

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ  
Факультет інженерії  
Кафедра електричної інженерії**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до кваліфікаційної магістерської роботи  
освітньо-кваліфікаційного рівня магістр

галузі знань 14 електрична інженерія

зі спеціальності 141 електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

**на тему СТВОРЕННЯ ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ПАРАМЕТРІВ  
ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА**

Виконав: студент групи ЕЕ-21дм  
Любимий М.С. \_\_\_\_\_

Керівник  
доц. Філімоненко Н. М. \_\_\_\_\_

Завідувач кафедри  
доц. Руднев Є. С. \_\_\_\_\_

Київ

2022 р.

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії  
Кафедра електричної інженерії  
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
Напрямок підготовки 14 «Електрична інженерія»  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри  
доц. Руднєв Є.С.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 року

**З А В Д А Н Н Я**  
НА МАГІСТЕРСЬКИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

Любимому Микиті Сергійовичу

1. Тема **СТВОРЕННЯ ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА**

Специфікація Розробка діагностичної моделі обмотки трансформатора.

Керівник проекту Філімоненко Ніна Миколаївна, доц., к т н

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу "12" жовтня 2022 року  
27/15.23-С

2. Строк подання студентом проекту 20 листопада 2022 р.

3. Вихідні дані до проекту Вихідні данні визначені в переліку питань, що підлягають розробці в магістерській роботі

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

1. Огляд літератури з питань, що розглядаються у магістерської роботи

2. Вибір методу побудови діагностичної моделі і параметрів для оцінки стану обмоток трансформатора 3. Вимір і допустимі рівні відхилень контрольованих параметрів 4. Розробка діагностичної моделі обмотки трансформатора. 5. Практичне використання методу оцінки стану обмоток трансформатора.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація з основними схемами, кресленнями, таблицями, що представляють зміст роботи.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 –5	доц. Філімоненко Н.М.		

7. Дата видачі завдання 01 жовтня 2022

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерського проекту	Строк виконання етапів	Примітки
1	ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПИТАНЬ, ЩО РОЗГЛЯДАЮТЬСЯ У МАГІСТЕРСЬКІЙ РОБОТІ	01.10-30.10.2022	
2.	ВИБІР МЕТОДУ ПОБУДОВИ ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА	30.10-10.11.2022	
3.	ВИМІР І ДОПУСТИМІ РІВНІ ВІДХИЛЕНЬ КОНТРОЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ	05.11-20.11.2022	
4.	РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА. ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ СТАНУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА.	20.11-25.11.2022	
5.	ВИСНОВКИ	25.11-25.11.2022	

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

Керівник проекту \_\_\_\_\_  
( підпис )

**Любимий М.С.**  
(прізвище та ініціали)

**доц. Філімоненко Н. М.**  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему «Створення діагностичної моделі та параметрів для оцінки стану обмоток трансформатора» містить 80 сторінок, 16 таблиць, 25 рисунків, 25 одиницю списку літературних джерел.

Ключові слова: ВІДМОВА, КОНТРОЛЬОВАНІ ПАРАМЕТРИ, ДІАГНОСТИКА, ДІАГНОСТИЧНА МОДЕЛЬ, ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПАРАМЕТРИ ТРАНСФОРМАТОРА

В магістерській роботі досліджується енергетичне устаткування – трансформатор, що функціонує на більшості електростанцій та підстанцій, для якого проводять моніторинг найбільш важливих експлуатаційних параметрів.

В роботі розглянуто методики оцінки та прогнозування стану обмоток трансформатора на основі контрольованих параметрів.

Для досягнення поставленої мети вивчено типові структури й засоби технічного діагностування; виявлені основні несправності трансформатора; визначені контрольовані параметри; розглянуто види випробувань трансформатора залежно від несправностей і підхід до складання діагностичних моделей, також складена модель діагностування стану обмоток трансформатора та розроблені рекомендації до діагностичної моделі.

## **THE SUMMARY**

Master's Work "Creation of diagnostic model and parameters for assessing the condition of transformer windings" contains 80 pages, 16 tables, 25 figures, 25 references.

Keywords: FAILURE, CONTROLLED PARAMETERS, DIAGNOSTICS, DIAGNOSTIC MODEL, TRANSFORMER OPERATING PARAMETERS

The master's Work investigates the power equipment - transformer, which operates at most power plants and substations, for which the most important operational parameters are monitored.

The work considers methods for assessing and predicting the state of transformer windings based on monitored parameters.

To achieve this goal, the typical structures and means of technical diagnostics are studied; the main faults of the transformer are identified; the controlled parameters are determined; the types of transformer tests depending on the faults and the approach to the preparation of diagnostic models are considered; a model for diagnosing the state of the transformer windings is also compiled and recommendations for the diagnostic model are developed.

## ЗМІСТ

<b>СПИСОК СКОРОЧЕНЬ .....</b>	<b>7</b>
<b>ВСТУП .....</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПИТАНЬ, ЩО РОЗГЛЯДАЮТЬСЯ У МАГІСТЕРСЬКІЙ РОБОТІ .....</b>	<b>10</b>
<b>РОЗДІЛ 2 ВИБІР МЕТОДУ ПОБУДОВИ ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА.....</b>	<b>33</b>
2.1. Аналіз несправностей обмоток і побудова схеми причинно- наслідкових зв'язків .....	33
2.2. Вибір і характеристика контрольованих параметрів .....	38
<b>РОЗДІЛ 3 ВИМІР І ДОПУСТИМИ РІВНІ ВІДХИЛЕНЬ КОНТРОЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ .....</b>	<b>42</b>
<b>РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА.....</b>	<b>52</b>
4.1. Методика оцінки стану обмоток.....	52
4.2. Розробка блок-схеми етапів діагностування .....	53
4.3 Побудова орієнтованого графа .....	59
<b>РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ СТАНУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА.....</b>	<b>62</b>
5.1. Обробка результатів вимірних параметрів і постановка діагнозу .....	62
5.2. Розробка рекомендацій по застосуванню методу .....	69
5.3. Аналіз вимог нормативних документів до "стану обмоток" трансформаторів.....	70
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>80</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>81</b>

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

- ВН – вища напруга;  
ДМ – діагностична модель;  
КЗ – коротке замикання;  
НН – нижча напруга;  
ОД – об'єкт діагностування;  
ПУЕ – правила облаштування електроустановок;  
РПН – регулювання під навантаженням;  
СД – система діагностування;  
СО – структурна одиниця;  
СН – середня напруга;  
СТД – засоби технічного діагностування;  
ТР – трансформатор;  
ТЗД – технічні засоби діагностування;  
ХХ – холостий хід;  
ЛО – людина-оператор;  
ЧР – частотні розряди;  
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;  
ЕУ – електроустаткування;  
ЕТС – електротехнічні системи

## ВСТУП

Питання визначення стану трансформаторів з кожним днем стає все більш актуальним і прямо пропорційним динаміці зношення парку устаткування, що знаходиться в експлуатації. Нині біля 60% діючого устаткування відпрацювало свій експлуатаційний термін, і вимагає заміни. 40% трансформаторного устаткування має середній вік від 18 років і вимагає проведення капітального ремонту. Крім того, під час проведення військових дій багато електрообладнання пошкоджене та виведене з ладу. Негайна, повна оцінка стану трансформатора дає можливість вирішувати питання продовження його експлуатації, проведення ремонту або повної заміни. Проведення діагностики дозволяє уникнути не лише зайвих фінансових витрат, але і витрат, які пов'язані з аварійним відключенням електропостачання.

**Актуальність теми** обумовлена тим, що для продовження терміну життя трансформатора, а також, його подальшої експлуатації потрібне точне та своєчасне діагностування, тобто визначення технічного стану.

Технічна діагностика як галузь знань, займається теорією, методами та засобами виявлення і пошуку дефектів, під якими слідє розуміти будь-яке відхилення характеристик об'єкту від заданих. Встановлення невідповідності параметрів і характеристик об'єкту – одне із завдань діагностування.

**Об'єктом дослідження** є сучасні складні електротехнічні системи (ЕТС).

**Предметом дослідження** є процес контролю надійності, безвідмовності і безпеки експлуатації складних електротехнічних систем.

**Мета роботи:** розробка методики оцінювання стану обмоток силових трансформаторів на основі дослідження їх параметрів.

**Задачі дослідження:**



- літературний огляд з теми побудови діагностичних моделей;
- аналіз причин втрати працездатності трансформатора;
- вибір контрольованих параметрів діагностичної моделі;
- обробка вимірів параметрів;
- визначення залежності між параметрами і типом дефекту;
- вибір методу побудови діагностичної моделі;
- створення граф-моделі для обмоток силових ТР.

**Методи дослідження:** методи розрахунку електричних ланцюгів, порівняльний аналіз, методи математичної статистики моделювання з використанням графів – граф-модель.

Публікації під час навчання: ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «Майбутній науковець 2022»: публікація тез «ВИМІР І ДОПУСТИМИ РІВНІ ВІДХИЛЕНЬ КОНТРОЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРА».

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПИТАНЬ, ЩО РОЗГЛЯДАЮТЬСЯ У МАГІСТЕРСЬКІЙ РОБОТІ

Одним з найбільш поширених електротехнічних пристроїв є трансформатор (ТР), який є електромагнітним пристроєм, з двома, а також більше, індуктивно-пов'язаними обмотками і призначене для перетворення однієї (первинною) системи змінного струму в іншу (вторинну) систему змінного струму.

Трансформатори знаходять широке застосування в енергетиці, вимірювальній техніці й побуті.

Трансформатори класифікуються за наступними ознаками:

- за видом охолодження – з повітряним (сухі трансформатори) і масляним (масляні трансформатори) охолодженням;
- за кількістю фаз – однофазні, трифазні і багатофазні;
- по формі магнітопроводу – стержневі, броньові, бронестрижневі;
- за кількістю обмоток – одно-, двохобмоткові і багатообмоткові;

Обмотки трансформаторів розрізняються взаємним розташуванням на осерді / осердях, напрямом і способом намотування, за кількістю витків, класом напруги, схемою з'єднання кінців обмоток між собою [8, 10].

- за величиною вихідної напруги – що підвищують, знижують, розділові.

Силкові трансформатори застосовуються в системах передачі і розподілу електроенергії, для установок із статичними перетворювачами при перетворенні змінного струму в постійний (випрямлячі) або постійний в

змінний (інвертори), а також для отримання необхідної напруги в ланцюгах управління електроприводами [10, 11].

У магістерській роботі об'єктом діагностування обраний силовий трифазний трьохобмотковий трансформатор (Рис.1.1). Трансформатор, що має три основні гальванічно-непов'язані обмотки. До первинної обмотки підводиться електрична енергія, а вторинні обмотки зв'язанні із споживачем.

Даний силовий стержневий трансформатор має трифазні обмотки – вищої (ВН), середньої (СН) і нижчої (НН) напруги, в кожен з яких входять по три фазні обмотки, або фази. Таким чином, трифазний трансформатор має дев'ять незалежних фазних обмоток і 18 виведень з відповідними затисками, причому початкові виведення фаз обмотки вищої напруги означають буквами А, В, С, кінцеві виведення Х, Y, Z, а для аналогічних виведень фаз обмотки нижчої напруги застосовують такі позначення: а, b, с, х, у, z.

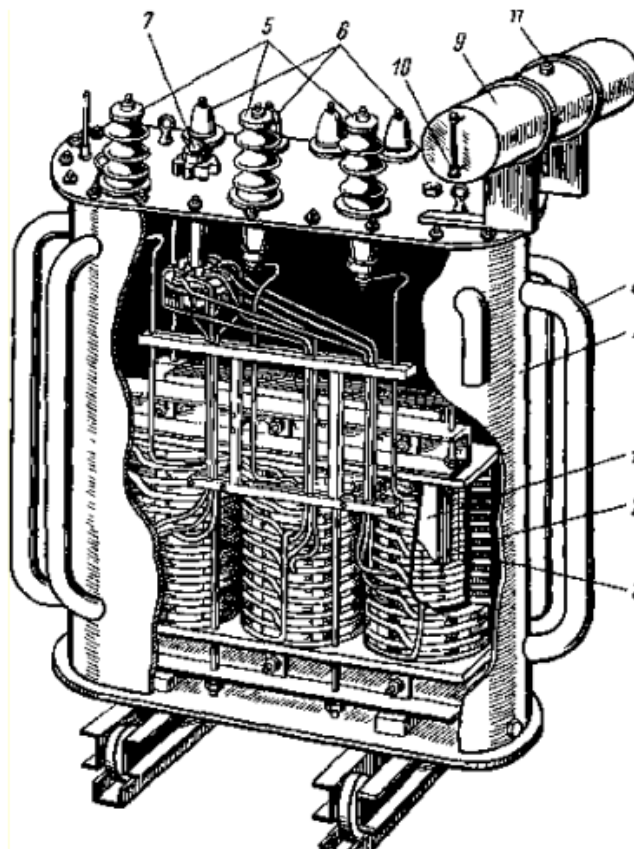


Рис.1.1 – Трифазний трансформатор

Окрім обмоток основною функціональною частиною трансформатора є магнітопровід, призначений для проходження магнітного потоку.

По роду ізоляції і охолодження трансформатори підрозділяються на масляні, з негорючим заповненням і сухим.

