$ раз. Тому в бронестержневому магнітопроводі в порівнянні зі стержневим висота торцевих ярм менша у $\sqrt{3}$ раз, внаслідок чого габарити трансформатора в цілому істотно зменшується. [1-8]

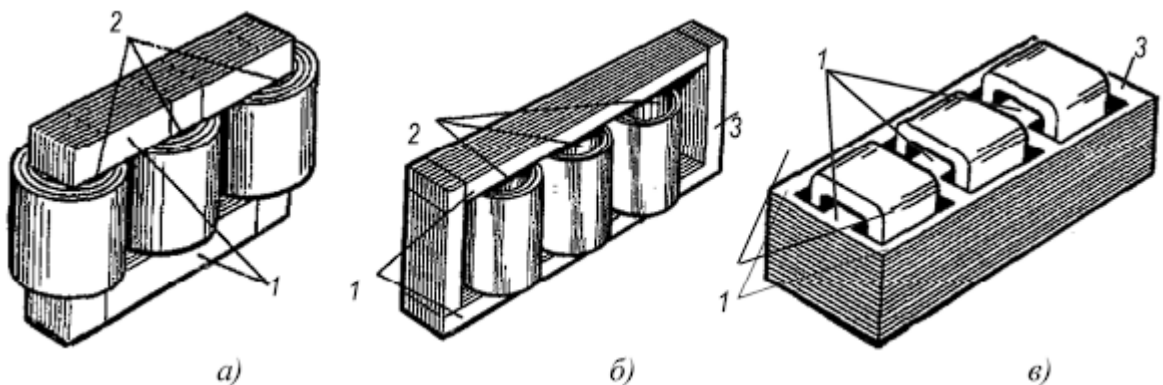


Рис. 1.5. Магнітопроводи трифазного трансформатора

а) стержневий; б) бронестержневий; в) броньований

1 – торцеве ярмо; 2 – стержень; 3 – бічне ярмо

Обмотки є найважливішим елементом трансформатора. Термін служби трансформатора завжди визначається строком служби його обмоток.

За розташуванням на стержні обмотки підрозділяють на концентричні (рис. 1.6, а) та почергові (рис. 1.6, б).

Основним елементом кожної обмотки є виток, що складається з одного або кількох паралельних провідників. Сукупність витків утворює котушку. Обмотка

може складатися з однієї або кількох котушок. Витки, намотані впритул на циліндричній поверхні, утворюють шар. [1-8]

За конструктивно-технологічними ознаками обмотки підрозділяють на наступні основні типи.

1. Циліндричні одно- і багат шарові обмотки.

а) Одно- і двошарові циліндричні обмотки з прямокутного дроту (рис. 1.7 а, б) застосовують як обмотки НН при номінальних струмах до 800 А. Витки кожного шару намотують по гвинтовій лінії впритул один до одного; виток може мати до 4-6 паралельних дротин, що вкладають плазом або на ребро.

Циліндричні обмотки з прямокутного дроту прості у виробництві, однак недостатньо стійкі до впливу осьових сил короткого замикання, тому що радіальний розмір шару невеликий.

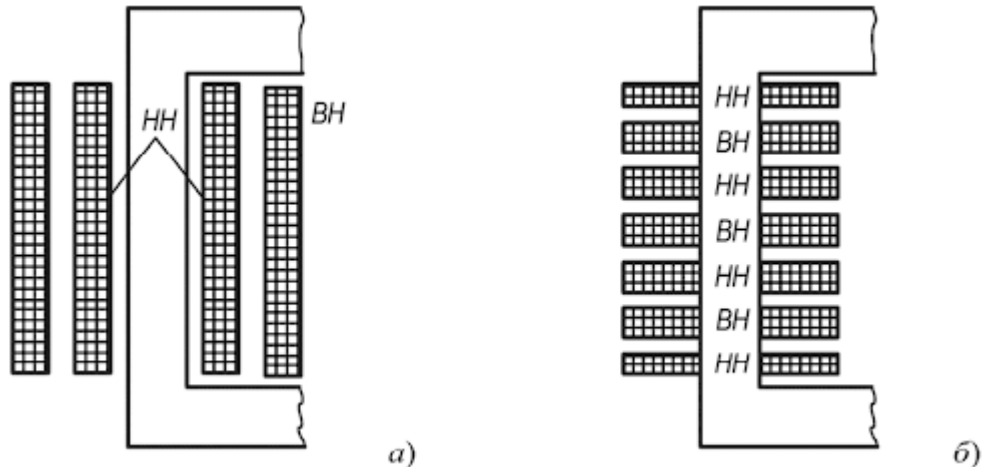


Рис. 1.6. Конструкція обмоток

а) концентричні; б) почергові

б) Багат шарові циліндричні обмотки виконують із дротів круглого перерізу і застосовують в основному як обмотки ВН (до 35 кВ). Перший шар обмотки намотують на паперово-бакелітовий циліндр, між шарами прокладають ізоляцію

з кабельного паперу (рис. 1.7, б). Для збільшення поверхні охолодження обмотку виконують із двох котушок, розділених вертикальним каналом. Регулювальні відгалуження часто виконують шляхом виводу петлі дроту без його обриву (рис. 1.7, б).

Обмотки цього типу отримали широке розповсюдження для напруги 110 кВ і вище. При великих струмах намотують обмотку з транспонованого дроту. Вертикальні шари обмотки відділені один від одного ізоляційними циліндрами.

в) Котушечні багат шарові циліндричні обмотки розділені по висоті на окремі багат шарові котушки, намотані з круглого дроту. Між котушками встановлюють шайби або горизонтальні прокладки, що утворюють охолоджуючі канали (рис. 1.7, в). Котушки намотують на паперовобакелітовий циліндр з рейками з електрокартону, що утворюють вертикальні охолоджуючі канали.

г) Шинні та листові обмотки є різновидом циліндричних шарових обмоток (рис. 1.7, г) Вони широко використовуються як обмотки НН трансформаторів, призначених для живлення електричних печей. Обмотки виконують з числом витків 1 або 2. [1-8]

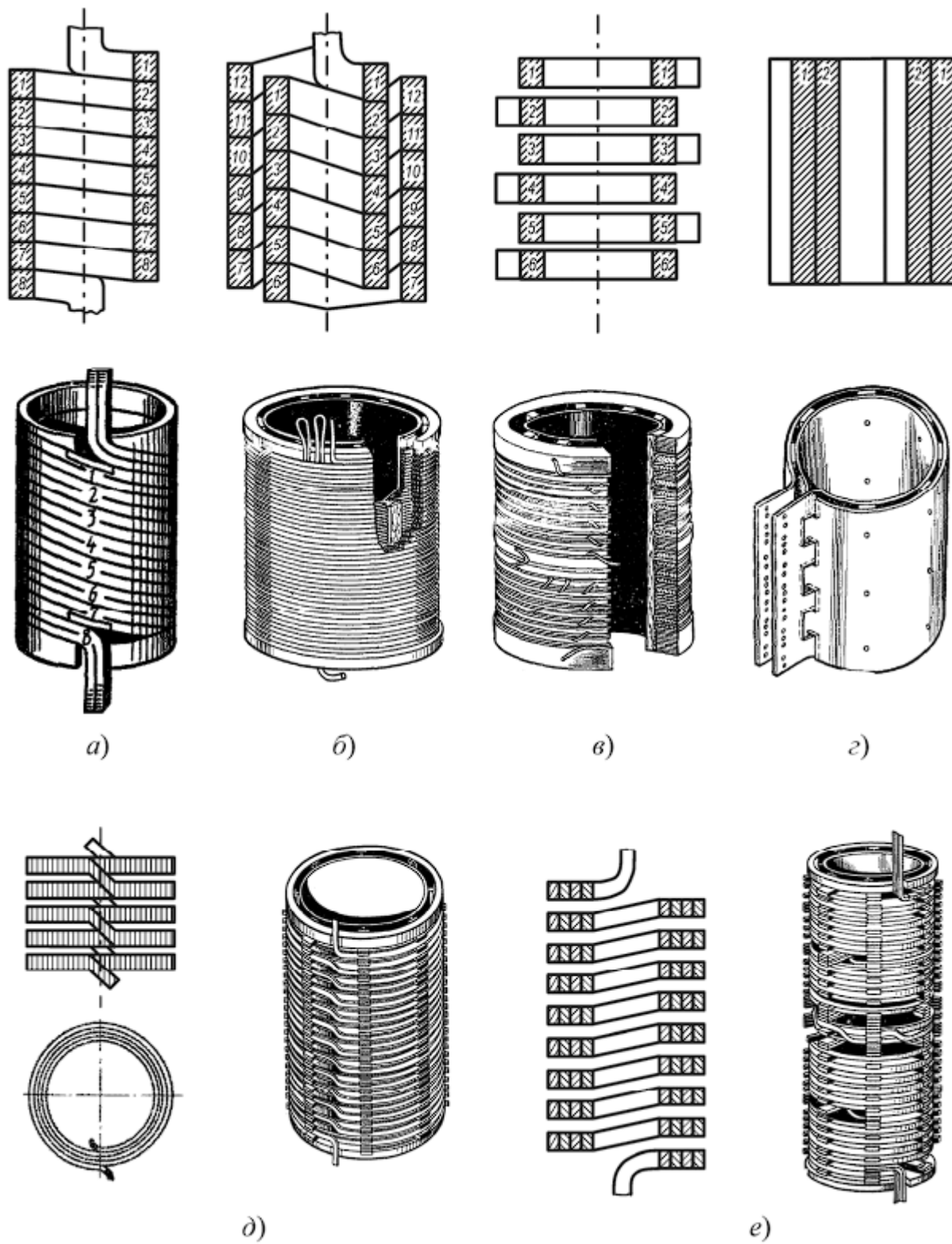


Рис. 1.7. Конструкція обмоток

а) загальний вид одношарової циліндричної обмотки; б) загальний вид двошарової циліндричної обмотки; в) загальний вид котушечної обмотки; г) двовиткова шинна обмотка; д) вид безперервної обмотки; е) одноходова гвинтова обмотка

2. Неперервні котушечні обмотки складаються з послідовно з'єднаних дискових катушок, що намотані по спіралі безперервно, тобто без обриву дроту між окремими катушками (рис. 1.7, д).

Неперервні котушечні обмотки використовуються як обмотки ВН і НН через їх велику механічну міцність і надійність. Між катушками виконують канали для охолодження. При виконанні обмотки з двох (і більше) паралельних провідників дроти при переході з катушки в катушку змінюють місцями, виконуючи транспозицію. У тих випадках, коли важко виконати обмотку неперервною, застосовується дискова обмотка, що збирається з комплекту окремо намотаних подвійних катушок. [1-8]

3. Гвинтові одно- і багатоходові обмотки виконують з кількох паралельних прямокутних дротів (рис. 1.7, е). Витки обмотки вкладають по гвинтовій лінії, що має один або кілька ходів. Кожен хід може мати від 4 до 20 паралельних дротів, намотаних плазом. Між витками і паралельними вітками (ходами) виконують оливні канали. [1-8]

Так як паралельні дроти гвинтової обмотки, розташовані концентрично й знаходяться на різній відстані від осі обмотки, то вони мають різну довжину. Це приводить до розбіжності їх активних та індуктивних опорів. Для рівномірного розподілу струму між паралельними дротами і зменшення додаткових втрат гвинтові обмотки виконують з транспозицією дротів, що утворюють один виток. Гвинтові обмотки застосовують як обмотки НН для струмів більше 300 А, вони можуть мати від 4 і більше паралельних дротів. Обмотки мають значну опорну поверхню і достатню електродинамічну стійкість.

4. Обмотки з фольги (стрічки). Для виготовлення обмоток замість мідного дроту також використовується алюмінієва фольга. Такі обмотки мають певні переваги в порівнянні з обмотками із дроту: кращі масогабаритні показники та охолодження обмотки завдяки більш рівномірному розподілу температури по всьому перерізу котушки; зменшені осьові зусилля при короткому замиканні (КЗ). За рахунок вирівнювання міжвиткових ємностей вздовж обмотки збільшується її стійкість до імпульсних перенапруг.

Як провідникові матеріали в трансформаторах застосовують мідь і алюміній. Для виготовлення дротів обмоток застосовують м'яку мідь марки ПММ, а для струмопровідних стержнів, шин – тверду мідь марки ПМТ. При виготовленні обмоток застосовують алюмінієвий дріт круглого та прямокутного перерізу марок: АПБ, АПБУ, АПБД та ін.

У оливних трансформаторах обмотки, виводи, регулятори напруги і дроти, що їх з'єднують розміщені в баку з оливою. Вводи (прохідні ізолятори) мають дві частини: нижню, що знаходиться в оливі бака, і верхню, повітряну, що знаходиться поза баком. Таким чином, розрізняють внутрішню (у оливі) і зовнішню (у повітрі) ізоляцію оливних трансформаторів. [1-8]

Внутрішню ізоляцію підрозділяють на головну і поздовжню. Головна – це ізоляція кожної з обмоток відносно заземлених частин і інших обмоток, електрично не зв'язаних з даною обмоткою. Поздовжня – це ізоляція між різними елементами даної обмотки (між витками, шарами, котушками, деталями ємнісного захисту).

До зовнішньої ізоляції трансформаторів відносяться зовнішня ізоляція вводів, повітряні проміжки між вводами і від введів до заземлених частин. Вводи являють собою фарфорові прохідні ізолятори, через внутрішню порожнину яких проходить струмоведучий стержень. Всередині бака ввід зв'язаний відводом з обмоткою, зовні – підключений до електричної мережі.

Зовнішня конфігурація і розміри вводів залежать від класу напруги, роду установки трансформатора і сили струму. Вводи (ізолятори) для зовнішньої установки мають зонтоподібні ребра для того, щоб під дощу частина поверхні фарфору залишалася сухою. Нижній поверхні зонтоподібного ребра надається така форма, при якій краплі води не можуть на ній утримуватися. При такій конструкції ізоляторів збільшується шлях поверхневого розряду і електрична міцність вводу.

Вводи на напругу 110 кВ і вище підрозділяють на оливо-бар'єрні та паперово-оливні. У оливо-бар'єрних основна ізоляція – трансформаторна олива, розділена на шари паперово-бакелітовими циліндрами із зрівняльними обкладками з алюмінієвої фольги. У паперово-оливних вводах основна ізоляція – кабельний папір, щільно намотаний на мідну трубу. Папір просочений трансформаторною оливою і розділений на шари зрівняльними обкладками з фольги. Вводи заповнюються дегазованою трансформаторною оливою, ізольованою від оливи бака і атмосферного повітря (герметичні вводи). [1-8]

Для ізоляції дротів обмоток і виводів, а також міжшарової ізоляції обмоток та ін. пристроїв застосовують електроізоляційні папери марок: Т-120, ТМ-120, ТМП-120, ТВ-120, ТВУ-80 товщиною 80 і 120 мкм. Іншим основним ізоляційним матеріалом є електроізоляційний картон призначений для роботи в оливі. Він має високу механічну міцність, малу усадку після сушіння, стійкість до впливу напруги в напрямку, перпендикулярному поверхні, і до впливу поверхневих розрядів. Картон випускають п'яти марок: АМ, А, Б, У, Г.

1.2. Типові дефекти та методи діагностування

Силові трансформатори класифікують за різними показниками, серед яких виокремлюють декілька груп:

- за умовами експлуатації: нормальні та спеціальні умови;

- за видом ізолюючого та охолоджувального середовища: сухі, масляні, заповнені негорючим рідким діелектриком, з литою ізоляцією;

- за призначенням і конструктивним виконанням: одно- та трифазні, з наявністю РПН чи ПБЗ та багато іншого.

Відповідно, знаючи основні елементи силових трансформаторів, є можливість визначити, які елементи є вразливими для виникнення аварійної ситуації під час їхньої експлуатації. [9-12]

Контроль технічного стану СТ є невід'ємною частиною їхньої експлуатації та впливає на надійність електроенергетичної системи. Вибір стратегії обслуговування залежить від потужності обладнання, умов експлуатації та економічної доцільності. Для малопотужних трансформаторів найчастіше використовується підхід, при якому технічне обслуговування проводиться лише у разі відмови обладнання. Це пояснюється їхньою меншою критичністю для роботи енергосистеми. Натомість для трансформаторів великої потужності застосовується стратегія планового технічного обслуговування, яка передбачає виконання регламентних перевірок та ремонтів відповідно до графіка. Цей підхід дозволяє запобігти раптовим відмовам, але може бути економічно невиправданим у разі надмірного технічного втручання. З іншого боку, виведення трансформатора з експлуатації за фактом відмови може призвести до значних матеріальних витрат і загрожує порушенням роботи електромережі [9-12].

Недотримання регламентів технічного обслуговування, неправильне підключення обладнання або використання неякісних матеріалів можуть призвести до аварій. Діагностика трансформатора здійснюється за допомогою серії перевірок, заходів і ви-пробувань, за допомогою яких отримується глобальне бачення стану трансформатора, як зовнішнього, так і внутрішнього, що дозволяє прийняти відповідні профілактичні та корегувальні дії, які гарантують нормальну експлуатацію обладнання під час роботи.

Серед основних причин виникнення аварійних ситуацій в роботі силових трансформаторів виділяють:

1) перевантаження – тривала робота трансформатора з навантаженням, що перевищує номінальне, призводить до перегріву обмоток та ізоляції. Постійне перевантаження спричиняє деградацію ізоляційних матеріалів, що з часом призводить до зниження електричної міцності та можливого короткого замикання, а відповідно і скорочення терміну експлуатації;

2) дефекти ізоляції – старіння ізоляційних матеріалів або їх пошкодження внаслідок перенапруг чи механічних пошкоджень – є однією з найпоширеніших причин виходу трансформаторів із ладу. Ізоляція може втратити свої властивості через вплив вологи, перегрівання або механічні пошкодження під час транспортування; [9-12]

3) внутрішні короткі замикання – виникають через пошкодження обмоток або виток струму між обмотками. Основними причинами є механічні пошкодження, які можуть виникнути через вплив електромагнітних сил під час коротких замикань у мережі.

4) Недостатнє охолодження – несправності в системі охолодження або недостатня кількість охолоджувальної рідини призводять до перегріву, навіть, якщо трансформатор не перевантажується.

5) Помилки експлуатації та обслуговування – неправильне керування, несвоєчасне технічне обслуговування або помилки персоналу

Випробування та вимірювання діагностичних параметрів здійснюють згідно Норм випробування електрообладнання [13] (відповідно до вимог п.п. 9.2-9.19 цих Норм) та документації виробників, де наведено види, обсяги й періодичність вимірювань та випробувань трансформаторів.

До таких вимірювань та випробувань належать:

- Вимірювання опору ізоляції;
- Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат;

- Випробування ізоляції підвищеною напругою;
- Вимірювання втрат неробочого ходу за зниженої напруги;
- Вимірювання опору обмоток постійному струму;
- Перевірка коефіцієнта трансформації;
- Перевірка групи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів і полярності виводів однофазних трансформаторів;
- Вимірювання опору короткого замикання трансформатора;
- Перевірка роботи пристроїв перемикання;
- Перевірка дії допоміжних елементів;
- Випробування бака на щільність;
- Перевірка систем охолодження;
- Вимірювання характеристик трансформаторної оливи;
- Оцінювання вологості твердої ізоляції;
- Випробування вводів;
- Випробування вбудованих трансформаторів струму;
- Випробування трансформаторів увімкненням на номінальну напругу [13].

Отже, діагностика силових трансформаторів є важливим етапом забезпечення їхньої надійної та безпечної роботи. Використання електричних, теплових, акустичних методів та газохроматографічного аналізу дозволяє своєчасно виявляти можливі дефекти та запобігати аварійним ситуаціям. Кожен із методів має свої переваги та обмеження, тому для отримання повної картини технічного стану трансформатора доцільно застосовувати комплексний підхід. Регулярна діагностика сприяє продовженню терміну служби обладнання та зменшенню витрат на ремонт і заміну.

1.3. Технології поточного ремонту й післяремонтних випробувань

В процесі експлуатації окремі частини трансформатора під впливом термічних, електродинамічних, механічних і інших дій поступово втрачають свої первинні властивості і можуть прийти в непридатність. В цілях своєчасного виявлення і усунення дефектів, що розвиваються, і попередження аварійних відключень для трансформаторів періодично проводяться поточні і капітальні ремонти. [14-16]

Поточний ремонт трансформатора робиться в наступному об'ємі:

- а) зовнішній огляд і усунення виявлених дефектів, що піддаються усуненню на місці;
- б) чищення ізоляторів і бака;
- в) спуск бруду з розширювача, доливка у разі потреби мастила, перевірка мастилопоказчика;
- г) перевірка спускного крану і ущільнень;
- д) огляд і чищення охолоджуючих пристроїв;
- е) перевірка газового захисту;
- ж) перевірка цілості мембрани вихлопної труби;
- з) проведення вимірів і випробувань.

Для трансформаторів з регулюванням напруги під навантаженням робляться позачергові ремонти регулюючого пристрою відповідно до вказівок заводської інструкції залежно від числа проведених перемикань.

При ремонті трансформаторів з примусовим мастиловодяним охолодженням слід звернути особливу увагу на відсутність підсосу повітря в систему циркуляції мастила і на перевірку герметичності охолоджувачів. Герметичність охолоджувачів перевіряється шляхом створення надлишкового тиску по черзі з боку мастильної, а потім водяної системи згідно з діючими інструкціями. Періодичність чищення і випробування охолоджувачів залежить від місцевих умов (забруднення води, стани охолоджувачів) і робиться не рідше за 1 раз в рік. [14-16]

При ремонті перевіряється також стан термосифонних фільтрів і повітряосушувачів. У мастилонаповнених вводах трансформаторів при ремонті виконують відбір проби мастила, доливка мастила, у разі потреби - і вимір тангенса кута діелектричних втрат (не рідше за 1 раз в 6 років). Зважаючи на те що мастило у вводах трансформаторів через декілька років роботи приходиться в непридатність, при ремонті іноді виникає необхідність зміни вводу. Досвід експлуатації також показує, що для мастилонаповнених вводів з бар'єрною ізоляцією через 10 - 12 років роботи на трансформаторах недостатня тільки зміна мастила, а потрібний капітальний ремонт з розбиранням, чищенням і при необхідності змінної ізоляції вводу. [14-16]

Трансформатор має досить великі запаси електричної міцності ізоляції і є дуже надійним апаратом в експлуатації. Трансформатори мають мастилобар'єрну ізоляцію. Як основна тверда ізоляція для трансформатора використовується пресшпан, що виготовляється до останнього часу вітчизняними заводами. Пресшпан дає з часом усадку, що є його істотним недоліком. Як правило, для трансформаторів застосовується жорстка система запресовки обмотки, яка не забезпечує автоматичне підпресовування обмотки у міру усадки пресшпану. Тому після декількох років роботи для трансформаторів передбачається проведення капітальних ремонтів, при яких основна увага має бути приділена підпресовуванню обмоток. За відсутності необхідних підйомних пристосувань капітальний ремонт допускається робити з оглядом сердечника в баку (при знятій кришці), якщо при цьому забезпечена можливість проведення підпресовування і розклиновки обмоток. Для відповідальних трансформаторів перший термін капітального ремонту після введення в експлуатацію встановлений в 6 років, для інших - за результатами випробувань в міру необхідності.

Капітальний ремонт трансформатора робиться в наступному об'ємі:

а) вскриття трансформатора, підйом сердечника (чи знімного бака) і огляд його;

б) ремонт магнітопроводу, обмоток (підпресовування), перемикачів і відводів;

в) ремонт кришки, розширювача, вихлопної труби (перевірка цілості мембрани), радіаторів, термосифонного фільтру, повітряосушувача, кранів, ізоляторів;

г) ремонт охолоджуючих пристроїв;

д) чищення і фарбування бака;

е) перевірка контрольно-вимірювальних приладів, сигнальних і захисних пристроїв;

ж) очищення або зміна мастила;

з) сушка активної частини (у разі потреби);

і) збирання трансформатора;

к) проведення вимірів і випробувань. [14-16]

Метою випробувань після ремонту є перевірка стану трансформатора і якості ремонту. При капітальному ремонті без заміни обмоток в обсяг випробувань входить:

- Хімічний аналіз і випробування масла з бака трансформатора та ввідів;
- Вимірювання стану опору обмоток постійному струму при всіх положеннях перемикача відгалужень;
- Вимірювання коефіцієнта трансформації на всіх відгалуженнях;
- Вимірювання опору ізоляції доступних стяжних болтів, ярмових балок і випробування ізоляції стяжних болтів підвищеною напругою;
- Вимірювання характеристик ізоляції;
- Випробування головної ізоляції підвищеною напругою

При ремонті трансформатора з розбиранням активної частини обсяг випробувань збільшується. Проводять випробування активної сталі магнітопроводу, визначають групи з'єднання обмоток, вимірюють струм і втрати холостого ходу, а також втрати в обмотках і напругу к.з. їх проводять відповідно до [13].

1.4. Сучасні засоби автоматизації контролю технічного стану

Сучасний розвиток енергетичних систем характеризується підвищенням вимог до надійності, ефективності та безпеки роботи обладнання. У зв'язку з цим значного поширення набули системи автоматизованого контролю технічного стану силових трансформаторів, які забезпечують безперервний моніторинг параметрів, раннє виявлення дефектів і прогнозування залишкового ресурсу.

Автоматизовані системи контролю базуються на використанні датчиків, мікропроцесорних пристроїв, телеметричних каналів зв'язку та програмних комплексів, що дозволяють у режимі реального часу збирати, обробляти та аналізувати інформацію про стан трансформатора.