Необхідність визначення стану трансформаторного устаткування з'явилася при створенні перших трансформаторів закритого типу (масляних трансформаторів). Для того, щоб оглянути який-небудь внутрішній вузол, потрібно було зробити відключення, злити олію, виконати контрольні виміри і потім знову залити олію. Усе це необхідно виконувати з дотриманням численних правил, інакше перед включенням знадобиться ще і сушка трансформатора. Коли почалася масова експлуатація масляних трансформаторів, ремонти з розкриттям пропонувалося робити як можна частіше. Пов'язані з цим незручності і труднощі змусили шукати і розвивати такі методи контролю стани трансформатора, які не вимагали б розкриття і зливу олії. До того ж було помічено, що чим частіше без особливої на те нужди трансформатор розкривається, тим вірогіднішим стає його ушкодження. Під діагностикою трансформатора розуміється система заходів, що проводяться за допомогою різних технічних засобів, перевірки і оцінки стану трансформаторів. Можуть використовуватися прості візуальні, механічні, фізичні, хімічні і інші способи контролю стану, а також їх комбінації. Наприклад, зволоження трансформаторної олії може бути визначене по зміні кольору індикаторного силікагелю або шляхом хімічного аналізу. Наявність часткових електричних зарядів в олії або твердій ізоляції може бути визначена безпосереднім виміром за допомогою індикатора часткових розрядів або при хроматографічному аналізі розчинених в олії газів. Зазвичай для практичних цілей з усіх можливих способів контролю того або іншого параметра вибирають простий, і лише для ретельнішої перевірки, уточнення місця і характеру дефекту застосовують складніші способи.

Контроль стану трансформатора носить комплексний характер. Зазвичай він починається ще на стадії виготовлення. Саме тоді перевіряють якість ізоляційних і активних матеріалів, окремих деталей і вузлів, якість складання. Готовий трансформатор піддають комплексній перевірці на випробувальній станції заводу-виробника, оснащений усіма необхідними засобами діагностики. При транспортуванні трансформатора здійснюють контроль його герметичності, а в деяких випадках і контроль за дією механічних зусиль. Прибулий трансформатор також вимагає контролю його стану, як при зберіганні, так і в процесі монтажу відповідно до керівних технічних матеріалів "Трансформатори силові. Транспортування, розвантаження, монтаж і введення в експлуатацію". Після закінчення монтажу перед введенням в експлуатацію з метою діагностики стану трансформатор випробовується в об'ємі, передбаченому "Правилами облаштувань електроустановок"(ПУЕ).

Проте найбільший об'єм робіт по перевірці стану трансформаторів здійснюється в процесі експлуатації. Надалі розглянемо вживані способи контролю стану обмоток трансформатора і особливо зупинимось на тому, як за отриманими результатами оцінити стан трансформатора і зробити висновок про можливість його подальшої експлуатації.

Основними експлуатаційними вимогами є електрична і механічна міцність і нагрівостійкість обмоток, так і інших частин і усього трансформатора в цілому. Ізоляція обмоток і інших частин трансформатора повинна витримувати без ушкоджень комутаційні і атмосферні перенапруження, які можуть виникнути в мережі, де трансформатор працюватиме. Механічна міцність обмоток повинна гарантувати їх від механічних деформацій і ушкоджень при струмах КЗ, що багаторазово перевищують номінальний робочий струм трансформатора. Нагрів обмоток і інших частин від втрат, що виникають в трансформаторі при нормальній роботі і КЗ обмеженої тривалості, не повинен приводити ізоляцію обмоток і інших частин, а також олію трансформатора до теплового зносу або

руйнування в терміни коротші, ніж звичайний термін служби трансформатора (20 – 25 років). Загальні експлуатаційні вимоги, що пред'являються до трансформаторів і їх обмоткам, регламентовані відповідними стандартами ДСТУ на силові трансформатори загального призначення, на різні спеціальні трансформатори, на електричні випробування ізоляції трансформаторів. Практично електрична міцність ізоляції обмоток досягається правильно розробленою конструкцією, правильним вибором ізоляційних проміжків і ізоляційних матеріалів і прогресивною технологією обробки ізоляції. Вимога механічної міцності обмотки задовольняється шляхом ретельного розрахунку поля розсіяння, тобто правильного вибору типу і конструкції обмотки і розташування її витків і котушок з таким розрахунком, щоб механічні сили, що виникають в цій обмотці, були по можливості меншими, а механічна стійкість можливо більшою [4, 5, 6].

Основні елементи трансформатора і причини відмов приведені на рисунку 1.2. Рисунок 1.2 є схемою причинно-наслідкових зв'язків елементів конструкції трансформатора і його діагностичних ознак.

На основі експлуатаційних даних можна виділити наступні причини втрати працездатності ТР:

- підвищений нагрів трансформатора, викликаний нагрівом металевих частин, вихровими потоками, перевантаженнями і перенасиченням магнітопроводу, їх старінням;
  - порушення ізоляції між елементами конструкції;
  - зволоження ізоляції;
  - наявність газу в олії в процесі газовиділення в місцях підвищеного нагріву або підвищеної напруженості електричного поля (часткові розряди);
- старіння ізоляції під дією каталізаторів, кисню і електричного поля;
- часткові деформації обмоток при КЗ;

- виткові замикання обмоток;
- зволоження введень;
- часткові розряди в ізоляцію.

В результаті багаторічної експлуатації трансформаторів встановлені типові види ушкоджень основних елементів трансформатора. Статистика показує, що дві третини ушкоджень виникають в результаті незадовільного ремонту, монтажу і експлуатації, а одна третина – в наслідок заводських дефектів.

Для магнітопроводу за наявності дефекту в листовій ізоляції можливе перегрівання, що викликається вихровими струмами. У разі конденсації вологи на поверхні олії вона потрапляє на верхнє ярмо, проникає між пластинами активної сталі у вигляді водо-масляної емульсії, руйнує між листову ізоляцію і викликає корозію сталі. З цих причин погіршується стан олії, тобто знижується температура спалаху, підвищується кислотність і збільшуються втрати холостого ходу.

Найбільш характерним видом ушкоджень в обмотках трансформатора є замикання між витками. Причиною його може бути руйнування ізоляції із-за старіння внаслідок її природного зносу або із-за тривалих перевантажень трансформатора при недостатньому охолодженні обмоток. Порушення ізоляції витків може статися так само внаслідок механічних ушкоджень при КЗ. Ознаками замикання між витками є підвищений нагрів і відмінність в опорах фаз постійному струму.

Перераховані ушкодження викликають розкладання олії і виділення газу, що призводить до спрацьовування газового захисту. Так само про характер ушкодження можна судити за результатами хімічного аналізу газу.

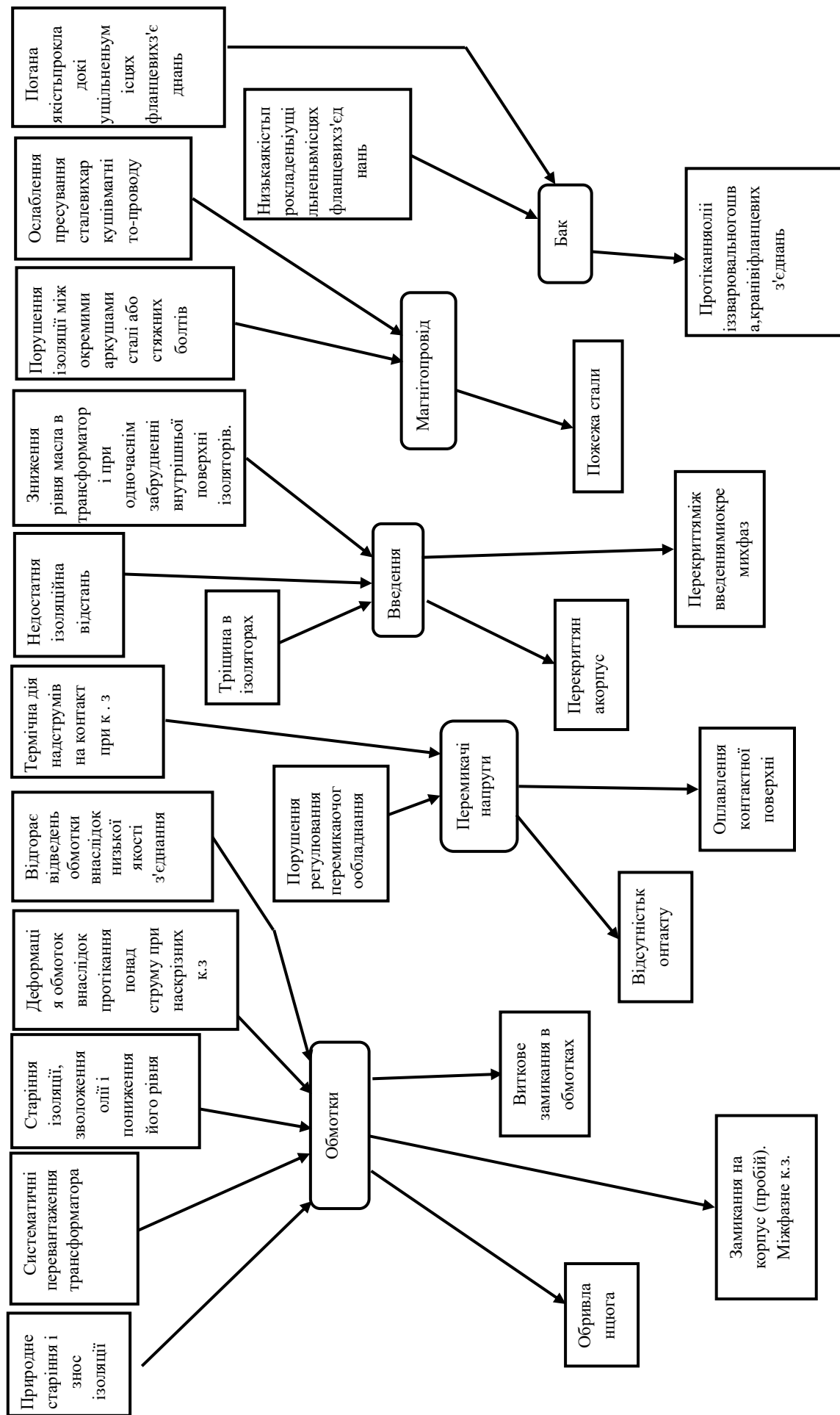


Рисунок 1.2 - Схема причин відмов



Один з найважливіших методів оцінки стану трансформатора хроматографічний метод аналізу, який оцінює зміст розчинених в олії газів встановлені зв'язки між газами, що виділяються в олію, і причинами їх появи.

Наприклад, виділення водню ( $H_2$ ) свідчить об наявність в ТР іскрових і дугових часткових розрядів; ацетилену ( $C_2H_2$ ) – про наявність електричної дуги і іскріння; етилену ( $C_2H_4$ ) – про місцеві нагриви олії; метану ( $CH_4$ ) – про місцеві нагриви ізоляції або про супроводжуючих нагрів часткових розрядах; етану ( $C_2H_6$ ) – про місцеві нагриви олії і ізоляції в межах 573...673К; оксиду і діоксиду вуглецю ( $CO$ ,  $CO_2$ ) – про старіння і зволоження олії і твердої ізоляції.

У магістерській роботі розглядаються несправності і контрольовані параметри обмоток.

Оцінка стану обмоток проводиться методами технічного діагностування.

Процес діагностування зазвичай починається після виявлення відхилень в поведінці об'єкту під час проведення штатних або нештатних перевірок його стану. Про наявність такого відхилення свідчить порівняння поточних значень контрольованих параметрів з їх еталонними значеннями, які встановлюють технічною документацією, за результатами приймальних випробувань або на основі статистичного аналізу даних.

Діагностування може здійснюватися різними методами, що включають сукупність операцій і дій, що призводять до укладення про стан об'єкту [2, 3, 14].

В ході технічного діагностування вирішуються завдання контролю працездатності об'єкту, пошуку місця і причин несправності і прогнозування зміни його стану.

Для оцінки технічного стану об'єкту потрібні критерії, які в основному є параметрами об'єкту. Критерії пов'язані з несправностями об'єкту. Основні і додаткові параметри повинні відповідати вимогам, обумовленим технічною

документацією на об'єкт. Якщо вони відповідають технічному завданню і технічним умовам, то об'єкт функціонує штатно.

Діагностування може здійснюватися різними методами, що включають сукупність операцій і дій, що призводять до укладення про стан об'єкту [2, 3, 14].

В ході технічного діагностування вирішуються завдання контролю працездатності об'єкту, пошуку місця і причин несправності і прогнозування зміни його стану.

Для оцінки технічного стану об'єкту потрібні критерії, які в основному є параметрами об'єкту. Критерії пов'язані з несправностями об'єкту. Основні і додаткові параметри повинні відповідати вимогам, обумовленим технічною документацією на об'єкт. Якщо вони відповідають технічному завданню і технічним умовам, то об'єкт функціонує штатно.

Діагностування устаткування може здійснюватися різними способами. Системи діагностування.

У загальному вигляді система діагностування (СД) включає три основні елементи: об'єкт діагностування (ОД), засоби технічного діагностування (ЗТД) і людини-оператора (ЛО) показано на рис.1.3 [2, 3, 16].

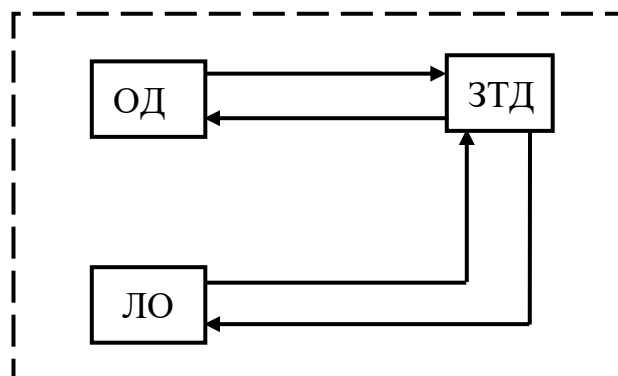


Рис. 1.3 – Схема діагностування

Об'єкти діагностування можуть підрозділятися на безперервні, стани яких можна описати безперервно в часі диференціальними або алгебраїчними рівняннями, дискретні і гібридні, такі, що є комбінацією безперервних і гібридних пристроїв.

Об'єкт повинен мати діагностичне забезпечення, що включає діагностичні ознаки несправностей, контрольовані параметри, алгоритми і засоби виявлення ушкоджень.