Основними контрольованими параметрами є температура обмоток і масла, рівень масла, напруга, струм, часткові розряди, газовий склад у маслі, вологість та інші показники, які прямо або опосередковано характеризують технічний стан обладнання.

Одним із ключових напрямів розвитку сучасних систем є впровадження технологій онлайн-моніторингу. Такі системи дозволяють отримувати дані без зупинки трансформатора, здійснювати автоматичну обробку сигналів і передавати результати у центр моніторингу.

Прикладами таких рішень є:

- системи ABB Ability™ Transformer Monitoring [17],
- Siemens Sensformer [18],
- GE Digital Energy Transformer Intelligence [19].



Рис. 1.8. ABB RET620

Ці комплекси дають змогу контролювати стан обладнання на всіх етапах життєвого циклу від введення в експлуатацію до післяремонтного тестування. Вони мають вбудовані функції діагностики, аналізу тенденцій зміни параметрів і формування попереджень про наближення граничних режимів.

Окремий напрямок розвитку становлять програмно-апаратні засоби для діагностики і випробувань трансформаторів, які поєднують вимірювальні прилади та комп'ютерні системи обробки даних. Такі комплекси використовують спеціалізовані датчики для вимірювання опору обмоток, втрат холостого ходу, коефіцієнта трансформації, тангенса кута діелектричних втрат тощо. Зібрані дані автоматично обробляються, зберігаються в базі і можуть бути представлені у вигляді звітів або діаграм.

Поряд із промисловими системами, все більшого значення набувають віртуальні моделі та симуляційні середовища, які дають можливість моделювати режими роботи трансформатора без проведення реальних експериментів.

Серед найбільш поширених програмних інструментів для цього можна відзначити:

- MATLAB/Simulink для математичного моделювання електромагнітних процесів і побудови віртуальних випробувальних стендів;
- LabVIEW для створення інтерактивних інтерфейсів і керування вимірювальними приладами;
- ETAP та PowerFactory для аналізу роботи енергетичних систем і розрахунків навантажень.

Використання таких систем дозволяє не лише автоматизувати процеси контролю, але й створювати цифрові двійники трансформаторів - моделі, що відтворюють поведінку реального обладнання в різних режимах. Це відкриває можливість дослідження впливу ремонтних втручань на параметри трансформатора, прогнозування відмов і оцінки ефективності технічного обслуговування.

Підсумовуючи, можна зазначити, що сучасні засоби автоматизації контролю технічного стану силових трансформаторів розвиваються у напрямку цифровізації, інтеграції вимірювальних систем та використання інтелектуальних алгоритмів обробки даних. Проте, попри високий рівень технологічного розвитку, залишається потреба у створенні доступних віртуальних інструментів, які б дозволяли моделювати процеси поточного ремонту та післяремонтних випробувань. Саме на розв'язання цього завдання спрямована дана робота, у якій пропонується розроблення віртуального апаратно-програмного комплексу у середовищі MATLAB/Simulink.

1.5. Аналіз проблеми та постановка задачі дослідження

Питання надійної експлуатації, ремонту та діагностування силових трансформаторів залишається одним із найважливіших у сучасній енергетиці. Незважаючи на значну кількість досліджень і впроваджених технічних рішень [20-35], актуальними залишаються проблеми підвищення точності контролю технічного стану та скорочення часу проведення післяремонтних випробувань.

Існуючі методики оцінювання працездатності трансформаторів базуються переважно на традиційних електричних випробуваннях - вимірюванні опору обмоток, втрат холостого ходу, струмів короткого замикання, тангенса кута діелектричних втрат тощо. Однак такі методи потребують значної кількості вимірювальних приладів, фізичного доступу до об'єкта, високої кваліфікації персоналу, а результати часто залежать від умов проведення випробувань.

Водночас розвиток інформаційних технологій і засобів моделювання дає змогу переходити до віртуалізації процесів контролю, тобто моделювання фізичних процесів у трансформаторі без застосування реального обладнання.

Такі підходи забезпечують:

- можливість багаторазового відтворення випробувань при різних режимах;
- оцінку впливу дефектів і ремонтних втручань на роботу трансформатора;
- автоматизацію збору та обробки результатів;
- зменшення витрат часу і ресурсів на підготовку експериментів.

Однак більшість існуючих систем моніторингу орієнтовані на роботу трансформатора в реальних умовах, а не на імітацію випробувань після ремонту. Недостатньо розроблені також методики, які дозволяють автоматизувати аналіз

зміни параметрів трансформатора до та після ремонту у віртуальному середовищі.

Для розв'язання цієї проблеми у дипломній роботі ставиться задача дослідження, яка полягає у - розробленні технології та створенні віртуального апаратно-програмного комплексу в середовищі MATLAB/Simulink, що дозволяє імітувати режими роботи трансформатора, автоматизовано визначати його основні параметри та оцінювати зміни технічного стану після ремонту.

Реалізація поставленої задачі забезпечить можливість відтворення типових випробувань (режими холостого ходу, короткого замикання, роботи під навантаженням) у комп'ютерному середовищі, а також створить передумови для подальшої інтеграції розробленого комплексу у навчальні та виробничі системи моніторингу.

РОЗДІЛ 2. НАПРЯМИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обґрунтування вибору напрямку досліджень

Розвиток сучасної енергетики вимагає підвищення надійності, енергоефективності та безпечності експлуатації силових трансформаторів. Одним із найважливіших аспектів цього процесу є забезпечення контролю технічного стану обладнання на всіх етапах його життєвого циклу від введення в експлуатацію до післяремонтних перевірок.

Традиційні підходи до діагностики та випробувань трансформаторів базуються на використанні реальних стендів та вимірювальних приладів, що потребує значних матеріальних і часових ресурсів. Крім того, проведення таких випробувань може бути пов'язане з ризиком пошкодження обладнання або порушенням умов безпеки.

У зв'язку з цим одним із перспективних напрямів є використання комп'ютерного моделювання та створення віртуальних випробувальних комплексів, які дозволяють:

- моделювати режими роботи трансформатора без фізичного навантаження на обладнання;
- відтворювати експериментальні умови для різних типів трансформаторів;
- виконувати розрахунки електричних параметрів у динамічному режимі;
- зменшити обсяг реальних випробувань і підготувати персонал до їхнього проведення.

Вибір напрямку досліджень зумовлений також розвитком цифрових технологій автоматизації та програмного моделювання енергетичних систем.

Серед сучасних інструментів, що найповніше забезпечують можливості імітації електротехнічних процесів, особливе місце займає середовище MATLAB/Simulink, яке дає змогу:

- будувати математичні моделі електричних машин і трансформаторів;
- визначати струми, напруги, втрати, ККД у різних режимах роботи;
- автоматизувати збір і візуалізацію результатів;
- створювати гнучкі інтерфейси користувача для подальшого розширення системи.

Отже, обраний напрям досліджень, а саме розроблення віртуального апаратно-програмного комплексу для проведення поточних та післяремонтних випробувань силових трансформаторів є доцільним і актуальним. Його реалізація дозволяє об'єднати методи математичного моделювання, принципи автоматизованого контролю та технології цифрової обробки результатів. Таким чином, запропонований підхід створює умови для розробки універсальної системи аналізу стану трансформатора, придатної як для навчальних, так і для дослідницьких цілей.

2.2. Методика проведення випробувань і вимірювань

Метою методики є визначення основних експлуатаційних параметрів силового трансформатора під час проведення поточних і післяремонтних випробувань із використанням засобів комп'ютерного моделювання.

У даній роботі випробування реалізуються у віртуальному середовищі MATLAB/Simulink, що дозволяє відтворювати роботу трансформатора в різних режимах - холостого ходу, короткого замикання та навантаження, з можливістю вимірювання основних електричних величин: струму, напруги, потужності, втрат і ККД.

1. Режим холостого ходу.

Випробування холостого ходу застосовується для визначення втрат у сталі, струму намагнічування та коефіцієнта трансформації.

У моделі MATLAB/Simulink вторинна обмотка трансформатора розімкнена (не під'єднана до навантаження).

На первинну обмотку подається номінальна напруга, після чого фіксуються такі параметри:

- струм холостого ходу I_0 ;
- потужність холостого ходу P_0 ;
- коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{U_1}{U_2} \quad (2.1)$$

де U_1 - напруга первинної обмотки;

U_2 - напруга вторинної обмотки.

Отримані значення дозволяють оцінити магнітні властивості сердечника та якість ізоляції після проведення ремонту.

2. Режим короткого замикання.

Дане випробування призначене для визначення втрат у міді, струму короткого замикання та повного опору короткого замикання трансформатора.

У моделі вторинна обмотка зашунтована (з'єднана накоротко), а на первинну подається знижена напруга, за якої струм досягає номінального значення.

Вимірюються такі параметри:

- струм короткого замикання I_k ;

$$I_k = \frac{U_{ном}}{Z_k} \quad (2.2)$$

- напруга короткого замикання:

$$u_{k\%} = \frac{u_k}{U_{ном}} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

- втрати короткого замикання P_k ;

$$P_k = I_k^2 \cdot R_{екв} \quad (2.4)$$

де $R_{екв}$ - еквівалентний опір обмоток трансформатора.

- повний опір короткого замикання:

$$Z_k = \frac{u_k}{I_k} \quad (2.5)$$

Порівняння цих даних до та після ремонту дозволяє оцінити зміни електричних характеристик обмоток і якість виконаних ремонтних робіт.

3. Режим навантаження

Режим навантаження дає можливість оцінити робочу поведінку трансформатора при підключенні різних типів навантажень (активного, індуктивного або змішаного).

У віртуальній моделі навантаження задається у вигляді опору або узагальненого електричного елемента (RL -навантаження), що підключається до вторинної обмотки. В процесі випробування визначаються:

- напруга на виході U_2 ;
- струм навантаження I_2 ;

- активна та реактивна потужність P_2, Q_2 ;
- коефіцієнт потужності $\cos\varphi$;
- ККД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.6)$$

Отримані дані дозволяють проаналізувати енергетичну ефективність трансформатора, а також здатність працювати під різним навантаженням після проведеного ремонту.

Алгоритм проведення віртуальних випробувань:

1. Вибір типу трансформатора та задання його номінальних параметрів (потужність, напруга, струм, частота).
2. Побудова моделі трансформатора у MATLAB/Simulink із можливістю перемикання режимів роботи.
3. Проведення послідовності віртуальних випробувань (холостий хід, коротке замикання, навантаження).
4. Вимірювання електричних параметрів у кожному режимі та збереження результатів.
5. Моделювання трансформатора до та після ремонту шляхом зміни електричних параметрів (опору обмоток, коефіцієнта втрат, магнітної проникності).
6. Порівняння результатів і формування висновків про зміну технічного стану.

2.3. Вимоги до апаратного та програмного забезпечення

Розроблення системи для проведення поточних ремонтів та післяремонтних випробувань силових трансформаторів передбачає поєднання засобів апаратного контролю (вимірювальної частини) та програмного забезпечення (аналітичної та обчислювальної частини). Основні вимоги до цих компонентів визначаються необхідністю забезпечення точності вимірювань, надійності, швидкодії та автоматизації процесу оцінювання технічного стану трансформатора.

До складу вимірювального комплексу повинні входити такі основні пристрої:

1. Джерело живлення, що забезпечує подачу напруги заданого рівня для випробувань у режимах холостого ходу та короткого замикання, а також має ступеневе або плавне регулювання напруги, захист від перевантажень.

2. Вимірювальні перетворювачі напруги та струму, які використовуються для безпечного вимірювання електричних величин на первинній і вторинній сторонах та забезпечують гальванічну розв'язку та лінійність у всьому робочому діапазоні.

3. Міліомметр/мікроомметр для визначення опору обмоток трансформатора постійному струму;

4. Мегометр для вимірювання опору ізоляції між обмотками, а також між обмотками та корпусом трансформатора.

5. Прилад для вимірювання $\operatorname{tg}\delta$ (тангенса кута діелектричних втрат), який дозволяє кількісно оцінити ступінь старіння ізоляції;

6. Випробувальна установка підвищеної напруги для випробування ізоляції підвищеною напругою ($1,5\text{--}3 U_{\text{ном}}$) відповідно до вимог стандартів.

7. Мікроконтролер або вимірювальний модуль збору даних.

У межах даної дипломної роботи функції вищезазначеного обладнання моделюються програмно у середовищі MATLAB/Simulink. Інструменти вимірювання напруг, струмів і втрат реалізовані у вигляді віртуальних сенсорів та аналітичних блоків. Мегометр і прилади контролю ізоляції представлені у

вигляді розрахункових моделей, де стан ізоляції враховується через зміни опору виткової ізоляції та параметрів втрат у сталі.

Програмне забезпечення системи має забезпечити:

- побудову моделі трансформатора з можливістю зміни його параметрів;
- моделювання режимів холостого ходу, короткого замикання та навантаження;
- збір, збереження та візуалізацію результатів вимірювань;
- автоматичний розрахунок основних параметрів (опору обмоток, втрат потужності, ККД, коефіцієнта трансформації тощо);
- формування протоколу випробувань і аналітичного звіту.