Оператор (ЧО) може різною мірою впливати на процес діагностування, звідси система діагностування може бути ручною, автоматичною і автоматизованою.

Оператор, як будь-який елемент системи, має такий показник як надійність, яка може змінюватися в широкому діапазоні. Робота оператора залежить від належних йому властивостей і органів (зір, слух, центральна нервова система, пам'ять, мова, органи руху), а також від умов, в яких він опинився (зовнішні чинники).

Системи технічного діагностування включають програмні засоби, ремонтно-експлуатаційну документацію і технічні або апаратні засоби.

Програмні засоби, це пакети програм і алгоритмів.

Ремонтно-експлуатаційна документація складається з таблиць дефектів і ремонтних схем, в яких зображені види сигналів в різних контрольних точках, і приведено структурне розбиття системи на функціональні вузли [2, 3, 16].

Технічні засоби діагностування (ТЗД) – це прилад або система, за допомогою яких здійснюється сам процес діагностування.

Побудова ТЗД багато в чому визначається завданнями, які вирішуються в процесі діагностування: контроль працездатності, пошук причини і місця несправності і прогнозування подальшого стану.

ТЗД підрозділяються на активні і пасивні; вбудовані і зовнішні; за способом обробки інформації: послідовної, паралельної і змішаної дії; універсальні і спеціалізовані.

Розрізняють два види діагностування: робоче і тестове.

Діагностична модель, розроблена в магістерській роботі, призначена для робочого діагностування

Типові структурні схеми систем робочого діагностування представлені на рисунках 1.4 і 1.5. На рисунку 1.4, діагностування здійснюється для об'єкту що безперервно функціонує.

ТЗД виконує пасивну роль в діагностуванні: здійснюють прийом і переробку отриманої інформації від об'єкту. Оператор не має прямого контакту з об'єктом діагностування.

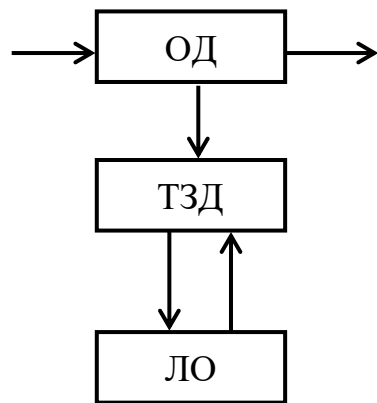


Рис. 1.4 – Система робочого  
діагностування

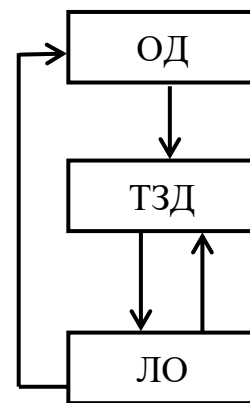


Рис.1.5 – Система робочого  
діагностування

Об'єкт діагностування отримує робочі сигнали, безперервно ведеться їх обробка. ТЗД, які грають пасивну роль, переробляють інформацію і

передають операторові, який не може впливати безпосередньо на об'єкт діагностування, наприклад із-за великої віддаленості ОД від ЛО. Це діагностування найчастіше в енергетиці.

Роботу таких об'єктів діагностування неможливо переривати.

Друга структурна схема робочого діагностування, рис.1.5, характерна для ОД, що діагностуються в спеціальному режимі, в інтервалі часу між використанням об'єкту за призначенням.

Оператор має доступ для включення об'єкту діагностування і відповідних перемикачів при діагностуванні. У такій структурі об'єкт діагностування не бере участь в робочому процесі.

При тестовому діагностуванні структура СД представлена схемами на рисунках 1.6 і 1.7, де ТЗД-1 – активні засоби, генератори тестових дій, які за заданою програмою виробляють спеціальні сигнали-тести, що поступають в ОД і що викликають його реакцію. Тестові дії можуть повторювати робочі сигнали, що поступають зазвичай в ОД при його використанні, або бути особливими, призначеними тільки для діагностування.

ТЗД-2 – пасивні засоби, які сприймають і переробляють інформацію з об'єкту.

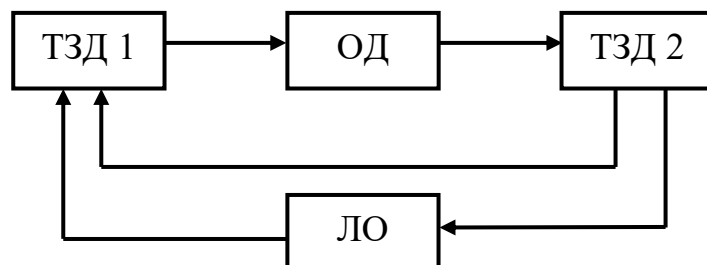


Рис. 1.6 – Схема тестового діагностування без зв'язку ОД і ЧО

На рисунку 1.6 ТЗД-1 і ТЗД-2 пов'язані між собою, що дозволяє погоджувати режими їх роботи: час включення і виключення, параметри тестових сигналів, рівні схем порівняння. ЧО не має контакту з ОД, його функції зводяться до управління ТЗД 1 і до сприйняття з ТЗД 2 інформація про стан об'єкту того, що допускає переклад в спеціальний режим діагностування, але розташованого у важко доступному місці.

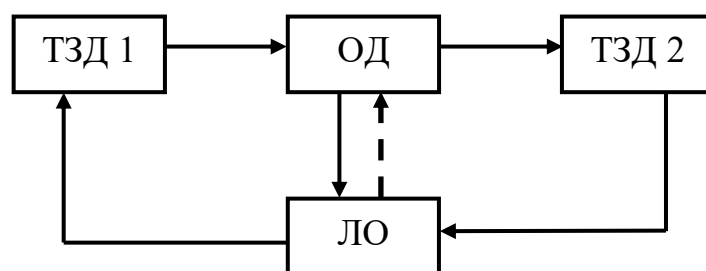
На рисунку 1.7 приведена ще одна структура СД при тестовому діагностуванні устаткування.

Оператор може управляти ОД(суцільна лінія). В цьому випадку, до ОД є вільний доступ. Можливість доступу до ОД дозволяє встановити зв'язок між ТЗД 1 і ТЗД 2.

Оператор також може безпосередньо знімати інформацію про стан ОД, що підвищує достовірність діагнозу і спрощує засоби діагностування.

Пасивні ТЗД виконують аналіз інформації про стан устаткування, для чого сприймають, обробляють і оцінюють діагностичні ознаки [3, 16].

Вибір діагностичних ознак і параметрів трансформатора можна здійснити, побудувавши схему причинно-наслідкових зв'язків (Рис.1.8) і таблицю несправностей, таблиця 1.



**Рис. 1.7 – Схема тестового діагностування з додатковим контролем**

**ЛО**

Оператор може управляти ОД(суцільна лінія). В цьому випадку, до ОД є вільний доступ. Можливість доступу до ОД дозволяє встановити зв'язок між ТЗД 1 і ТЗД 2.

Оператор також може безпосередньо знімати інформацію про стан ОД, що підвищує достовірність діагнозу і спрощує засоби діагностування.

Пасивні ТЗД виконують аналіз інформації про стан устаткування, для чого сприймають, обробляють і оцінюють діагностичні ознаки [3, 16].

Вибір діагностичних ознак і параметрів трансформатора можна здійснити, побудувавши схему причинно-наслідкових зв'язків (рис.1.8) і таблицю несправностей, табл. 1.1.

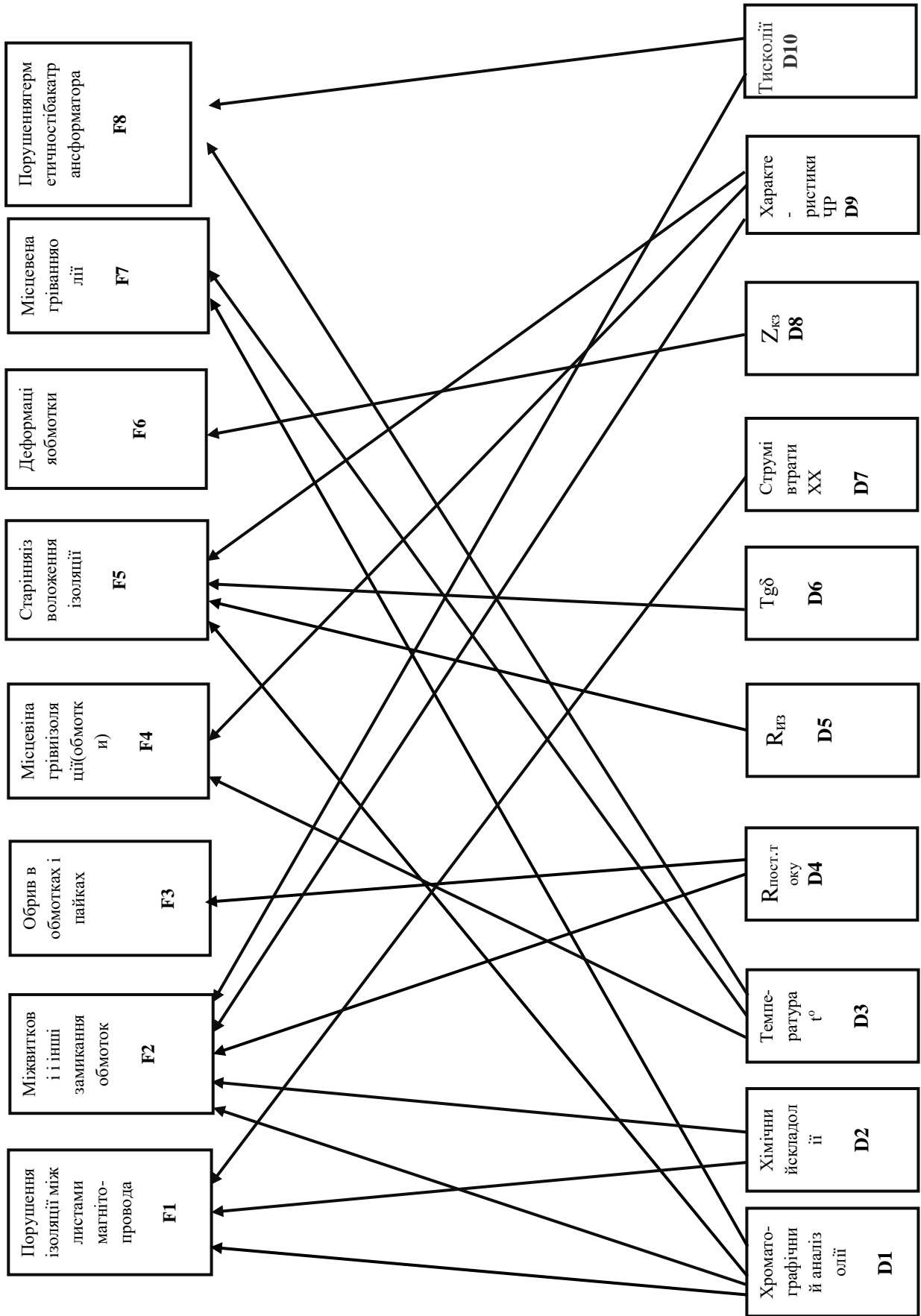


Рисунок 1.8 – Зв'язок можливих несправностей і контрольованих параметрів



Таблиця 1.1 – Таблиця несправностей

Трансформатор	Контрольований параметр									
	Хромато- графич- ний аналіз D1	Хіміч- ний склад олії D2	t <sub>0</sub> D3	Рлост. струму D4	Rіz D5	Tgδ D6	Струм і втрати XX D7	Zкз D8	Част- кові розряди D9	Тиск олії D10
Несправність										
Порушення між листової ізоляції магнітопроводу F1	*	*	*			*	*			
Міжвиткові замикання в обмотках F2	*	*	*	*	*	*		*	*	*
Обрив в обмотках і пайках F3	*			*						
Місцеві нагріву обмотки F4	*		*					*		
Старіння і зволоження ізоляції F5	*				*	*		*	*	
Деформація обмотки F6								*		
Місцеві нагріву олії F7	*		*							
(*) – вказує діагностична ознака або контрольований параметр для несправності цього виду.										

Діагностування проводиться на усіх етапах життєвого циклу ЭО: при проектуванні, виготовленні і експлуатації. При проектуванні вирішуються питання організації СД, розробки діагностичного забезпечення і оцінки ефективності СД. При виготовленні об'єкту проводиться монтаж, наладка, контроль і пошук несправності. Рішення завдань технічної діагностики доцільно починати в процесі проектування об'єкту. Виходячи з умов використання і експлуатації проектного об'єкту, розробляють діагностичні моделі, ефективність яких значною мірою залежить від міри пристосованості конструкції об'єкту до технічного діагностування, а також вживаних методів і засобів технічної діагностики.