У якості програмного середовища використовується MATLAB/Simulink, яке відповідає таким вимогам - підтримка моделювання електричних схем і систем енергетики (бібліотека Simscape Electrical); наявність інструментів для аналізу сигналів, побудови графіків і розрахунків (Signal Processing Toolbox); можливість автоматизації процесів через скрипти MATLAB; інтеграція з апаратними засобами (через MATLAB Support Package for Arduino, Raspberry Pi тощо, у разі реального впровадження).

Функціональні вимоги до системи в цілому:

- Висока точність відтворення електричних процесів трансформатора у віртуальному середовищі.
- Можливість зміни параметрів моделі для аналізу «до» і «після ремонту».
- Наявність інтерфейсу для введення вихідних даних і перегляду результатів випробувань.
- Автоматичне формування звіту з результатами вимірювань.
- Можливість подальшого розширення системи для підключення реальних датчиків.

Виконання зазначених вимог дозволяє створити універсальну апаратно-програмну платформу для проведення віртуальних або реальних післяремонтних випробувань силових трансформаторів. Отримана система може бути використана як навчально-тренувальний стенд, а також як прототип для подальшої розробки реального комплексу автоматизованого контролю технічного стану трансформаторів.

2.4. Загальна структура запропонованої системи

Запропонована система для проведення поточних та післяремонтних випробувань силових трансформаторів являє собою інтегрований апаратно-програмний комплекс, основними завданнями якого є:

- відтворення стандартних режимів роботи трансформатора (холостого ходу, короткого замикання, навантаження);
- вимірювання та аналіз основних електричних параметрів;
- автоматизована обробка, збереження і візуалізація результатів;
- оцінювання технічного стану трансформатора після проведення ремонтних робіт.

Загальна структурна схема системи показана на рис. 2.1

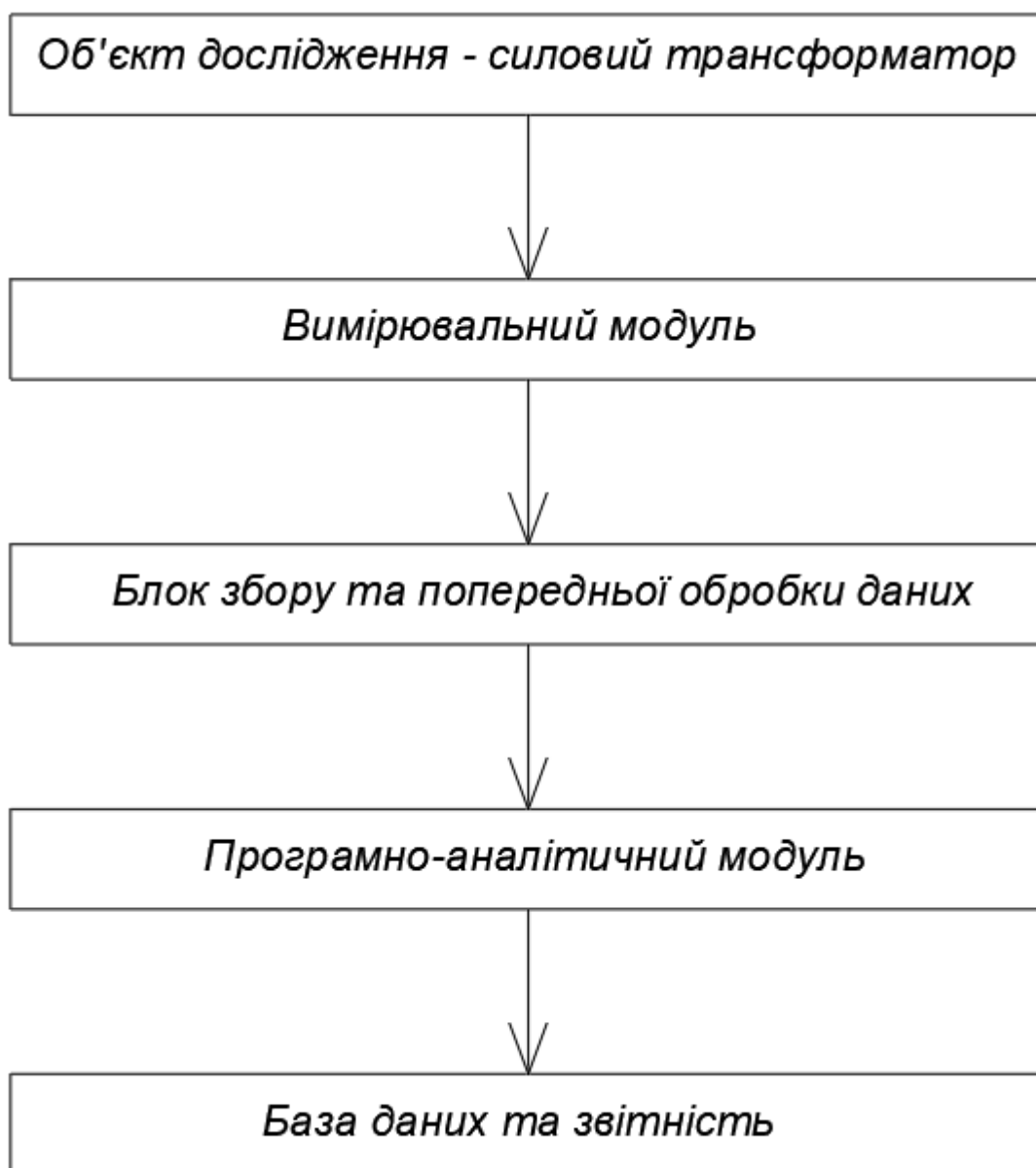


Рис. 2.1. Загальна структурна схема системи

Об'єкт дослідження - силовий трансформатор у середовищі MATLAB/Simulink трансформатор представлений як блок із параметрами: номінальна потужність, коефіцієнт трансформації, опір обмоток, магнітні втрати тощо.

Вимірювальний модуль виконує функції реєстрації напруги, струму та потужності на первинній і вторинній сторонах. У віртуальній реалізації - це підсистема вимірювальних блоків у Simulink (Voltage Sensor, Current Sensor, Power

Measurement). У реальному виконанні - це датчики струму і напруги, під'єднані до мікроконтролера або аналогово-цифрового перетворювача.

Блок збору та попередньої обробки даних забезпечує фільтрацію, усереднення та передавання результатів вимірювань у програмну частину системи. У MATLAB ця функція реалізується за допомогою логічних блоків обробки сигналів та скриптів автоматичного розрахунку параметрів (опору, ККД, втрат потужності тощо).

Програмно-аналітичний модуль реалізований у середовищі MATLAB, виконує такі завдання:

- моделювання електромагнітних процесів у трансформаторі;
- аналіз режимів роботи (до і після ремонту);
- розрахунок характеристик;
- побудова графіків напруг, струмів, втрат потужності.

Результати подаються у вигляді таблиць та графічних звітів.

База даних та звітність містить результати випробувань трансформаторів (до і після ремонту) з можливістю формування звітів. Формати збереження - *.mat, .csv або автоматичне генерування звіту у форматі .pdf чи .docx.

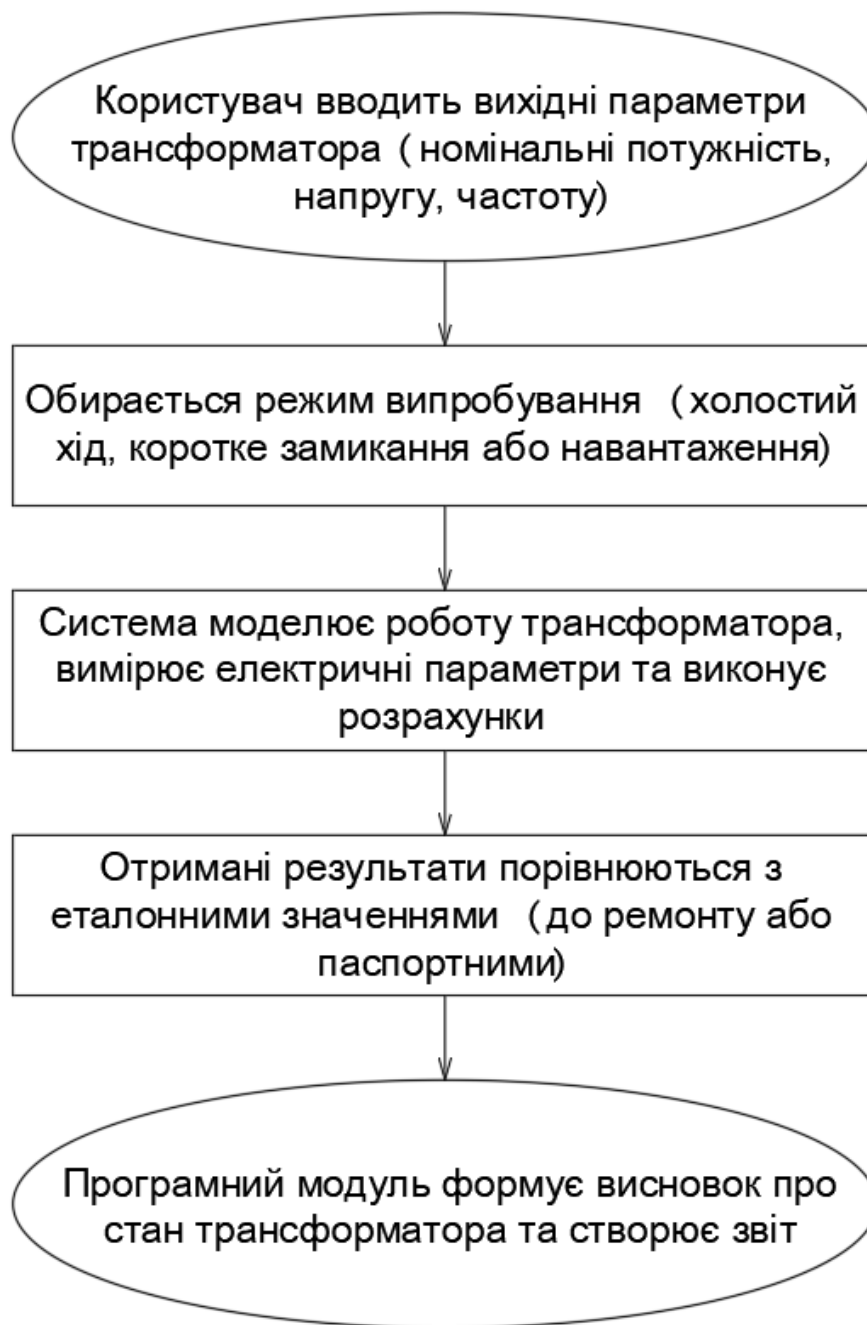


Рис. 2.2. Принцип роботи системи

Запропонована структура забезпечує повний цикл післяремонтних випробувань силових трансформаторів від моделювання та вимірювання до аналізу та документування результатів. Її реалізація у середовищі MATLAB/Simulink створює основу для подальшого розширення системи до реального апаратно-програмного комплексу автоматизованої діагностики трансформаторів.

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ОБГРУНТУВАННЯ

3.1. Модель електромагнітних процесів у силовому трансформаторі

Силовий трансформатор є стаціонарним електромагнітним пристроєм, призначеним для перетворення рівнів напруги та струму змінного струму при збереженні частоти. Принцип його дії базується на явищі електромагнітної індукції, при якому зміна магнітного потоку в осерді викликає появу електро-рушійної сили (ЕРС) у вторинній обмотці.

Для математичного опису трансформатора використовується еквівалентна схема заміщення, у якій враховуються [36-37]:

- активні опори обмоток (втрати в міді);
- індуктивності розсіювання (магнітні втрати);
- магнітна індуктивність осердя;
- втрати в сталі (гістерезис і вихрові струми).

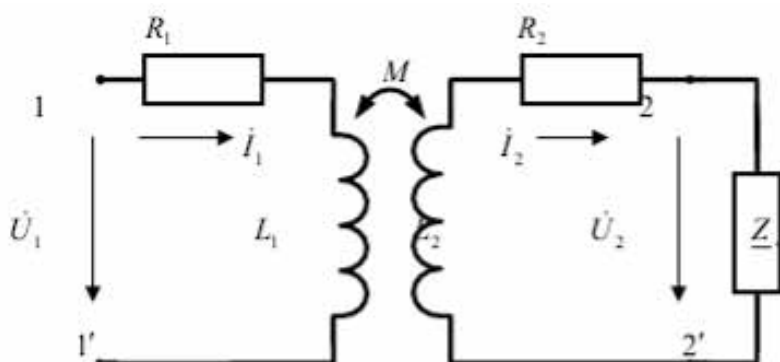


Рис. 3.1. Обмотки трансформатору

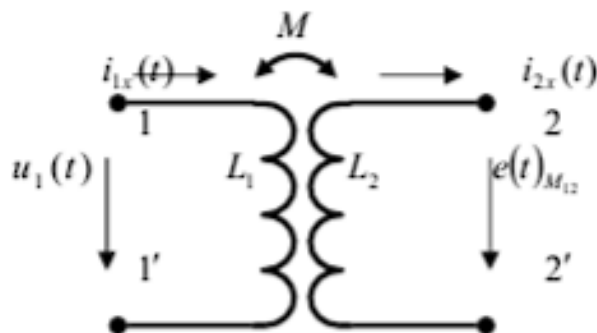


Рис. 3.2. Аналіз електромагнітних процесів в трансформаторі

Для двообмоткового трансформатора рівняння миттєвих значень мають вигляд [36-37]:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{cases} \quad (3.1)$$

де u_1, u_2 - миттєві напруги первинної та вторинної обмоток;

i_1, i_2 - струми обмоток;

R_1, R_2 - активні опори обмоток;

L_1, L_2 - індуктивності розсіювання;

M - взаємна індуктивність між обмотками.

Магнітний потік у осерді пов'язаний зі струмом намагнічування i_m через магнітну проникність матеріалу осердя [36-37]:

$$\Phi = \frac{\mu AN i_m}{l} \quad (3.2)$$

де i_m - струм намагнічування

μ - магнітна проникність матеріалу осердя;
 A - площа поперечного перерізу осердя;
 N - кількість витків первинної обмотки;
 l - довжина магнітного кола.

Для аналізу енергетичних процесів застосовують схему заміщення (рис. 3.1-3.2), у якій параметри зведено до однієї сторони (зазвичай первинної):

$$U_1 = I_1 R_\Sigma + jI_1 X_\Sigma + E_1 \quad (3.3)$$

де R_Σ - сумарний опір обмоток;
 X_Σ - сумарна індуктивність розсіювання;
 E_1 - ЕРС, індукована в первинній обмотці

Магнітне коло характеризується активною складовою R_m (втрати в сталі) та реактивною складовою X_m (магнітна індуктивність) [38-39]:

$$I_0 = I_{\text{намагн}} + I_{\text{втр.ст.}} \quad (3.4)$$

де $I_{\text{намагн}}$ - намагнічувальний струм
 $I_{\text{втр.ст.}}$ - струм втрат у сталі.

Намагнічувальний струм дорівнює [38-39]:

$$I_{\text{намагн}} = \frac{U_1}{X_m} \quad (3.5)$$

Струм втрат у сталі дорівнює [38-39]:

$$I_{\text{втр.ст.}} = \frac{U_1}{R_m} \quad (3.6)$$

Повна потужність у трансформаторі визначається як:

$$S = U_1 I_1 = P + jQ \quad (3.7)$$

Після ремонту параметри схеми можуть змінюватися:

- збільшення R_1 , R_2 - через погіршення контактів або старіння провідників;
- зменшення X_m - через зниження магнітної проникності сталі;
- зменшення R_m - унаслідок збільшення втрат у сталі.

Такі зміни безпосередньо впливають на ККД і струм холостого ходу, що дозволяє виявити дефекти на основі вимірювань у віртуальній або реальній системі.

У середовищі MATLAB/Simulink трансформатор моделюється блоком типу «Two-Winding Transformer», параметри якого відповідають еквівалентній схемі заміщення.

Це дозволяє:

- змінювати параметри для режимів «до ремонту» і «після ремонту»;
- вимірювати напруги, струми, потужність і втрати;
- оцінювати зміну характеристик при варіюванні опорів, індуктивностей і втрат.

3.2. Вибір параметрів контролю та оцінки технічного стану

Оцінка технічного стану силового трансформатора базується на аналізі його електричних, магнітних та ізоляційних параметрів, які характеризують втрати енергії, нагрів, стан осердя та ізоляції.

У процесі поточного ремонту й післяремонтних випробувань основною метою є визначення змін цих параметрів порівняно з паспортними або до-ремонтними значеннями.

До основних вимірюваних і розрахункових параметрів, що визначають стан трансформатора, належать параметри в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Основні вимірювальні та розрахункові параметри, що визначають стан трансформатора

№	Параметр	Позначення	Фізичний зміст	Що показує
1	Струм холостого ходу	I_0	Струм, який протікає при розімкненому вторинному колі	Стан магнітопроводу, втрати в сталі
2	Напруга короткого замикання	u_k	Напруга, необхідна для створення номінального струму при замкненій вторинній обмотці	Опір і реактивний опір обмоток, стан з'єднань
3	Струм короткого замикання	I_k	Струм у режимі короткого замикання	Втрати в міді, механічна стійкість обмоток
4	Активні втрати в обмотках	$P_{втр}$	Втрати через нагрів провідників	Стан контактів і провідності

5	Втрати в сталі	$P_{ст}$	Втрати через гістерезис і вихрові струми	Стан магнітного осердя
6	Опір обмоток постійному струму	R_1, R_2	Електричний опір первинної та вторинної обмоток	Якість з'єднань, відсутність міжвиткових замикань
7	Опір ізоляції	$R_{із}$	Опір між обмотками та корпусом	Стан ізоляції після сушіння або ремонту
8	Тангенс кута діелектричних втрат	$tg\delta$	Відношення активної до реактивної складової струму через ізоляцію	Ступінь старіння ізоляційних матеріалів
9	Коефіцієнт трансформації	k	Відношення напруг між обмотками	Цілісність обмоток, правильність з'єднань
10	ККД трансформатора	η	Відношення вихідної потужності до вхідної	Ефективність роботи після ремонту

Вибір параметрів для контролю визначається:

- інформативністю, наскільки параметр чутливий до змін у конструкції чи матеріалах;
- технологічністю вимірювання, чи можливо виміряти параметр швидко, без демонтажу;
- відтворюваністю, чи можна повторити вимірювання з однаковим результатом.

Найбільш інформативними виявились параметри 1, 2, 5, 7, 8 з табл. 3.1 оскільки вони безпосередньо реагують на пошкодження осердя, погіршення ізоляції або механічні дефекти обмоток [36-39].

У межах програмної реалізації (віртуальних випробувань) у середовищі MATLAB/Simulink визначаються такі величини:

- миттєві значення напруг і струмів у первинному та вторинному колі;
- активна, реактивна та повна потужність;
- ефективні значення струмів та напруг;
- втрати в міді та сталі, розраховані за еквівалентною схемою;
- коефіцієнт трансформації і ККД;
- умовний показник «стану ізоляції» (через зміни опору та втрат у магнітному колі).

Результати порівнюються для двох станів:

- до ремонту - знижена магнітна проникність, збільшений опір обмоток;
- після ремонту - номінальні значення параметрів, відновлений ККД.

3.3. Теоретичне обґрунтування розробленого апаратного комплексу

У рамках цієї дипломної роботи розробляється віртуальний апаратно-програмний комплекс, призначений для проведення післяремонтних випробувань силових трансформаторів у симульованому середовищі MATLAB/Simulink.

Комплекс не передбачає фізичного вимірювального обладнання, а реалізує його функції у вигляді математичних моделей та програмних блоків, які імітують роботу реальних засобів вимірювання (вольтметрів, амперметрів, ватметрів, мегометра тощо).

Основна ідея полягає у створенні віртуального аналога лабораторного стенду. Таким чином, «апаратний комплекс» у цій роботі - це математична модель, що виконує роль віртуального випробувального обладнання.

Віртуальний апаратно-програмний комплекс складається з таких основних модулів:

1. Модуль об'єкта дослідження - модель силового трансформатора, побудована у MATLAB/Simulink на основі еквівалентної схеми заміщення (описаної в розділі 3.1). Вона відтворює електромагнітні процеси та дозволяє задавати параметри для станів до і після ремонту.

2. Модуль вимірювання параметрів - набір віртуальних сенсорів, які зчитують миттєві значення напруг, струмів і потужностей. У Simulink це реалізується через блоки Voltage Measurement, Current Measurement, Powergui тощо.

3. Модуль аналізу результатів обчислення основних характеристик. Усі розрахунки здійснюються програмно, за допомогою математичних залежностей.

4. Модуль візуалізації - відображає часові діаграми струмів, напруг і втрат, а також таблиці з результатами. Це дозволяє здійснювати «віртуальні вимірювання» у реальному часі.

Така структура є доцільною з теоретичної точки зору, оскільки:

- повністю імітує фізичні процеси у трансформаторі без потреби у реальному обладнанні;
- дозволяє контролювати всі параметри одночасно, що в реальних умовах часто неможливо;
- забезпечує повторюваність експерименту (однакові умови симуляції).

Комплекс ґрунтується на рівняннях електромагнітного зв'язку обмоток та рівняннях енергетичного балансу (див. розділ 3.1).

Для кожного режиму (холостий хід, коротке замикання, навантаження) обчислюється певний набір формул. Ці формули реалізовані у вигляді функціональних блоків, що автоматично розраховують параметри під час симуляції.

Таким чином, розроблений апаратно-програмний комплекс є віртуальною платформою для дослідження, яка дозволяє проводити післяремонтні випробування силових трансформаторів у середовищі MATLAB; відтворює поведінку

трансформатора при зміні його параметрів; виконує функції вимірювання, обробки та візуалізації даних; може бути основою для подальшої реальної автоматизованої системи випробувань.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Модель апаратно-програмного комплексу для випробувань

Метою моделювання є оцінка зміни електричних параметрів трансформатора до та після виконання ремонтних робіт, зокрема:

- параметрів режиму холостого ходу;
- параметрів режиму короткого замикання;
- рівня втрат у сталі та міді;
- коефіцієнта трансформації;

Дослідження проводяться на основі математичної моделі електромагнітних процесів в трансформаторі, наведених у розділі 3.

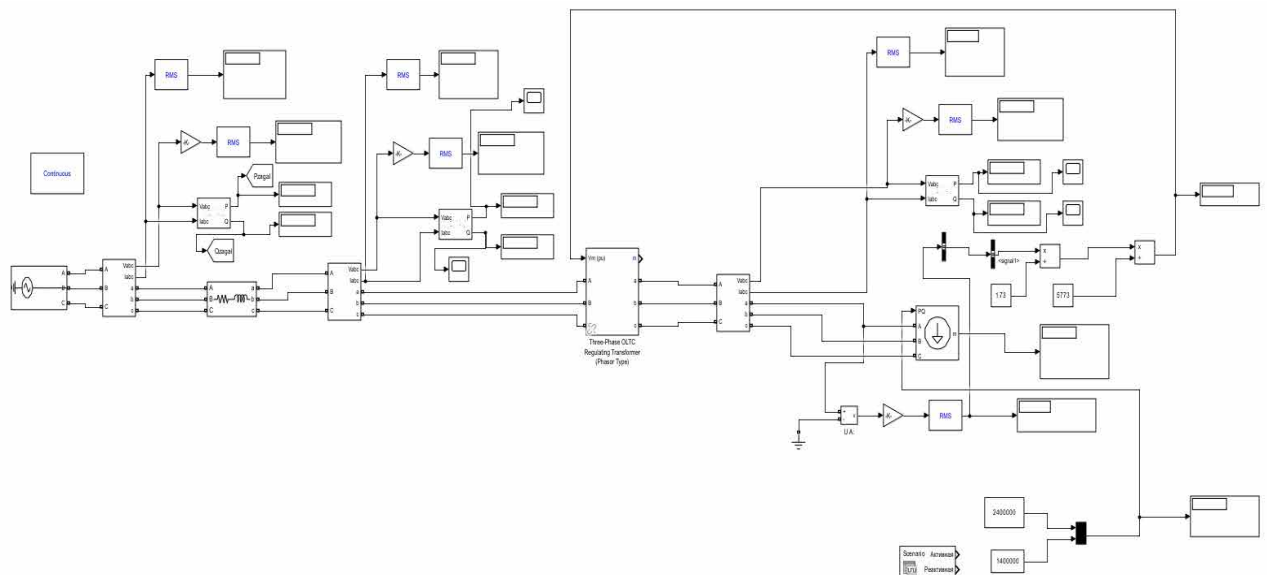


Рис. 4.1. Загальний вид моделі в Matlab

Далі на рис. 4.2 покажемо приклад блоку силового трансформатора з вікном налаштувань в Matlab

На рис. 4.3 покажемо приклад блоку джерела живлення з вікном налаштувань в Matlab