Оптимальні рішення завдань технічної діагностики складних об'єктів можуть бути отримані тільки в результаті аналізу безлічі його станів, в яких ці об'єкти можуть знаходитися в період експлуатації. У зв'язку з цим потрібно спеціальні методи для теоретичного аналізу безлічі можливих станів складних технічних об'єктів. Подібні методи ґрунтуються на дослідженні аналітичних описів або графічно–аналітичних представлень основних властивостей технічних об'єктів, як об'єктів діагностування, які можуть бути названі їх діагностичними моделями. Їх класифікація представлена на рис. 1.9

Дискретні моделі визначають стан об'єкту тільки для послідовності дискретних значень незалежної змінної, наприклад, часу, але без урахування характеру протікання процесу в проміжках

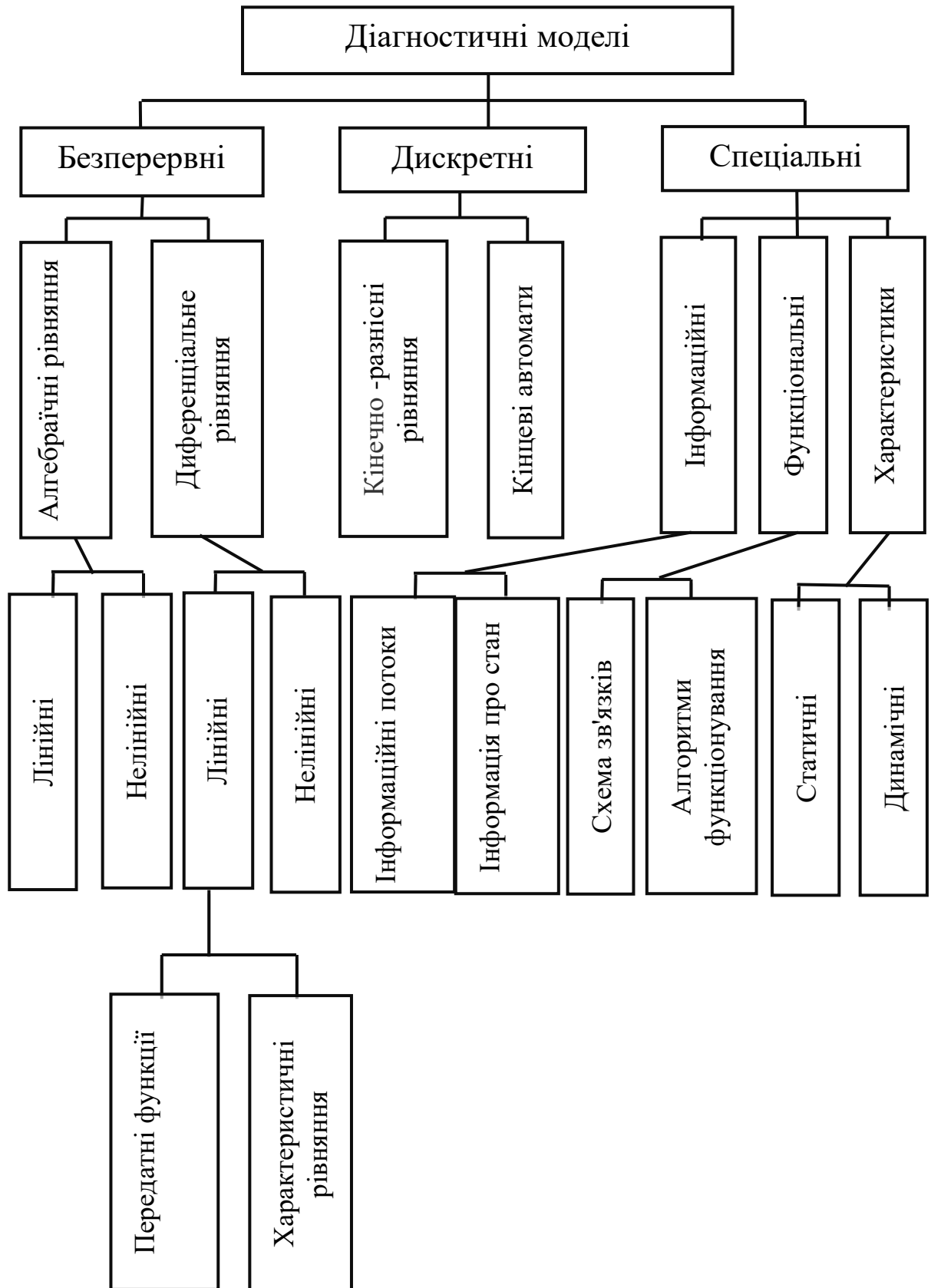


Рис. 1.9 – Класифікація діагностичних моделей

Безперервні діагностичні моделі (ДМ) представляють стан ОД безперервно таким, що змінюється в часі.

Безперервні моделі включають:

- алгебраїчні рівняння;
- диференційні рівняння;
- схеми заміщення;
- передатні функції;
- характеристичні рівняння.

Спеціальні ДМ можна підрозділити на інформаційні і функціональні.

Безперервні моделі складають найбільшу групу, оскільки основні процеси змін якості технічних об'єктів носять безперервний характер. Аналітичні моделі широко використовуються для опису об'єктів будь-яких типів, наприклад, механічних, електричних, електромеханічних або пневмогідравлічних. При цьому несправності об'єкту моделюються як неприпустимі зміни значень параметрів діагностування. Проте великий клас технічних об'єктів не допускає використання аналітичних методів моделювання по своїй структурі, або ж створення повної аналітичної моделі буває скрутне через відсутність відповідної інформації. В цьому випадку для вирішення завдання розрізнення дефектів об'єктів пропонується використати топологічну модель.

Топологічна модель задається в просторі параметрів спільним представленням сукупності фізичних властивостей об'єкту і його топології у вигляді графа або матриці з вказівкою причинно-наслідкових зв'язків між фізичними властивостями.

Якщо модель представляється у вигляді графа, то вершинам відповідають параметри об'єкту (вихідні і вхідні, основні і допоміжні, структурні параметри), а дугам – відомі аналітичні або статистичні залежності і якісні співвідношення між параметрами. Тому так важливо виявити діагностичні ознаки і параметри що дозволяють знайти дефект в

об'єкті. Сукупність діагностичних параметрів ефективна для діагностування, якщо вони задовольняють наступним вимогам:

- опис дефектів;
- чутливість до відхилення значень параметрів;
- мінералізація складу;
- доступність контролю і виміру;
- мінімум вартості і часу контролю усіх параметрів;
- роздільність при розпізнаванні окремих дефектів.

Разом з топологічними моделями широке поширення при рішенні завдань технічної діагностики отримали двозначні логічні моделі, що охоплюють великий клас реальних технічних об'єктів, представлених блокової функціональної або структурної схемами. При побудові логічної моделі кожному функціональному елементу ставиться у відповідність сукупність логічних блоків так, щоб вихід кожного логічного блоку характеризувався тільки одним параметром, і при цьому залишаються тільки ті входи, які формують даний вихід. Застосування логічної моделі ґрунтується на застосуванні допускових способів діагностування, що характеризуються тим, що укладення про правильність функціонування об'єкту робиться на підставі якісної оцінки деякої сукупності діагностичних параметрів. Якщо значення сигналу знаходиться в допустимих межах, то значення цього вихідного сигналу покладається рівним 1, інакше – 0.

Спосіб побудови діагностичних моделей(ДМ) багато в чому визначається видом моделі. У зв'язку з великою різноманітністю ДМ електроустаткування існує безліч різних способів їх побудови, включаючи наступні :

- 1) спрощення ПФ;
- 2) усікання характеристичного рівняння;
- 3) представлення у вигляді матриці;
- 4) перехід від структурної схеми до орієнтованого графа;
- 5) перетворення структурної(функціональною) схеми.

Способи можна згрупувати, враховуючи їх спрямованість і особливості.

У роботі в якості моделі діагностування доцільно вибрати граф – модель у вигляді логічного дерева, оскільки вершини графа представляють можливі стани об'єкту, викликані нештатними ситуаціями, а дуги представляють відповідні причинно-наслідкові зв'язки.

Орієнтовані графи дають одно з найбільш наочних уявлень про об'єкт діагностування. Якщо об'єкт діагностування можна описати системою лінійних рівнянь алгебри, то його можна представити функцією-діаграмою проходження сигналів на основі функціональних залежностей між окремими блоками. У основі будь-якої функціональної схеми закладена логічна модель, за допомогою якої ведеться побудова графів [5, 19].

Діагностична модель повинна відбивати сукупність операцій, що виконуються устаткуванням і його окремими частинами або структурними одиницями(СО) в процесі функціонування. Такі моделі розглядаються як схеми зв'язків між окремими СО, діаграми проходження сигналів(орієнтовані графи) або алгоритми функціонування.

Діагностична модель у вигляді схеми зв'язків є об'єднанням СО, багато входів, що мають, і тільки декілька виходів, як представлено на рис. 1.10.

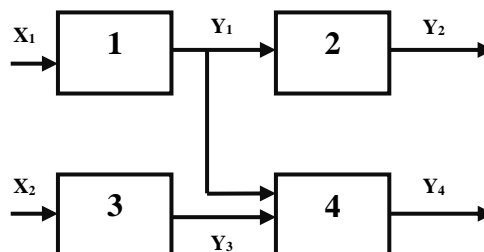


Рис. 1.10 – Діагностична модель у вигляді схеми зв'язків

Стан кожною СО описується двома станами: 0 – непрацездатна, 1 – працездатна. Стан кожною СО визначається відповідною перевіркою при поданні на об'єкт діагностування усіх вхідних дій.

Один із способів побудови ДМ – наприклад, перетворення структурної(функціональної) схеми. Якщо визначена сукупність окремих частин ОД, з яких він полягатиме, і зв'язку між ними (Рис.1.11 а), то ДМ може бути представлена у вигляді схеми зв'язків СО (Рис.1.11 б).

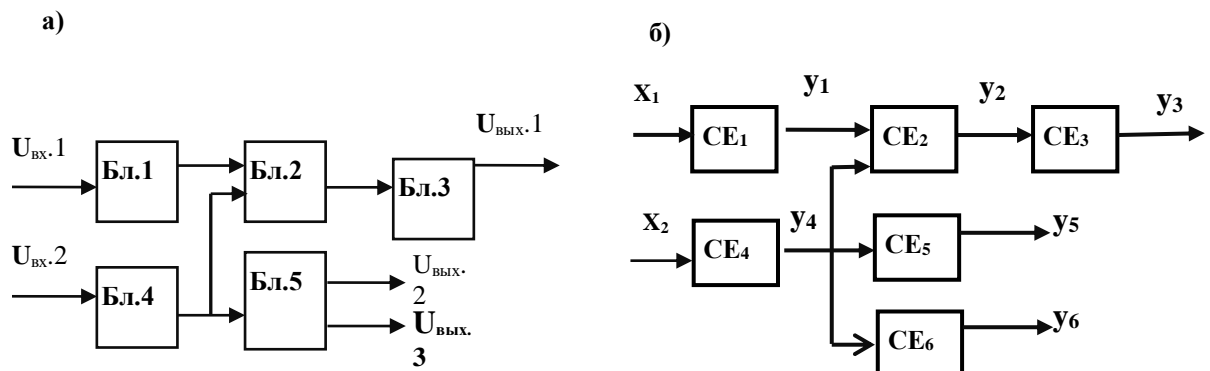


Рис. 1.11 – Діагностична модель побудована шляхом перетворення структурної схеми

Стрілки в моделі (Рис.1.11) показують напрям проходження вхідних  $X_i$  і вихідних  $Y_i$  сигналів в СО. В якості вихідних сигналів можуть розглядатися будь-які параметри, що характеризують зміни в змозі СО. Стан кожною СО оцінюється в двійковій системі по виходах. Якщо вихідний сигнал задовольняє встановленим вимогам, то стан оцінюється 1, інакше – 0. В ході аналізу діагностичної моделі СО, залежно від глибини виявлення дефекту, можуть дробитися на дрібніші або об'єднуватися у більші. При цьому необхідно дотримуватися умови, щоб у кожноій СО був тільки один вихід [2, 3].

При переході від структурної схеми до орієнтованого графа схему з'єднання блоків можна замінити еквівалентним орієнтованим графом

(рис.1.12). Блоки замінюються вершинами, а зв'язки між блоками – спрямованими гілками зі збереженням напрямку проходження сигналів.

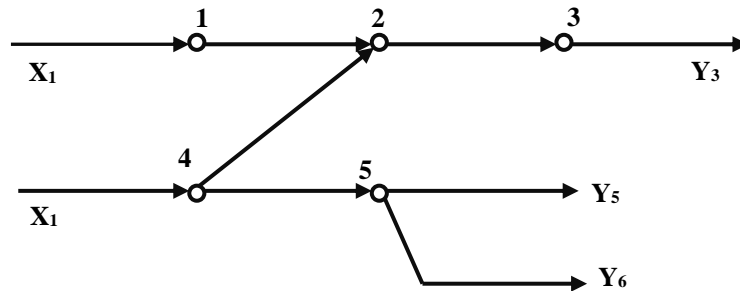


Рис. 1.12 – Орієнтований граф

Графічні методи мають велику наочність і можуть служити як для безпосереднього аналізу, так і для ілюстрації аналітичних методів. Графічні методи корисні для дослідження параметрів і характеристик устаткування. Серед графічних методів особливе місце займають методи, ґрунтовані на теорії орієнтованих або неорієнтованих графів. Особливо зручні при моделюванні орієнтовані графи, оскільки вони дозволяють наочно і послідовно простежити закономірність зміни параметрів.



## РОЗДІЛ 2

### ВИБІР МЕТОДУ ПОБУДОВИ ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ І ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

#### 2.1 Аналіз несправностей обмоток і побудова схеми причинно-наслідкових зв'язків

У електротехнічних установках, а також в енергетичних системах передачі і розподіли електроенергії застосовують силові трансформатори, за допомогою яких змінюють величину змінної напруги і струму. При цьому число фаз, форма кривої напруги (струму) і частота залишаються незмінними [6, 10, 13].

У магістерської роботі розглядається силовий трифазний трьохобмотковий трансформатор класу 110 кВ, з регулюванням напруги під навантаженням(РПН), з системою охолодження виду "масляне охолодження з дуттям і природною циркуляцією олії", призначений для роботи на електричних мережах з глухо-заземленою нейтраллю. Обмотки мають з'єднання зірка-трикутник-трикутник. Клас ізоляції нейтралі рівний 35кВ.

Для діагностування трансформаторів потрібне відповідне забезпечення, яке дозволяє знаючи параметри, провести наступні випробування: перевірку коефіцієнта трансформації і групи з'єднання обмоток; вимір опору обмоток постійному струму; перевірку втрат і напруги короткого замикання і втрат і струму холостого ходу; вимір опору нульової послідовності і гармонійного складу струму холостого ходу; визначення діелектричних параметрів і

випробування електричної міцності ізоляції; перевірка перевищень температури контактів знімних введень і контроль маркування [1, 2, 6, 10, 11,]

Процес діагностування починається після виявлення відхилень в поведінці об'єкту під час проведення запланованих або незапланованих перевірок його стану. Про наявність відхилення свідчить порівняння поточних значень контрольованих параметрів з їх значеннями, які встановлюють на основі досвіду експлуатації, по рекомендаціях виробника, за результатами приймальних випробувань або на основі статистичного аналізу даних.