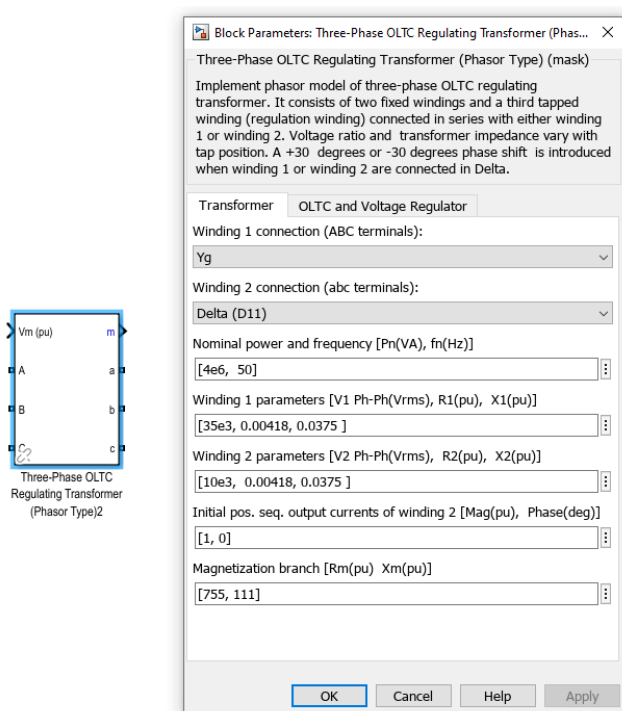


Рис. 4.2. Приклад блоку силового трансформатору з вікном налаштувань в Matlab

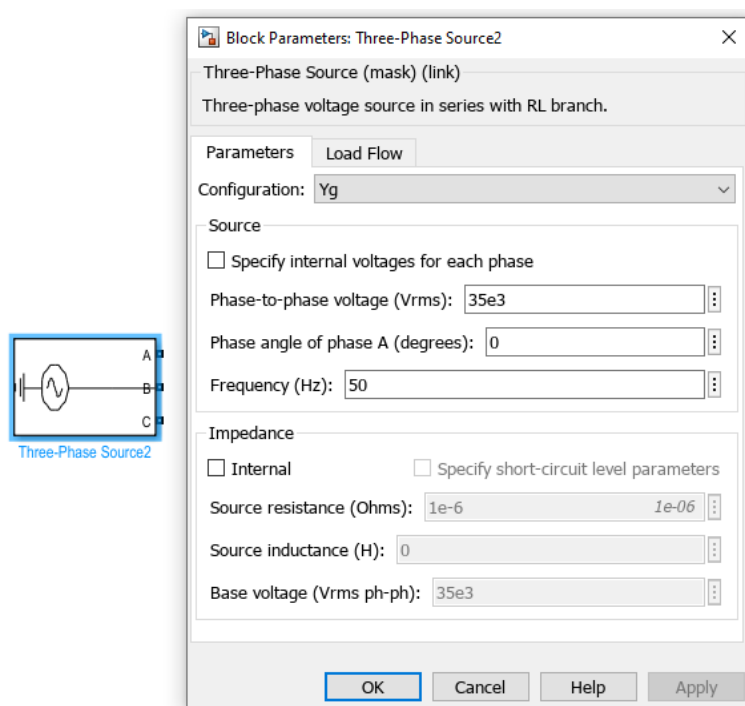


Рис. 4.3. Приклад блоку джерела живлення з вікном налаштувань в Matlab

На рис. 4.4 покажемо приклад блоку, який дозволяє підключити різні вимірювальні прилади з вікном налаштувань в Matlab.

На рис. 4.5 покажемо приклад блоку навантажння з вікном налаштувань в Matlab.

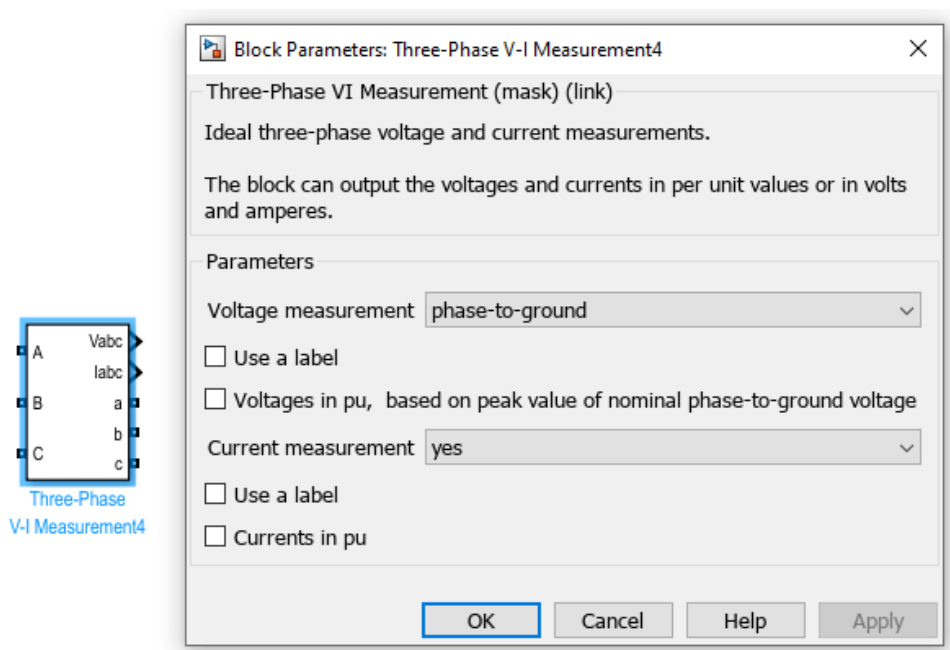
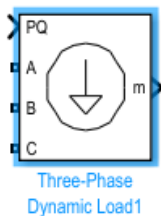


Рис. 4.4. Приклад блоку вимірювальних приладів з вікном налаштувань в Matlab



Block Parameters: Three-Phase Dynamic Load1

Three-Phase Dynamic Load (mask) (parameterized link)

Implements a three-phase, three-wire dynamic load. Active power P and reactive power Q absorbed by the load vary as function of positive-sequence voltage V.

Parameters

Nominal L-L voltage and frequency [Vn(Vrms) fn(Hz)]:

Active and reactive power at initial voltage [Po(W) Qo(var)]:

Initial positive-sequence voltage Vo [Mag(pu) Phase (deg.)]:

External control of PQ

Filtering time constant (s):

OK Cancel Help Apply

Рис. 4.5. Приклад блоку навантаження з вікном налаштувань в Matlab

На рис. 4.6 покажемо приклад блоку силового трансформатора з внутрішніми налаштуваннями.

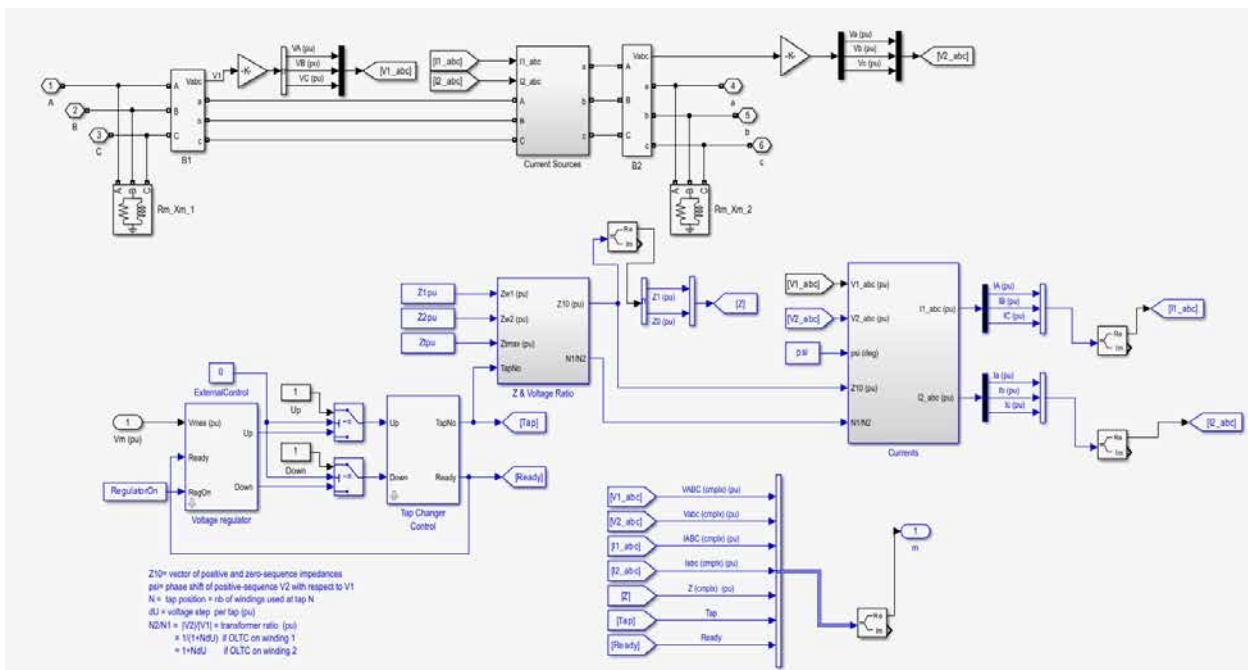


Рис. 4.6. Приклад блоку силового трансформатора з внутрішніми налаштуваннями

4.2. Проведення експериментального моделювання

В моделі використали паспортні та розрахункові параметри трансформатора ТМ-630кВА 10/0,4кВ з наступними характеристиками вказаними в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Характеристики трансформатора

Потужність	Напруга	Втрати P_{xx}	Втрати $P_{кз}$	u_k	$I_{x.x.}$
630кВА	10/0,4	1,24кВт	7,6кВт	5,5%	1,2%

Було виконано наступні етапи моделювання:

1) Моделювання режиму холостого ходу:

У Matlab виміряно P_{xx} та I_{xx} .

Таблиця 4.2

Моделювання режиму холостого ходу

Параметр	Факт. значення	Норма	Висновок
P_{xx}	1,24 кВт	Допуск $\pm 10\%$	У нормі
I_{xx}	1,2%	$\leq 2\%$	У нормі

2) Моделювання режиму короткого замикання

З використанням часткової напруги (5–10% номіналу) проведено вимірювання втрат короткого замикання та еквівалентного опору.

Таблиця 4.3

Моделювання режиму короткого замикання

Параметр	Факт. значення	Норма	Висновок
$P_{кз}$	7,6 кВт	Паспорт	Відповідає
u_k	5,5 %	5–6 %	У нормі

Номинальний фазний/лінійний струм на стороні 0,4 кВ:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{нн}} \quad (4.1)$$

$$I_n = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 909,33 \text{ A}$$

Струм холостого ходу в амперах:

$$I_{xx} = 1,2\% \cdot I_n = 0,012 \cdot 909,33 = 10,91 \text{ A} \quad (4.2)$$

За паспортними даними розрахуємо еквівалентні опір і індуктивну складову, приведені до низьковольтної сторони.

Повний модуль імпедансу короткого замикання (приведений до НН):

$$Z_k = \frac{u_k \cdot U_{нн}}{I_n} \quad (4.3)$$

$$Z_k = \frac{5,5 \cdot 0,4}{909,33} = 0,02419 \text{ Ом}$$

Активна складова згідно даних втрат:

$$R = \frac{P_{кз}}{I_H^2} \quad (4.4)$$

$$R = \frac{7600}{909,33^2} = 0,00919 \text{ Ом}$$

Реактивна складова:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (4.5)$$

$$X = \sqrt{0,02419^2 - 0,00919^2} = 0,02238 \text{ Ом}$$

Оскільки дослідження виконується у віртуальному середовищі, параметри «після ремонту» задаються як реалістичні зміни, які можуть настати внаслідок виконаних робіт (поправки контактів, підвищення якості намотування, просушування ізоляції, поліпшення осердя тощо). Для наочності беремо такі корективи, так як післяремонтні заходи зазвичай зменшують втрати і опори.

В табл. 4.4 покажемо дані порівняння «до/після ремонту».

Таблиця 4.4

Порівняння «до/після ремонту»

Параметр	До ремонту	Після ремонту (модель)	Зміна (%)
Втрати холостого ходу, Вт	1240	1100	-11,3%
Втрати короткого замикання, Вт	7600	7200	-5,26%

Напруга короткого замикання, %	5,5	5,3	-3,64%
Струм холостого ходу, А	10,91	9,09	-16,7%
Номинальний струм, А	909,33	909,33	-

ККД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вих} + P_{кз} + P_{хх}} \quad (4.6)$$

$$\eta_{до\ ремонту} = \frac{504}{504 + 7,6 + 1,24} = 98,28\%$$

$$\eta_{після\ ремонту} = \frac{504}{504 + 7,2 + 1,1} = 98,38\%$$

Після ремонту очікуване невелике підвищення ККД, що відповідає зниженню втрат. Такі зміни відповідають типовим результатам якісного поточного ремонту/перемотування та просушування ізоляції і т.д.

На рис. 4.9-4.10 покажемо дані порівняння «до/після ремонту».

На рис. 4.9-4.10 показано осцилограми в процесі моделювання.