Значення контрольованих параметрів можуть бути отримані прямим виміром після обробки результатів вимірів [6].

Діагностичні ознаки досліджуваного об'єкту формуються при: зміні контрольованого параметра; відсутності його; зміні режиму роботи.

Для діагностування технічного стану силового трансформатора необхідно вибрати метод діагностування параметри, зміни яких дозволяють судити про наявність несправностей.

Виходячи з існуючих типів діагностичних моделей, в магістерській роботі вибрані спеціальні моделі, які діляться на : інформаційні і функціональні.

Інтерес представляють два основні підходи у визначенні технічного стану обмоток :

- розрахункові методи, які зазвичай автоматизовані, не вимагають вивчення причин що викликали відмови, але вимагають великих масивів інформації;
- експертні методи, основою яких є моделі несправностей і моделі нормального функціонування ОД.

Цим двом методам відповідають діагностичні моделі:

- модель "несправність – діагностичні ознаки", яка дозволяє виявити несправність, але не шукає причину її виникнення;

- модель "дерево причинно-наслідкових зв'язків", яка виявляє головну причину і складає прогноз, подальшого функціонування об'єкту діагностування.

Саме цей метод може представляти інтерес для створення ДМ в магістерській роботі. Підхід до діагностування при використанні моделі зв'язків несправності з її діагностичними ознаками представлений на рис.2.1.

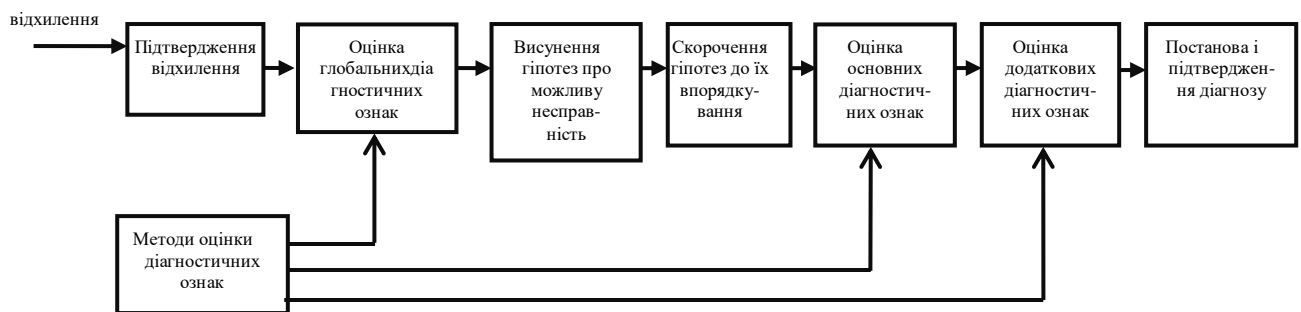


Рис. 2.1 – Модель "несправність - діагностичні ознаки"

При такому моделюванні співвідношення між несправностями і діагностичними ознаками в діагностичній моделі носять асоціативний характер.

Підхід на основі моделі "несправність - діагностичні ознаки" не може бути застосований у разі потреби отримання глибших знань про механізм виникнення і розвитку несправності.

Завданням магістерської дисертації є оцінка технічного стану найбільш важливої функціональної частини трансформатора – обмоток.

Щоб побудувати "дерево причинно-наслідкових зв'язків" необхідно вибрати діагностичні ознаки різних видів дефектів обмоток трансформатора, рис.2.2.

Відповідно до діагностичних ознак дефектів обмоток рис.2.2, вибрані параметри, які традиційно вимірюються в ТР відповідно до нормативної системи випробувань силових трансформаторів.

Кожна несправність і параметр оцінюються по їх критичності, тобто по нанесенню збитку усьому трансформатору і системі, в якій він працює. Оцінка такої критичності може бути проведена у вигляді розрахунку, але в нашому випадку ця оцінка будувалася на статистичних даних і досвіді роботи з цим видом електроустаткування.

Найбільш частим видом ушкоджень в обмотках є виткові замикання. Причиною його може бути як руйнування ізоляції через старіння внаслідок її природного зносу, так і тривалі перевантаження трансформатора при недостатньому і нерівномірному охолодженні обмоток. Порушення ізоляції витків може так само статися при механічних ушкодженнях при КЗ. Ознаками виткових замикань є спрацьовування газового захисту, підвищений нагрів, відмінність в опорах фаз постійному струму.

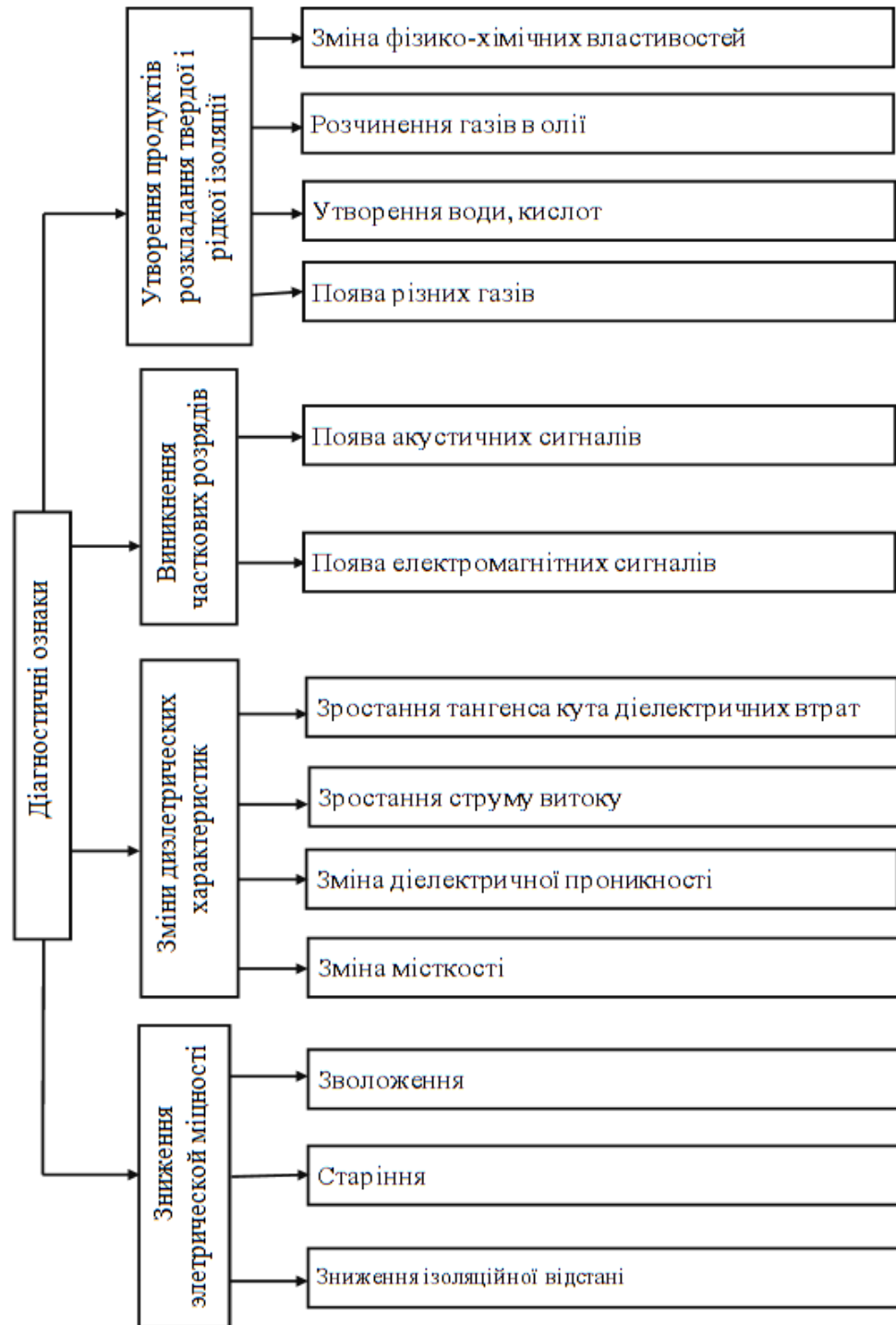


Рис. 2.2 – Діагностичні ознаки різних дефектів обмоток трансформаторів

Для моделі, що розробляється в роботі, вибраний граф. Вершини графа представляють можливі стани трансформатора, викликані нештатними ситуаціями, а дуги є причинно-наслідковими зв'язками.

Оцінка технічного стану трансформатора проводиться між робочими періодами за схемою робочого діагностування.

Нормативна система випробувань силових трансформаторів включає такі виміри:

- тангенс кута діелектричних втрат;
- опір обмоток постійному струму;
- втрати холостого ходу;
- місткість ізоляції обмоток;
- опір ізоляції обмоток(відносно корпусу).

У цій роботі моделлю діагностування вибрана граф – модель у вигляді логічного дерева, так, вершини графа представляють можливі стани об'єкту, викликані нештатними ситуаціями, а дуги представляють відповідні причинно-наслідкові зв'язки.

## **2.2 Вибір і характеристика контрольованих параметрів**

Значення контрольованих параметрів можуть бути отримані або прямим виміром, або після обробки результатів вимірів. Контрольовані параметри часто вважають за краще початковим даним вимірів унаслідок їх більшої селективності. Чим вище селективність контрольованих параметрів, тим вище селективність діагностичних ознак і, відповідно, тим простіше поставити діагноз.

Селективність контрольованих параметрів дозволяє зменшити число даних гіпотез при висновку укладення про вид несправності за спостережуваними діагностичними ознаками.

Вимір параметрів обмоток трансформатора в нашому випадку, може проводитися при різних видах ремонту або між ремонтами при робочому діагностуванні.

В ході виконання роботи, вибрані основні випробування параметри, що виявляють, необхідні для діагностування пристрої:

- виміри  $\text{tg } \Delta$  ізоляції обмоток;
- вимір опору обмоток постійному струму;
- вимір втрат холостого ходу;
- вимір опорів короткого замикання;
- вимір опору ізоляції обмоток.

Система діагностування повинна враховувати можливі ситуації, що виникають залежно від співвідношення між величинами періодів діагностування і використання устаткування, Рис.2.3.

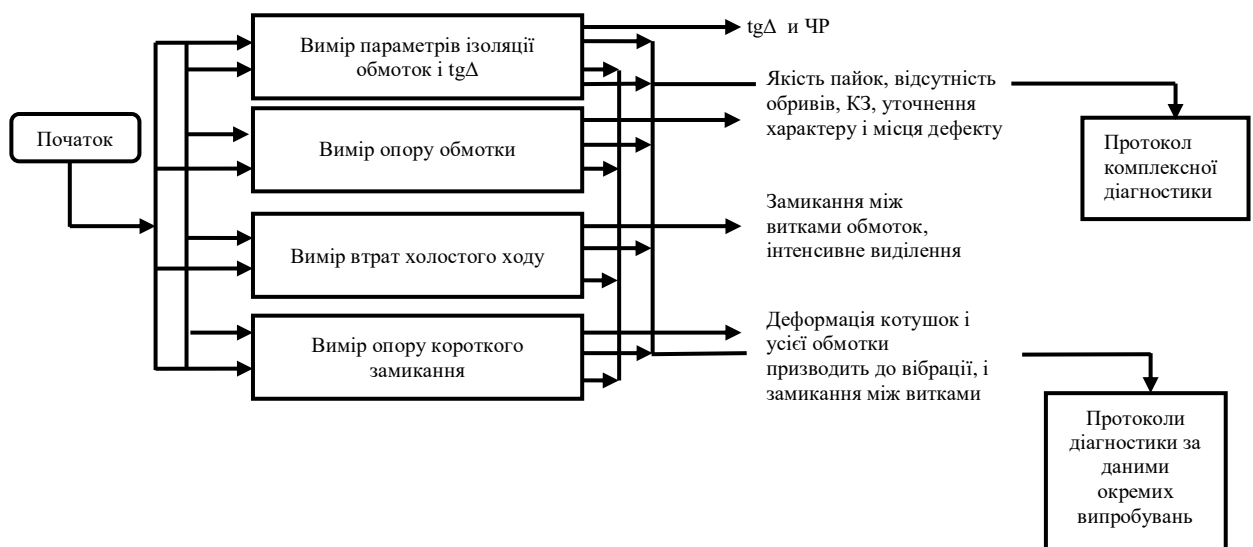


Рис. 2.3 – Параметри комплексного діагностування обмоток ТР

У таблиці 2.1 перераховані найбільш типові несправності обмоток трифазних масляних трансформаторів і параметри за результатами вимірів, яких можна судити про появу тієї або іншої несправності.

Таблиця 2.1 – залежність несправності від контрольованого параметра

Трансформатор	Контрольований параметр				
	$R_{\text{пост. току}}$	$R_{\text{изол. обмоток}}$	$\text{tg}\delta$	$Z_{\text{кз}}$	$R_{\text{х.х}}$
Замикання між витками обмоток	*		*		*
Обрив в обмотках і пайках	*				
Пробій		*	*		
Деформація обмотки				*	

\* вказує діагностична ознака або контрольований параметр для несправності цього виду.

Для визначення стану обмоток трансформатора потрібне виявлення допустимих меж основних контрольованих параметрів, при яких зберігається працездатність обмоток.

Для складання графічної моделі побудовано "дерево причинно-наслідкових зв'язків" несправностей, що виникають в обмотках трансформатора.