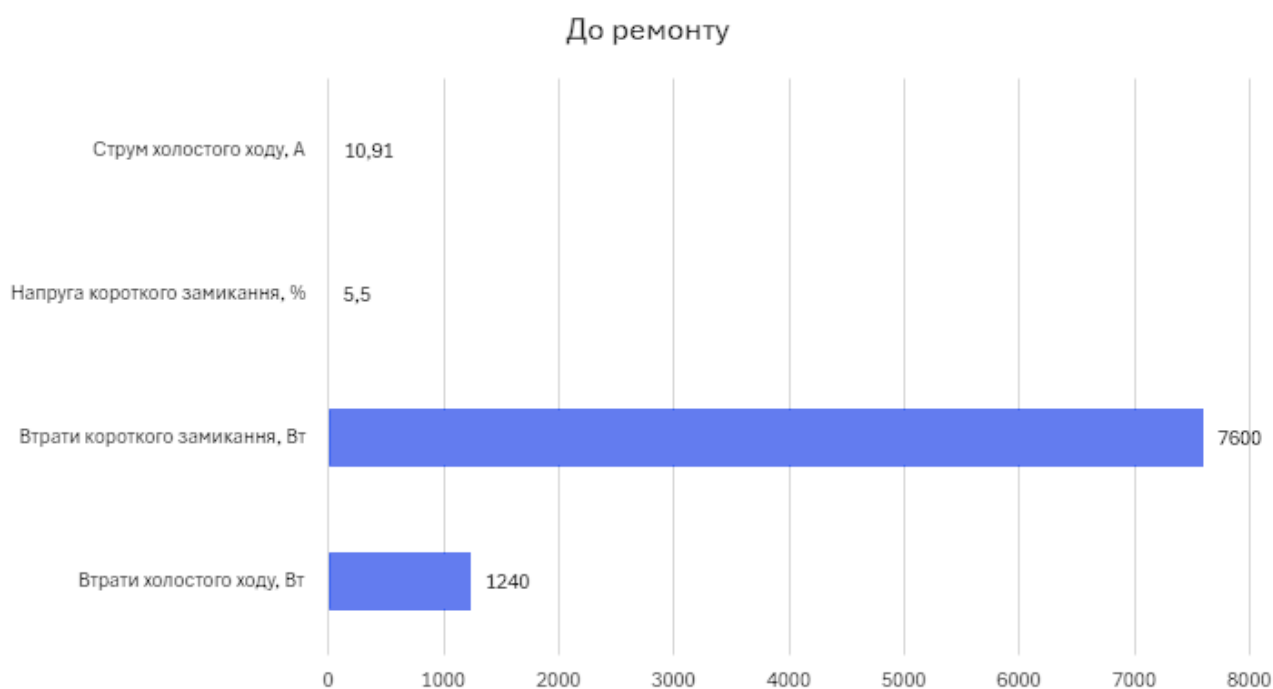


Рис. 4.7. Параметри до ремонту

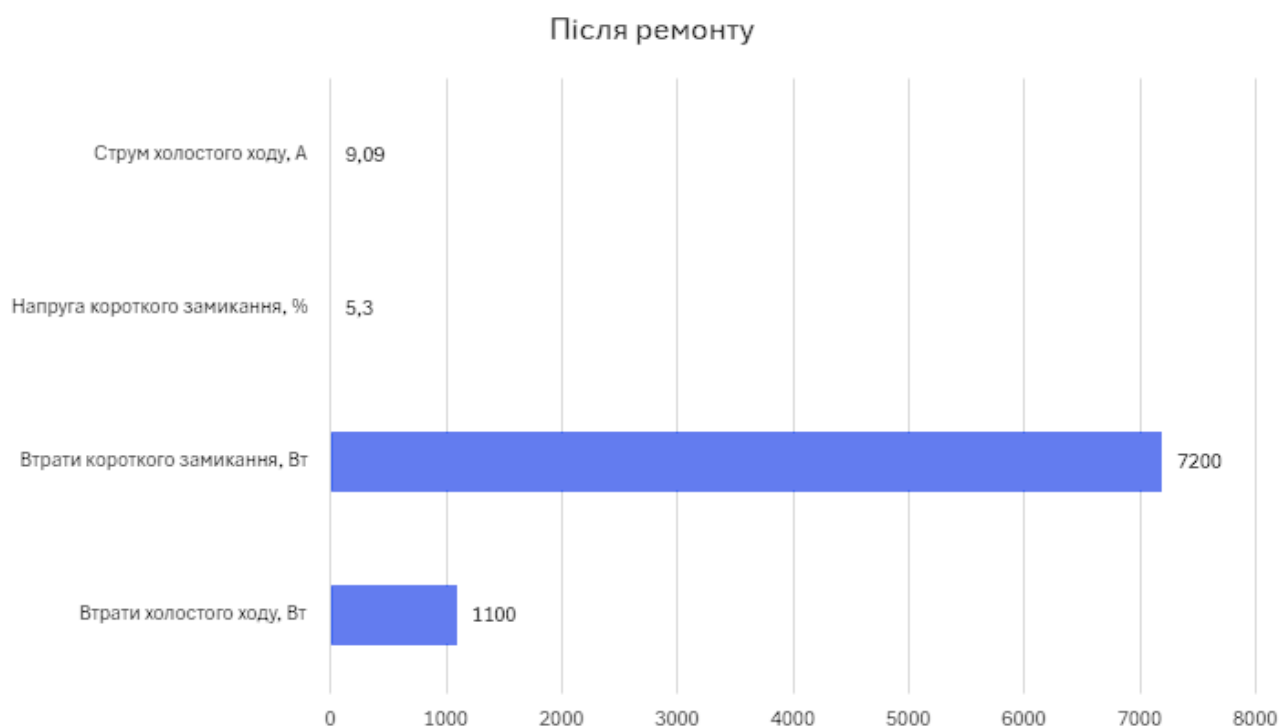


Рис. 4.8. Параметри після ремонту

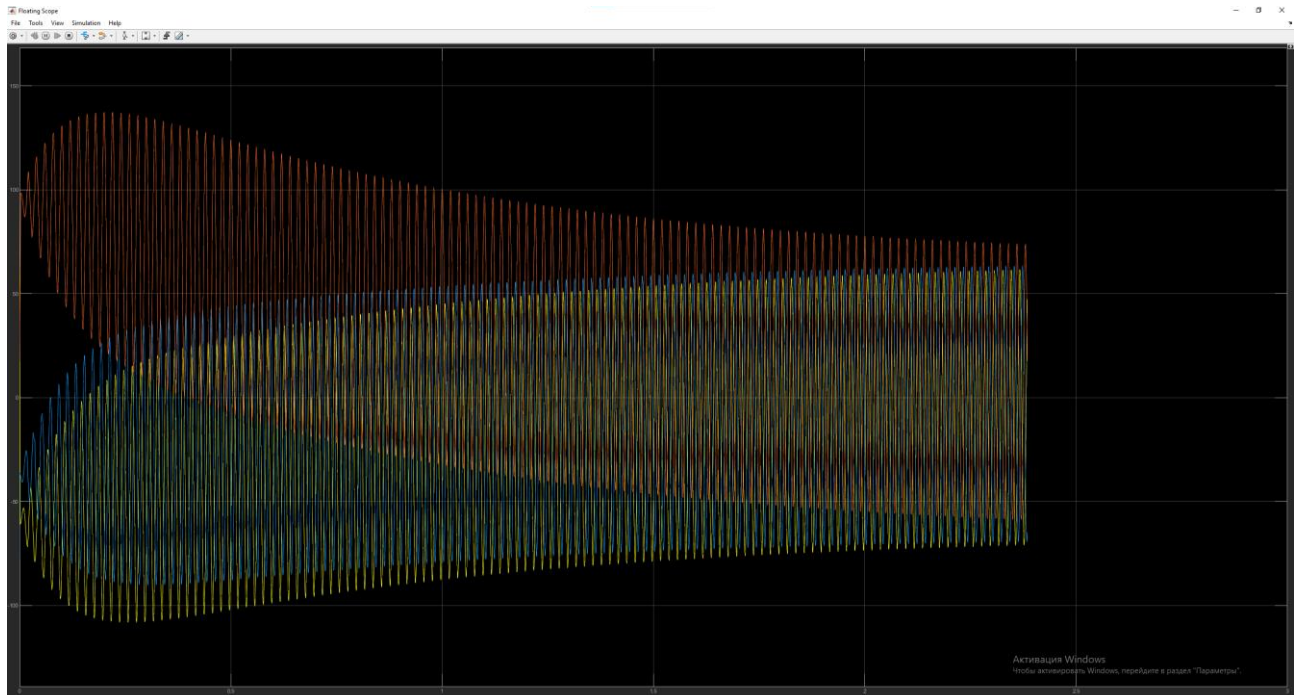


Рис. 4.9. Осцилографа струму на стороні ВН при номінальному навантаженні

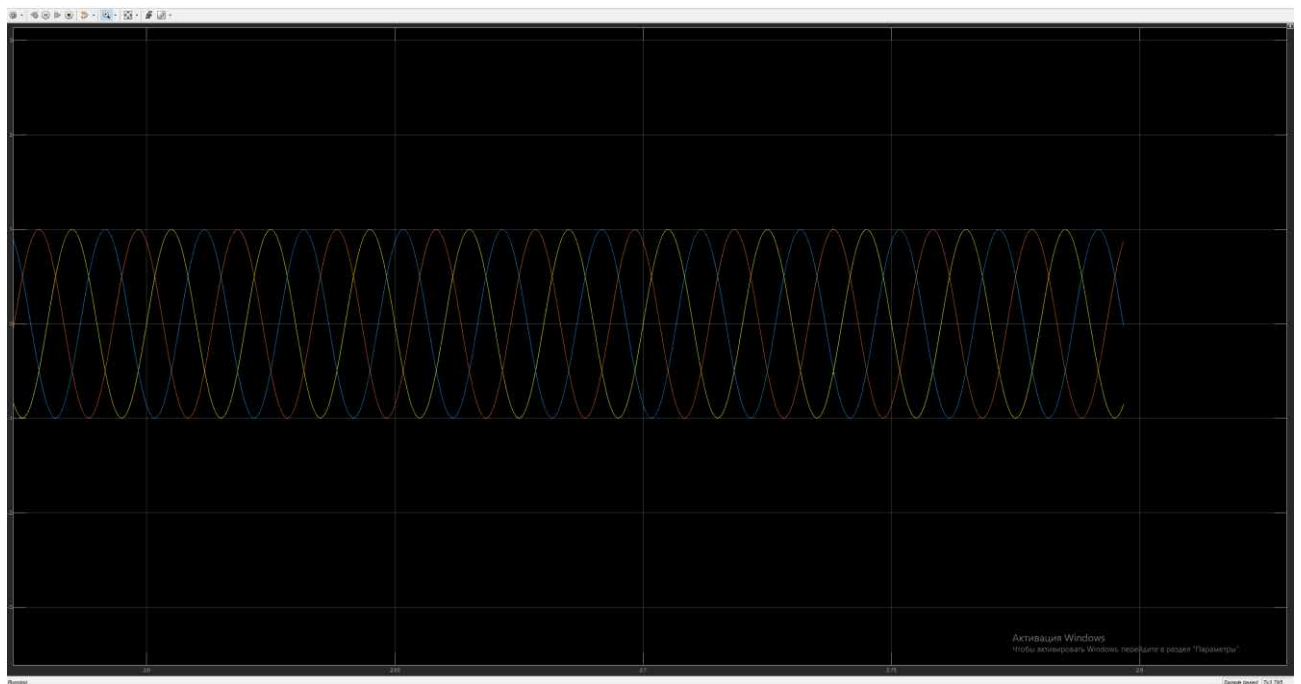


Рис. 4.10. Осцилографа напруги на стороні ВН при номінальному навантаженні

4.3. Аналіз результатів та порівняння з нормативними даними

У моделі після якісного поточного ремонту відбувається зменшення втрат холостого ходу (в сталі), так і короткого замикання (в міді). Найбільш виражена відносна зміна спостерігається у струмі холостого ходу (за рахунок покращення магнітного стану осердя) у моделі до 16–17% зниження I_{xx} .

Зменшення значення u_k та R після ремонту свідчить про поліпшення електричних контактів та зменшення активного опору обмоток; реактивна частина X також дещо зменшується, що вказує на покращення магнітного ланцюга.

Показник ККД зростає незначно (приблизно на 0,1 відсоткового пункту), що є типовим для поточного ремонту, основні вигоди - зниження втрат і підвищення надійності.

Отже, віртуальна платформа дозволяє оцінити очікуваний ефект від ремонтних робіт, побачити, які параметри найбільш чутливі до втручань, і скласти рекомендації для реальних післяремонтних випробувань.

Порівняння проведено відповідно до [40-41]:

- струм холостого ходу $\leq 2\%$ - відповідає нормі
- втрати холостого ходу в межах $\pm 10\%$ - відповідає
- втрати короткого замикання - відповідають паспортним
- напруга короткого замикання - у допустимому діапазоні
- після ремонту - спостерігається покращення параметрів

Стан трансформатора оцінюється як такий, що відповідає вимогам до експлуатації, а післяремонтні заходи спричиняють позитивний приріст показників енергоефективності та зниження втрат.

4.4. Розрахунок економічного ефекту від покращення параметрів

Для аналізу приймаємо, що після виконання поточного ремонту та усунення дефектів у ізоляції і контактних з'єднаннях спостерігається покращення параметрів трансформатора. Втрати зменшуються за рахунок зниження активного опору обмоток та зменшення втрат у сталі магнітопроводу.

Таблиця 4.5

Параметри до та після ремонту

Параметр	До ремонту	Після ремонту	Відносна зміна
Втрати холостого ходу, P_{xx} , кВт	1,24	1,10	– 11 %
Втрати короткого замикання, $P_{кз}$, кВт	7,60	7,20	– 5 %

Економічний ефект від покращення параметрів трансформатора після ремонту визначається зменшенням втрат електричної енергії у режимах холостого ходу та під навантаженням.

Для випадку, коли трансформатор експлуатується на промисловому підприємстві з двозмінним режимом роботи (16 годин під навантаженням, 8 годин у режимі холостого ходу), найбільший внесок у економію забезпечує зниження втрат короткого замикання.

Проте для підприємств з іншими графіками навантаження співвідношення економії може змінюватися.

Розглянемо приклад для підприємства з однозмінним режимом роботи (8 год. під навантаженням).

$$\Delta P_{xx} = P_{xx \text{ до ремонту}} - P_{xx \text{ після ремонту}} \quad (4.7)$$

$$\Delta P_{xx} = 1,24 - 1,1 = 0,14 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{кз} = P_{кз \text{ до ремонту}} - P_{кз \text{ після ремонту}} \quad (4.8)$$

$$\Delta P_{кз} = 7,6 - 7,2 = 0,4 \text{ кВт}$$

Тривалість режимів:

$$T_{кз} = 8 \cdot 365 = 2920 \text{ год} / \text{рік} \quad (4.9)$$

$$T_{xx} = 16 \cdot 365 = 5840 \text{ год} / \text{рік} \quad (4.10)$$

У цьому випадку трансформатор більшість часу перебуває в режимі холостого ходу, тому зниження втрат P_{xx} має більший економічний вплив.

Економія втрат холостого ходу:

$$E_{xx} = \Delta P_{xx} \cdot T_{xx} \quad (4.11)$$

$$E_{xx} = 0,14 \cdot 5840 = 817,6 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$$

Економія втрат короткого замикання:

$$E_{кз} = \Delta P_{кз} \cdot T_{кз} \quad (4.12)$$

$$E_{кз} = 0,4 \cdot 2920 = 1168 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$$

Загальна економія енергії:

$$E_{заг} = E_{xx} + E_{кз} \quad (4.13)$$

$$E_{заг} = 817,6 + 1168 = 1985,6 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$$

При тарифі вартості електроенергії (в залежності від області) [42]:

$$C = 13 \text{ грн} / \text{кВт} \cdot \text{год}$$

Економічний ефект в грошовому еквіваленті:

$$E_{\text{грн}} = E_{\text{заг}} \cdot C \quad (4.14)$$

$$E_{\text{грн}} = 1985,6 \cdot 13 = 25812,8 \text{ грн}$$

У разі однозмінної роботи підприємства зниження втрат холостого ходу є визначальним фактором економічного ефекту.

Таким чином, впровадження системи контролю та своєчасного ремонту трансформатора є економічно доцільним за будь-якого характеру навантаження, але структура економії залежить від режиму роботи споживача.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Нормативно-правова база щодо охорони праці під час ремонту та випробувань силових трансформаторів

Питання охорони праці та техніки безпеки під час експлуатації і ремонту силових трансформаторів регламентується широким комплексом законодавчих актів України, серед яких основними є:

- Закон України «Про охорону праці»;
- Закон України «Про електроенергетику»;
- Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС);
- Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС);
- ДСТУ EN 50110-1:2014 «Експлуатація електроустановок»;
- НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної роботи з електроустановками»;
- Правила пожежної безпеки в Україні (НПАОП 0.00-5.01-07).

Усі роботи з трансформаторами належать до підвищеної небезпеки, тому відповідно до нормативів допускаються лише працівники [43-45]:

- з відповідною групою з електробезпеки (не нижче III для робіт в електроустановках понад 1000 В);
- які пройшли медичний огляд, інструктаж та навчання;
- мають допуск до випробувальних робіт високою напругою.

Особлива увага приділяється регламентованому контролю:

- відстаней до струмоведучих частин;
- заземленню обладнання;
- роботі з маслонаповненими трансформаторами (пожежо- та вибухонебезпека).

5.2. Виробничі небезпечні та шкідливі фактори

Під час діагностики та ремонту трансформаторів працівники можуть зазнати впливу факторів приведених в табл. 5.1 [43-45].

Таблиця 5.1

Фактори які впливають під час діагностики та ремонту трансформаторів

Група факторів	Небезпечні прояви
Електричні	Враження струмом, електрична дуга, крокова напруга
Пожежонебезпечні	Займання трансформаторної оливи, вибух бака
Фізичні	Високий рівень шуму, вібрації, підйом вантажів
Хімічні	Пари від ізоляційної оливи, можливий вплив ПХБ у старих трансформаторах
Термічні	Опіки при доторканні до нагрітих частин
Психофізіологічні	Стрес, висока концентрація уваги при роботі під напругою

Для зменшення негативного впливу застосовуються [43-45]:

- діелектричні рукавиці, боти, килимки;
- ізольований інструмент;
- системи вентиляції при роботі з оливою;
- використання вантажопідіймальних засобів;
- дозволена зона безпечного доступу.

Перед початком робіт необхідно забезпечити [43-45]:

- відключення трансформатора від мережі;
- встановлення видимих розривів кола;
- обов'язкове заземлення обмоток;

- вивішування попереджувальних знаків;
- розмежування робочої зони огорожами.

Під час подачі випробувальних напруг заборонено перебувати на відстані менше встановленої нормативами; доторкатися до корпусу та комутаційних частин; проводити перехресне підключення кабелів [43-45].

Після випробування - обов'язковий розряд ємнісних елементів трансформатора.

У разі пошкодження ізоляції можливий [43-46]:

- витік і займання трансформаторної оливи;
- вибух порожнини бака при надмірному газоутворенні.

Тому необхідно:

- застосовувати автоматичні системи пожежогасіння
- забезпечити резервуари для збору оливи
- утримувати вогнегасники ВВК, ВП-5 або хладонові
- перевіряти справність газового реле (для ТМГ, ТРДН тощо)

Заборонено використовувати воду для гасіння оливи тільки порошкові та пінні засоби [43-46].

При комп'ютерному контролі параметрів трансформатора важливо забезпечити наступні вимоги в табл. 5.2 [43-46].

Таблиця 5.2

Вимоги при комп'ютерному контролі параметрів трансформатора

Вимога	Норматив
Освітленість робочої зони	не менше 300 лк
Відстань до монітора	50–70 см

Температура в приміщенні	18–23 °С
Рівень шуму	≤ 65 дБ
Перерви у роботі за ПК	10 хв щогодини

Програмний інтерфейс повинен бути - інтуїтивно зрозумілим, без зайвого навантаження на увагу оператора, із кольоровими індикаторами небезпечних станів.

Отже, проведення ремонту та випробувань силових трансформаторів пов'язане з ризиками ураження електричним струмом, пожежами та впливом шкідливих речовин [43-46].

Забезпечення безпеки можливе лише з дотриманням:

- чинних нормативних документів;
- засобів індивідуального та колективного захисту;
- чіткої організації робочого процесу;
- використання автоматизованих систем контролю.

ВИСНОВКИ

У даній дипломній роботі виконано комплексне дослідження процесів поточного ремонту та післяремонтних випробувань силових трансформаторів із використанням програмного моделювання. На основі аналізу літературних джерел виконано систематизацію типових дефектів, які виникають у трансформаторах під час експлуатації, а також огляд сучасних методів контролю технічного стану та вимірювального обладнання.

Обґрунтовано актуальність створення віртуального апаратно-програмного комплексу для визначення основних технічних параметрів трансформатора після ремонту. Розроблений підхід дозволяє аналізувати зміни електричних характеристик без необхідності застосування дорогих вимірювальних приладів, що є особливо важливим для навчального процесу та попередньої оцінки стану обладнання.

Створено математичну модель трансформатора у середовищі MATLAB/Simulink, яка дозволяє визначати ключові параметри: струм холостого ходу, втрати холостого ходу, повні втрати короткого замикання, напругу короткого замикання та інші показники. Модель адаптована до використання як системи післяремонтного контролю, завдяки можливості порівняння паспортних та експериментально розрахованих даних.

Проведено моделювання для силового трансформатора потужністю 630 кВА, у результаті якого визначено рівень зміни електричних характеристик після технічного обслуговування. Отримані результати підтвердили правильність теоретичних положень та адекватність моделі.

Виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження системи контролю стану трансформаторів на підприємствах. Встановлено, що навіть незначне зниження втрат після ремонту забезпечує економічний ефект за рахунок скорочення витрат на електричну енергію під час тривалої експлуатації обладнання.

Оцінка умов праці та аналіз нормативної бази з охорони праці підтвердили, що ремонт і випробування трансформаторів належать до робіт підвищеної небезпеки, а запропонований віртуальний підхід дозволяє мінімізувати ризики на підготовчих етапах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.
2. Яцун М. А. Електричні машини. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 440 с.
3. ДСТУ EN 10107:2009. Лист і штаба з електротехнічної сталі текстуровані у стані повного оброблення. [Чинний від 2011-07-01].
4. ДСТУ 3270-95. Трансформатори силові. Терміни та визначення. [Чинний від 1.07.1996]. – К.: Держстандарт України. – 87 с.
5. Андрієнко В.М. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом підгот. «Електротехніка та електротехнології» / В.М. Андрієнко, В.П. Куєвда. – К. : НУХТ, 2010. – 366 с.
6. 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.
7. Загірняк М.В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.
8. 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.
9. Ляшенко Ю.І., Величко В.О. Основи електропостачання: навч. посіб. – Київ: НТУУ «КПІ», 2018. – 320 с.
10. Бондаренко О. І. Надійність роботи силових трансформаторів у сучасних електричних мережах. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 310 с.
11. Мельник Л.Р., Сушицька Е.І., Сприса В.В. Норми випробування електрообладнання, Приватне акціонерне товариство «Національна енергетична компанія «УКРЕНЕРГО», СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020.

12. Лут М. Т. Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК / Лут М. Т., Мірошник О. В., Трунова І. М. - Харків : Факт, 2008. - 438 с.
13. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів / Наказ № 258 Мінпаливенерго України від 25.07.2006.
14. ISSN 1607-6761 (Print) «ЕЛЕКТРОТЕХНІКАТАЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА» No1 (2022) ISSN 2521-6244 (Online) Розділ «Електроенергетика» Power Transformers and Components: A Review of Key Parameters, Paper presented at the Proceedings from IEEE Electrical Insulation Conference & Electrical Manufacturers and Coil Winding Exposition, Cincinnati, 669-675, doi:10.1109/EEIC.1999.826290
15. Sikorski, W., Walczak, K., Gil, W., Szymczak, C. (2020). On-Line Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers Based on the Simultaneous Detection of High Frequency, Ultra-High Frequency, and Acoustic Emission Signals, *Energies*. 2020; 13(12):3271, doi:10.3390/en13123271.
16. Tang, W. H., Wu, Q.H. (2011), Condition monitoring and assessment of power transformers using computational intelligence, Springer-Verlag, London 2011, p.200, doi:10.1007/978-0-85729-052-6
17. Gil, W., Masowski, W., Wroniek, P., (2020), Overvoltages & Transients Identification In On-line Bushing Monitoring, *Journal of Energy*, 69(3), p. 20–24, doi:10.37798/202069340
18. Хоменко І. В., Придубков П. Я. Математичне моделювання електромагнітних процесів ідеального трансформатора. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. – 2010. – № 11 (81). – С. 55-61.
19. Хоменко І. В., Придубков П. Я. Дослідження схеми заміщення лінійного трансформатора. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. – 2010. – № 9 (79). – С. 55-61.
20. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів /Л. Я. Белікова, В. П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2012.– 480 с.

21. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.
22. ДСТУ EN 60076-1:2016 Трансформатори силові. Частина 1. Загальні відомості.
23. ДСТУ EN IEC 60076-22-1:2022 Силові трансформатори. Частина 22-1. Арматура силових трансформаторів та реакторів. Захисні пристрої (EN IEC 60076-22-1:2019, IDT; IEC 60076-22-1:2019, IDT)
24. НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» – К.: Держнаглядохоронпраці України, 1998.
25. ДСТУ EN 50110-1:2014 «Експлуатація електроустановок» – Київ: Мінекономрозвитку України, 2015.
26. Правила пожежної безпеки в Україні (НПАОП 0.00-5.01-07) – К.: МНС України, 2007.
27. Закон України “Про охорону праці” // Відомості Верховної Ради України. – 1992.
28. ПУЕ:2017 Правила улаштування електроустановок.
29. НПАОП 40.1-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Від 09.01.1998 Наказ № 4 Держнаглядохоронпраці України.