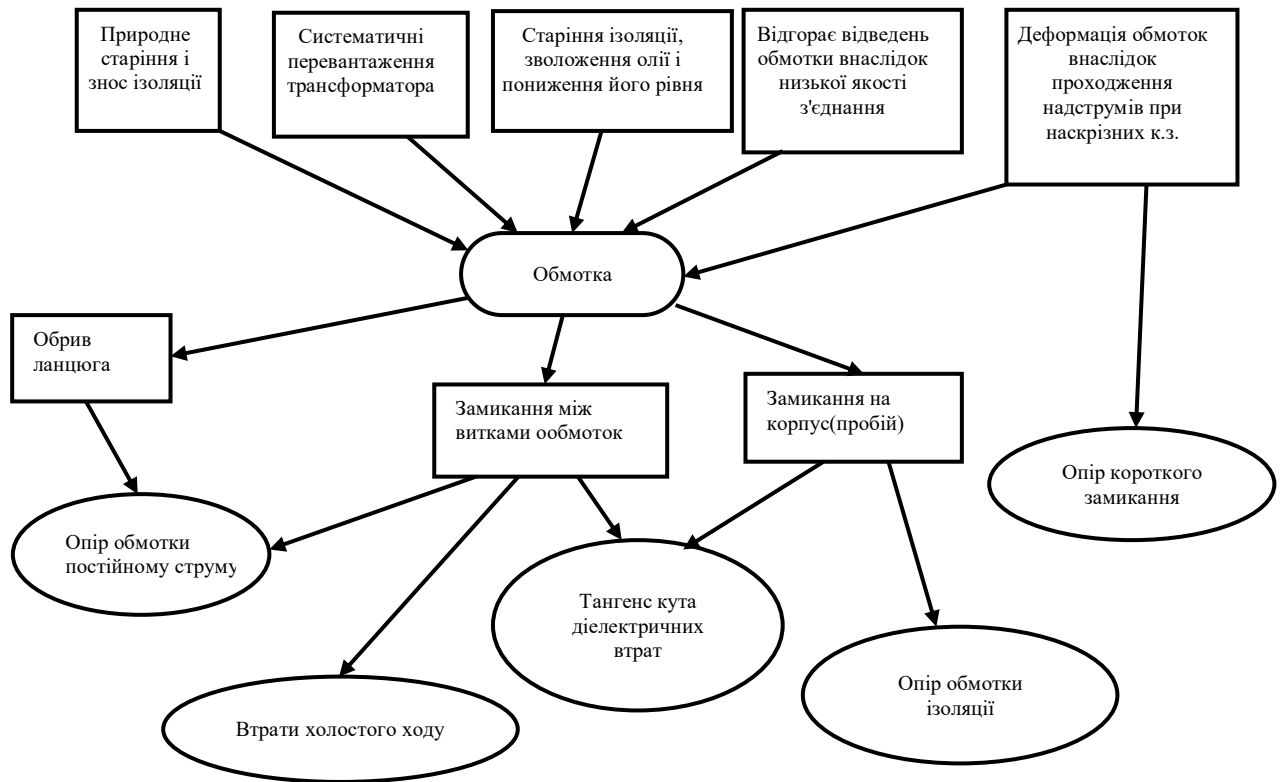


Рис. 2.4 – Причини відмов діагностичні ознаки і параметри обмоток трансформатора

При побудові "дерево причинно-наслідкових зв'язків" введені ці позначення:

□ – вид відмови(несправності);

○ – діагностична ознака;

○ – контрольований параметр;

→ – зв'язок, що породжує;

— – зв'язок, що впливає.

## РОЗДІЛ 3

### ВИМІР І ДОПУСТИМІ РІВНІ ВІДХИЛЕНЬ КОНТРОЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ

При проведенні аналізу несправностей трансформатора було виявлено, що ці випробування дозволяють з великою точністю визначити стан обмоток трансформатора можуть наступні випробування:

- виміри  $\text{tg } \Delta$  ізоляції обмоток;
- вимір опору обмоток постійному струму;
- вимір втрат холостого ходу;
- вимір опору ізоляції обмоток; .
- вимір опорів короткого замикання.

Відомо що, не для усіх варіацій трансформаторів встановлені значення  $\text{tg } \Delta$  ізоляції обмоток. Зробити оцінку стану ізоляції за значенням  $\text{tg} \Delta$  ізоляції обмоток, приміром, можливо тільки у трансформаторів з класом напруги до 35 кВ включно після монтажних робіт(таблиця 3.1) [9]. Допустимі значення  $\text{tg } \Delta$  ізоляції обмоток встановлені практично на усю напругу, для трансформаторів, що пройшли капітальний ремонт(таблиця 3.2) [9].

Таблиця 3.1 – Допустимі значення  $\text{tg}\Delta$  тільки у трансформаторів напругою до 35 кВ включно

Потужність трансформатора кВА	Значення $\text{tg}\Delta$ ,% при температурі обмотки, °С						
	10	20	30	40	50	60	70
Не більше 6300	1,2	1,5	2,0	2,5	3,4	4,5	6,0
10 000 і більше	0,8	1,0	1,3	1,7	2,3	3,0	4,0

Таблиця 3.2 – Допустимі значення  $\text{tg } \Delta$  у трансформаторів напругою більше 35 кВ

Характеристика трансформатора( напруга і потужність)	Значення $\text{tg}\Delta$ , %, при температурі обмотки, °С						
	10	20	30	40	50	60	70
35 кВ потужністю більше 10000 кВА 110–150 кВ	1,8	2,5	3,5	5,0	7,0	10,0	14,0
220–500 кВ	1,0	1,3	1,6	2,0	2,5	3,2	4,0

Оцінка погіршення стану ізоляції робиться шляхом порівняння результатів випробувань з первинними значеннями.

Провівши експеримент, була встановлена межа контрольованого параметра  $\text{tg } \Delta$  1%.

Існують основні вимоги для виміру опору обмоток постійному струму при різних видах приймально-здавальних випробуваннях, випробуваннях після проведення капітального ремонту: "Величини опорів трифазних трансформаторів, отримані на однакових відгалуженнях різних фаз при однаковій температурі не повинні відрізнятися один від одного більше, ніж на 2%. При додаванні в паспорт трансформатора із-за його конструктивних особливостей запису про розбіжність, можливе відхилення більше 2% але за даних обставин необхідно враховувати величину розбіжності, вказану в паспорті. Величини опорів отримані таким чином не повинні мати відмінності в 5% більше від значень, вказаних в паспортних даних трансформатора [16].

Існує великий вибір методів для виміру опорів обмоток трансформаторів, але на практиці випробувальні станції при проведенні

випробувань силових трансформаторів застосовують найбільш відомі два методи:

- метод виміру опору вольтметром-амперметром;
- метод виміру опорів – мостовий.

При проведенні виміру контрольованого параметра відносні зміни складають близько 2%, і необхідно максимально звести до мінімуму погрішності цього методу які можуть виникнути при проведенні випробування.

Погрішності найчастіше бувають викликані:

- внутрішніми опорами вимірювальних приладів і їх погрішностями;
- впливом перехідного контакту при підключенні приладу до обмотки в місці його підключення;
- великими перепадами температур опорів обмоток.

Якщо методом виміру опору обмоток вибраний метод амперметра-вольтметра, тоді прилади повинні мати клас точності 0,5 і 0,2. Мостовий метод варто застосовувати, коли потрібне забезпечення набагато більш високого класу точності, якщо треба забезпечити необхідну точність вимірів до 0,00001 Ом [1].

При включенні дротів до вимірюваного опору слід потурбуватися про якість контактів. Потрібна висока надійність контактів надійними, правильна форма, а також чистота поверхні. Не правильно підготовлений контакт дасть додатковий опір близько 1–3 Ом. При вимірюваному опорі, 0,004 – 0,005 Ом, та наявність невідповідного контакту спотворить результати випробувань на 20 – 25% [15].

Якщо трансформатор, знаходиться довгий час у відключеному стані при незмінній середній температурі довкілля, то за температуру його обмоток варто брати температуру навколишнього повітря.

У інших випадках температурою обмотки довгий час не працюючого трансформатора можливо вважати температуру верхніх шарів олії трансформатора [15].

Розрахунок опорів обмоток з першої температури ( $t_1$ ) на другу( $t_2$ ) можливо проводити по виразах:

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{235 + t_2}{235 + t_1} \quad \text{для міді:}$$

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{245 + t_2}{245 + t_1} \quad \text{для алюмінію.}$$

Зазвичай опори обмоток прирівнюють до температури (75 °C або 20 °C) або до температури номінальних випробувань.

Вимір опорів проводять на обмотках і східцях регулювання [15].

Лінійні опори заміряють(між лінійними введеннями) для усіх відгалужень обмоток усіх фаз. Якщо є нульове введення, проводять виміри одного з фазних опорів(додатково).

Якщо є можливість виміру нульового введення, тоді можливий вимір фазних опорів, проте якщо опір нульового введення менше або рівно 2% фазного опору обмотки. У такому разі опір нульового введення можливо визначити при додатковому вимірі лінійного опору.

Якщо трансформаторів має паралельні гілки обмотки ВН, які виведені на верхню частину бака, потрібний вимір опорів кожної гілки.

При вимірі втрат ХХ в трифазному трансформаторі необхідно провести три досвіду, кожен з яких полягає в почерговому приведенні трифазного трансформатора до однофазного трансформатора, замикаючи накоротко одну з його фазу і збудження двох інших(Рис.3.1). Закорочення однієї обмотки, необхідно провести щоб позбавиться від магнітного потоку в цій фазі і не мати в цій фазі втрат. Якщо закоротить фазу С і подавати напругу на інші

фази обмотки НН, то певні втрати покажуть витрату енергії на збудження цих фаз.

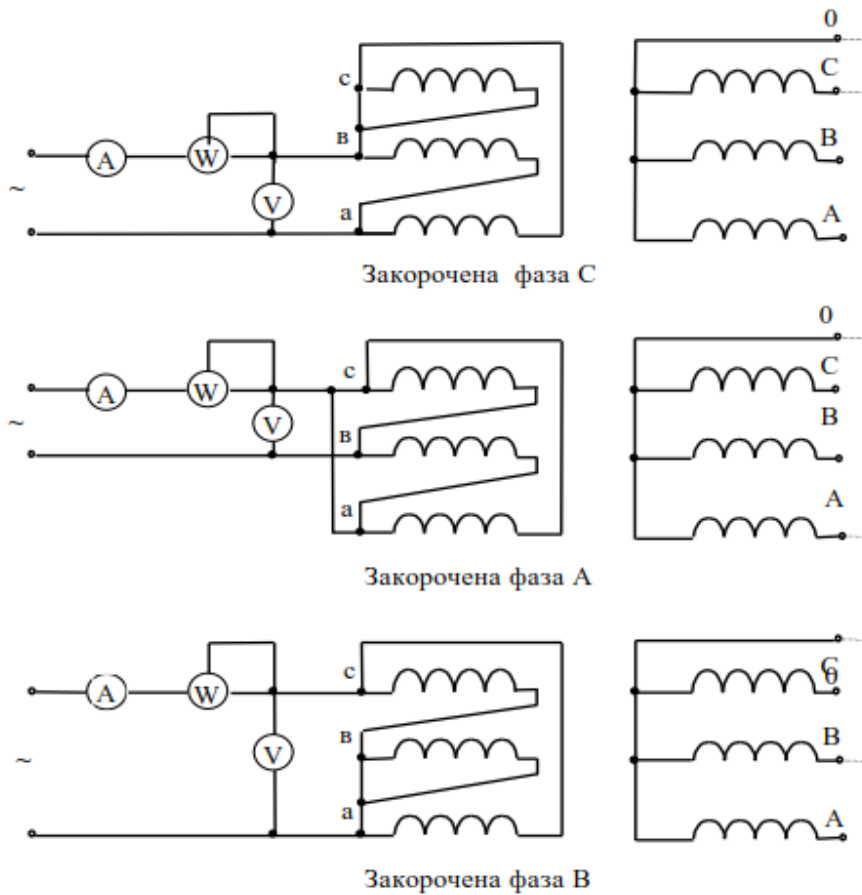


Рис. 3.1 – Вимір втрат ХХ

Ці втрати, враховуючи, що замикання відбувалося на фазі С запишемо, як  $P_C$ . Якщо дефектів в силовому трансформаторі немає, тоді втрати  $P_A$  і  $P_C$ , які були виміряні послідовним закороченням фаз А і С, матимуть відмінності до 2 – 3%, а втрати на фазі В  $P_B$ , виміряні при закороченні середньої фази, перевищують втрати  $P_A$  і  $P_C$  приблизно близько 38% [8]. Цей феномен обумовлюється відмінністю довжини шляху замикання магнітного потоку при збудженні трансформатора. Якщо відомі значення втрат на різних фазах, то можливо визначити, що трансформатор не має дефектів.

При виникненні будь-якого коротко замкнутого витка навколо основного магнітного потоку одного із стержнів магнітопроводу

співвідношення втрат, виміряних за цими схемами, зміниться, причому поява коротко замкнутого витка викликає збільшення втрат, тому дефектною буде та фаза, при закорочені якої будуть виміряні найменші втрати. Ця закономірність використовується для виявлення дефектної фази [12].

Несправності можуть виникати при монтажі, а також капітальному ремонті трансформатора. Через це в нормативних документах [11] рекомендується проводити виміри втрат  $X_X$  при приймально-здавальних випробуваннях і після капітального ремонту.

Для трифазних трансформаторів перед введенням в експлуатацію і під час капітального ремонту відношення втрат на різних фазах має бути в межах 5% друг відносно друга.

Метод короткого замикання базується на проведенні виміру струму однієї з обмоток трансформатора, закорочуючи виведення іншої обмотки. Досвід необхідно проводити при низькій напрузі. Маючи результати виміру необхідно розрахувати опори короткого замикання  $Z_k$ .

Необхідно пам'ятати, що на  $Z_k$  не впливає значення напруги, але опори короткого замикання може відрізнитися через відмінності його подання [13].

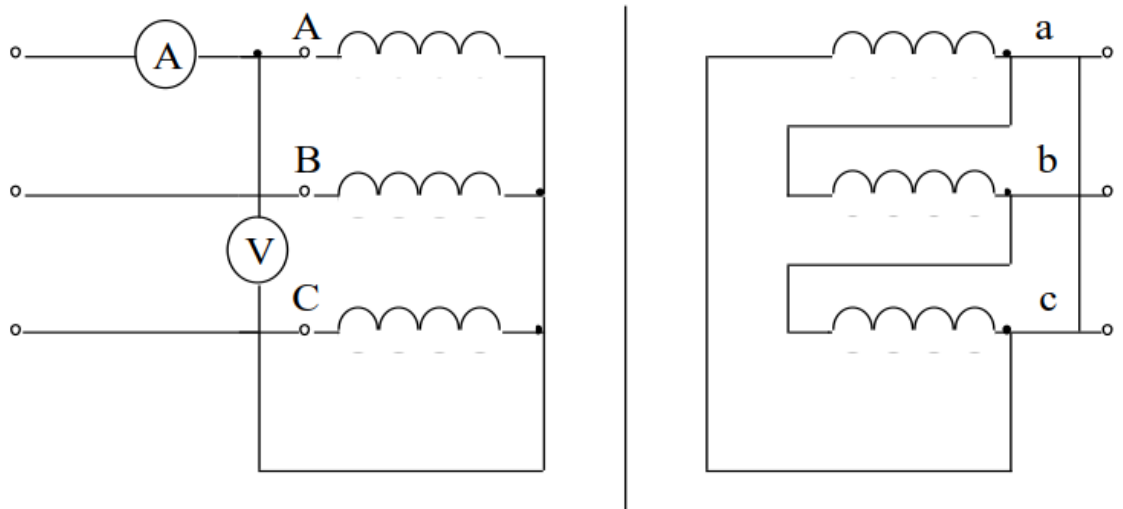
Проводячи виміри необхідно пам'ятати наступне:

1. Вимір  $Z_k$  необхідно робити з використанням амперметрів і вольтметрів, які мають бути підключені до схеми виміру, трансформаторі має бути відключений від роботи. Напруга мережі – 380 В, клас точності вимірювальних приладів вище або рівний 0,5.

2. Виміри  $Z_k$  трифазних трансформаторів слід робити з сторони обмотки, із з'єднанням "зірка" і нульовим дротом (малюнок 3.2).

3. Вимірюючи, напругу треба подавати на усі фази, вимір струму і напругу проводити пофазно, потрібне використання нульового дроту. Вимірюючи опори КЗ на обмотках НН з'єднання мабуть – "трикутник".



Рис. 3.2 – Вимір  $Z_k$ 

4. Значення струму для виміру слід Вибирати, забезпечуючи нормальний відлік свідчень по приладах(амперметру і вольтметру), стрільця приладів має бути на другій половині шкали.  $Z_k$  необхідно визначати по формулі:

$$Z_k = \frac{U}{I}, \text{ Ом}$$

5. Переріз дроту, що закорочує, на виведеннях є більше за переріз дроту обмотки трансформатора. Переріз дротів обмотки прийнято визначати враховуючи значення номінального струму, по середній щільності струму в обмотці, рівній  $3 \text{ А/мм}^2$

6. Паспортне значення для  $Z_{кп}$  обчислюється за формулою:

$$Z_{кп} = \frac{U_{ном} * U_k}{100 * I_{ном}}, \text{ Ом},$$

де  $U_n$  – номінальна фазна напруга живленої обмотки, В;

$U_k$  – напруга КЗ для даної пари обмоток, вказане в паспорті %,

$I_{ном}$  – номінальний фазний струм живленої обмотки, А.

7. Для отримання точнішого стану трансформатора, результати  $Z_k$  варто зробити на трьох східцях регулювання напруги : при номінальному і двох

інших. Номінальний струм відгалуження обмотки ( $I'_{\text{НОМ}}$ ) визначається по формулі,:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} * U_{\text{НОМ}}}$$

де  $S_{\text{НОМ}}$  – номінальна потужність трансформатора, кВА;

$U_{\text{НОМ}}$  – номінальна лінійна напруга відгалуження обмотки, кВ.

8. Також проводячи випробування треба відмічати частоту живлячої мережі. Якщо виміряна частота мережі відрізняється від номінальної (50 Гц), отримані значення  $Z'_k$  слід привести до номінальної частоти:

$$Z_k = \frac{50 * Z'_k}{f},$$

9. Оцінка стану обмоток трансформатора робиться порівнянням значень  $Z_k$  по фазах з раніше виміряними значеннями або паспортними даними. Зміна  $Z_k$ :

$$\Delta Z_k = \frac{Z_k - Z_{k.б}}{Z_{k.б}} * 100,$$

де  $Z_{k.б}$  – базове значення опору КЗ, по відношенню до якого визначається відхилення  $Z_k$ .

Значення  $\Delta Z_k \geq 3\%$  показує що, в обмотках є неприпустимі деформації. Порівнюючи з паспортними даними,  $\Delta Z_k$  (наявність деформації обмоток), повинно бути 5%.

Вимірюючи опори ізоляції, перевірку необхідно робити мегаомметром, з напругою більше 2500В з верхньою межею виміру від 10000 МОм. На трансформаторах з вищою напругою 10 кВ і нижче допускається вимір опору ізоляції робити мегаомметром на 1000 В з верхньою межею виміру не нижче 1000 МОм [22].

Перед початком кожного виміру випробовувана обмотка має бути заземлена не менше 2 хв. Опір ізоляції  $R_{60}''$  – не нормується, і показником в даному випадку є порівняння його з даними заводських або попередніх випробувань. Коефіцієнт абсорбції також не нормується, але враховується при комплексному розгляді результатів виміру.

Зазвичай при температурі 10 – 30°C для не зволжених трансформаторів він знаходиться в наступних межах: для трансформаторів менше 10000 кВА напругою 35 кВ і нижче – 1,3, а для трансформаторів 110 кВ і вище – 1,5 – 2. Для трансформаторів, що зволжених або мають місцеві дефекти в ізоляції, коефіцієнт абсорбції наближається до 1 [ 22].

У зв'язку з тим, що при приймально–здавальних випробуваннях доводиться вимірювати трансформаторів при різних температурах ізоляції, слід враховувати, що значення коефіцієнта змінюється зі зміною температури. Для порівняння опору ізоляції необхідно вимірювати при одній і тій же температурі і в протоколі випробування вказувати температуру, при якій проводився вимір. При порівнянні результати вимірів опору ізоляції при різних температурах можуть бути приведені до однієї температури з урахуванням того, що на кожні 10°C пониження температури  $R_{60}''$  збільшується приблизно в 1,5 разу [ 22].

У інструкції із цього приводу даються наступні рекомендації: значення  $R_{60}''$  має бути приведені до температури виміру, вказаної в заводському паспорті, воно має бути: для трансформаторів 110 кВ – не менше 70% для трансформаторів 220 кВ – не менше 85 % значення, вказаного в паспорті трансформатора.

Усі представлені в третьому розділі результати виміру параметрів ТР проводилися в Іваново [22].

Після обробки контрольованих параметрів можна виявити межі їх відхилення, тобто надалі несправності обмоток трансформатора.

На основі цих вищевикладених випробувань складена таблиця 3.3, що показує межі  $\Delta$ .

Таблиця 3.3 – межі  $\Delta$

Параметр	Межі для визначення несправності
$\Delta 1$ , опір обмоток постійному струму	2%
$\Delta 2$ , tg $\Delta$ діелектричних втрат	1%
$\Delta 3$ , втрати ХХ	5%
$\Delta 4$ , опір ізоляції обмотки	35 кВ і нижче – 1,3МОм; 110 кВ і вище – 1,5 – 2МОм
$\Delta 5$ , опір КЗ	3%

Також велике значення при діагностуванні має своєчасне попередження відмови. Такий стан можна відстежити при проведенні діагностичних випробувань. Якщо отримане значення знаходиться в діапазоні  $\pm 1\%$  от межі визначення несправності.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА

#### 4.1 Методика оцінки стану обмоток

У методику оцінки стану обмоток трансформатора входять наступні етапи:

1. Аналіз несправностей обмоток :

- збір інформації про відмови;
- виявлення несправностей і їх причин.

Цей пункт детально представлений в першому і другому розділах дисертації.

2. Побудова схем причинно-наслідкових зв'язків несправностей обмоток ТР(ці схеми дозволяють зв'язати несправності і параметри, що діагностуються);

Найбільш зрозумілими і простими в експлуатації являються схеми причинно-наслідкових зв'язків. Вони дозволяють наочно простежити залежність ушкодження, несправності і контрольованого параметра. Схеми детально, з ілюстраціями, представлені в другому розділі.

3. Вибір контрольованих параметрів;

Контрольовані параметри дозволяють з високою точністю відстежити наявність несправності і попередити вихід з ладу устаткування. У третьому розділі були вибрані ці параметри і їх допустимі рівні відхилень.

4. Вибір методу виміру і збір цих вимірів параметрів обмоток ТР;
5. Установка допустимих рівнів відхилення вибраних параметрів;
6. Розробка діагностичної моделі
  - розробка блок-схеми етапів діагностування стану обмоток ТР;
  - побудова графа проходження інформації;
  - складання залежностей, що зв'язують вхідну і вихідну інформацію за контрольованими параметрами.

Даний і подальші пункти детально представлені в розділах чотири і п'ять.

7. Обробка результатів визначення стану обмоток і постановка діагнозу;

8. Прогнозування стану обмоток ТР.

## **4.2 Розробка блок-схеми етапів діагностування**

Спосіб побудови діагностичних моделей (ДМ) багато в чому визначається видом моделі. У зв'язку з великою різноманітністю ДМ електроустаткування існує безліч різних способів їх побудови. Проте ці способи можна згрупувати, враховуючи їх спрямованість і особливості.

Так, при побудові безперервної ДМ передбачається велике число способів спрощення диференціального або алгебри порівняння високого порядку, що описує устаткування, що діагностується, до порядку, що дозволяє описувати процеси з допустимою погрішністю.

Діагностична модель повинна відбивати сукупність операцій, що виконуються устаткуванням і його окремими частинами в процесі функціонування. Такі моделі розглядаються як схеми зв'язків між окремими

СО, діаграми проходження сигналів(орієнтовані графи) або алгоритми функціонування.

Графічні методи мають велику наочність і можуть служити як для безпосереднього аналізу, так і для ілюстрації аналітичних методів. Ці методи корисні для дослідження процесів, що швидко протікають, або характеристик устаткування. Серед графічних методів особливе місце займають методи, ґрунтовані на теорії орієнтованих або неорієнтованих графів..

Проаналізувавши несправності і встановивши їх взаємозв'язок з контрольованими параметрами, була складена блок-схема (Рис.4.1).

Блок-схема є сукупністю символів, що відповідають етапам роботи алгоритму і ліній, що сполучають їх. У незалежності від призначення блок-схеми, вона обов'язково має початковий і кінцевий блок, що називається термінатор. Тіло блок-схеми складається з блоків введення і виведення, блоків операцій і блоків умов.

Розроблена блок-схема показує залежність між випробуванням, що проводиться, контрольованим параметром,(який задовольняє або не задовольняє виявленню несправності), а також показує циклічність випробувань. Після виміру параметра ми перевіряємо, чи виходить він за межі працездатності, якщо він виходить, відбувається перевірка подальших випробувань для визначення несправності. Якщо параметр не виходить за межі працездатності, переходимо до перевірки наступного параметра.

На основі побудованої блок-схеми (Рис.4.1) і дерева причинно-наслідкових зв'язків (Рис.2.5) представленого в другому розділі, можна скласти блок-схему виявлення несправностей в обмотках трансформатора (Рис.4.2). Ця блок-схема є схематичним зображенням розробленої діагностичної моделі. Виявлені основні несправності обмоток трансформатора: виткові замикання, обрив ланцюга, пробій, деформація обмоток. Ця схема показує проходження усіх етапів діагностування до виявлення результату. Блоки умов показують, чи знаходяться відхилення в межах працездатності об'єкту.

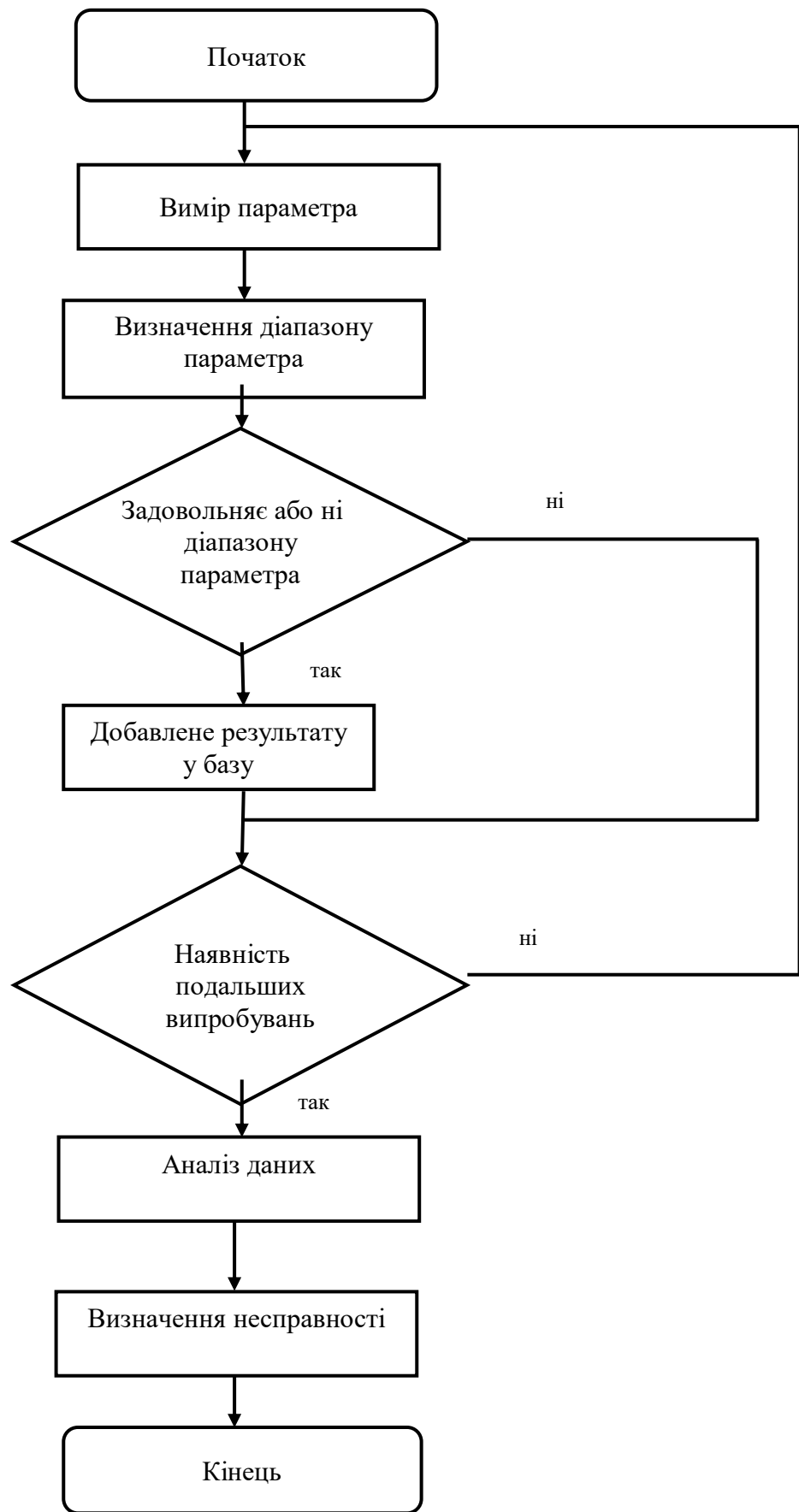




Рис. 4.1 – Загальна блок-схема

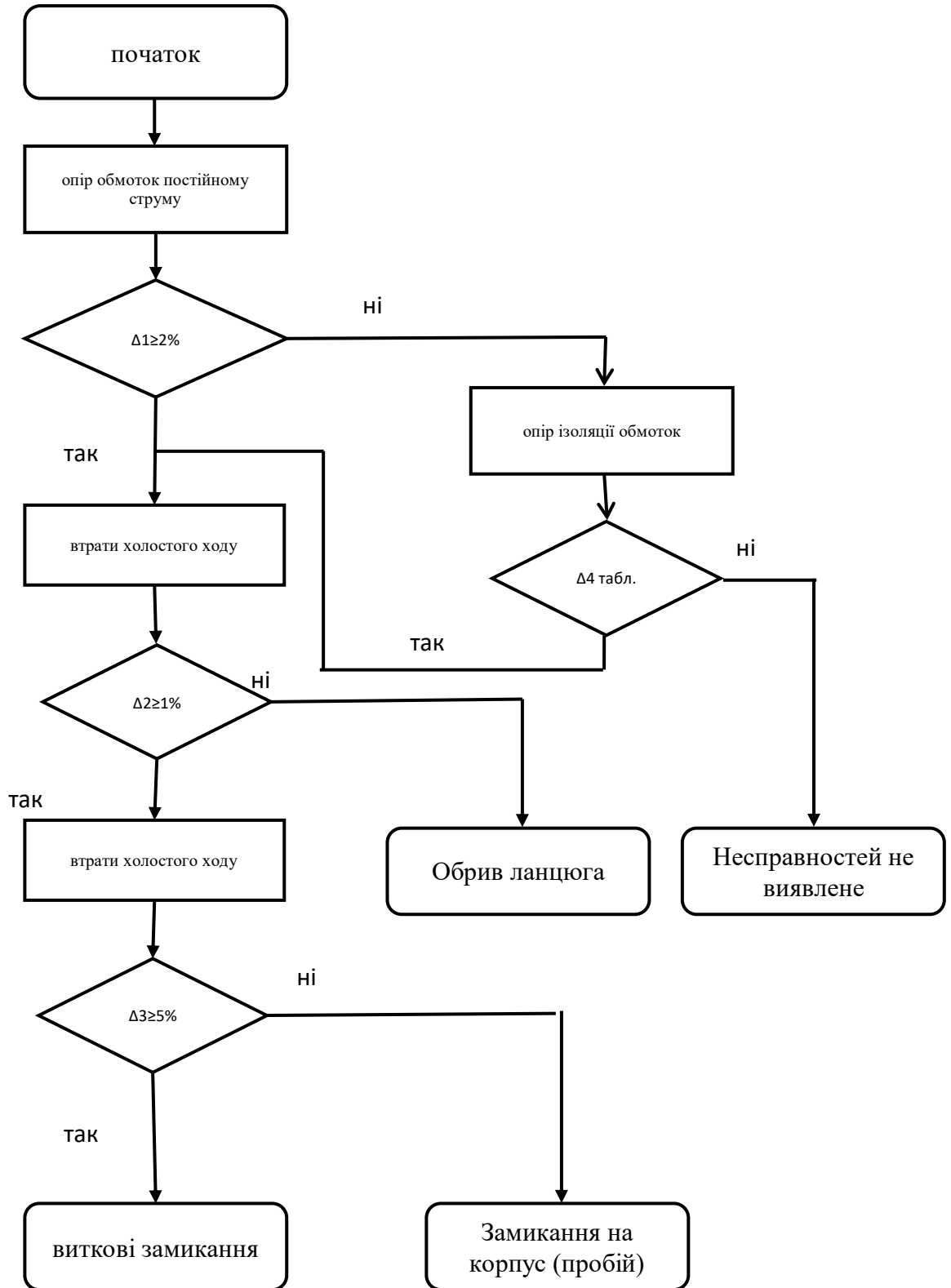


Рис. 4.2 – Блок-схема визначення несправності

Контрольовані параметри:  $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3, \Delta 4$  – значення, отримані в ході експерименту.

### 4.3 Побудова орієнтованого графа

Перехід від блок-схеми виявлення несправностей до орієнтованого графа, здійснюється заміною: блоки замінюються вершинами, а зв'язки між блоками – спрямованими гілками зі збереженням напрямку проходження сигналів.

Для блок-схеми, представленої на Рис.4.2, орієнтований граф матиме наступний вигляд(Рис.4.3). Зв'язки з парними номерами свідчать про те, що виходу за межі немає, з непарними номерами – вихід за межі є. Вершини показують приналежність до контрольованого параметра.

Граф-модель з орієнтованими зв'язками між параметрами дозволяє наочно визначити необхідну кількість випробувань для виявлення контрольованих параметрів.

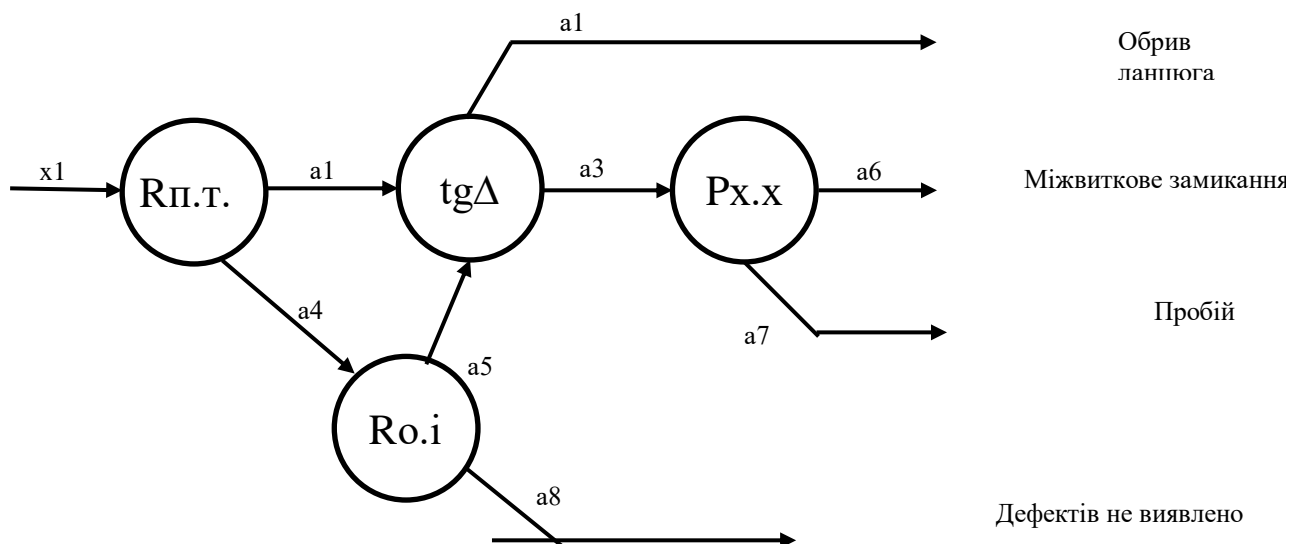


Рис. 4.3 – Діагностична модель

Позначення на малюнку:

$x_1$  – вхідний сигнал;

$y_1, y_2, y_3, y_4$  – вихідні сигнали;

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$  – значущість  $i$ -го елементу.

На основі спроектованої ДМ отримаємо блок виразів (4.1) :

$$\left[ \begin{array}{l} y_1 = \Delta_1 \cdot a_1 + \Delta_2 \cdot a_2; \\ y_2 = \Delta_1 \cdot a_1 + \Delta_2 \cdot a_3 + \Delta_3 \cdot a_6; \\ y_3 = \Delta_1 \cdot a_4 + \Delta_4 \cdot a_5 + \Delta_2 \cdot a_3 + \Delta_3 \cdot a_7; \\ y_4 = y_4 = \Delta_1 \cdot a_4 + \Delta_4 \cdot a_8. \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Орієнтований граф може бути замінений матрицею, яка також використовується як ДМ.

Матриця є квадратною і має вигляд:

$$C = [c_{ij}], i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n},$$

де  $n$  – число блоків (СЕ).

$$c_{ij} \begin{cases} 1, \text{ коли блоки } i \text{ і } j \text{ безпосередньо сполучені,} \\ 0, \text{ коли блоки } i \text{ і } j \text{ безпосередньо не сполучені} \end{cases}$$

Рядками в цій матриці служать кінцеві результати рівнянь(несправності), стовпцями параметри діагностування( $\Delta$ ).

$$C = \left| \begin{array}{cccc} \Delta_1 \cdot a_1 & \Delta_2 \cdot a_2 & 0 & 0 \\ \Delta_1 \cdot a_1 & \Delta_2 \cdot a_3 & \Delta_3 \cdot a_6 & 0 \\ \Delta_1 \cdot a_4 & \Delta_2 \cdot a_3 & \Delta_3 \cdot a_7 & \Delta_4 \cdot a_5 \\ \Delta_1 \cdot a_4 & 0 & 0 & \Delta_4 \cdot a_8 \end{array} \right|$$

При виявленні таких несправностей, як: замикання між витками обмоток, пробій, бажано робити перевірку опору короткого замикання. При відхиленні параметра  $Z_k$ . можна судити про такий дефект, як деформація обмоток(рис.4.4).

Деформація обмоток настає із-за протікання понад струми і супроводжується сильним виділенням тепла. При деформації обмоток підвищується шанс виникнення додаткових несправностей в ізоляції, а також в магнітопроводі.

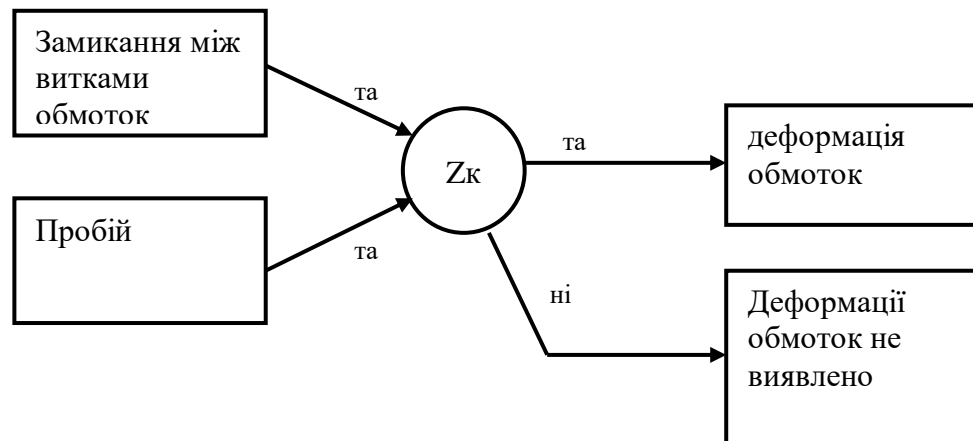


Рис. 4.4 – Виявлення деформації обмоток

Розроблена модель діагностування виявляє основні несправності в обмотках силових трансформаторів :

- обрив;
- пробій;
- Замикання між витками обмоток;
- деформація обмотки.

## РОЗДІЛ 5

### ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ СТАНУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

#### 5.1 Обробка результатів виміряних параметрів і постановка діагнозу

Перевірка методу діагностування здійснена на основі даних трифазного трансформатора. Контрольованими параметрами для цього об'єкту вибрані:

- опір постійному струму;
- $\text{tg } \Delta$  діелектричних втрат;
- втрати холостого ходу;
- опір ізоляції обмоток(відносно корпусу).

Для даних параметрів встановлені допустимі рівні відхилення, що показують стан обмоток, таблиця 5.1.

У попередньому розділі була розроблена діагностична модель, побудована на основі орієнтованого графа.

Діагностична модель, складена за контрольованими параметрами, має вигляд, рис.5.1.

Таблиця 5.1 – Рівні відхилення контрольованих параметрів

Контрольований параметр	Допустимі рівні для визначення несправності
$\Delta 1$ , опір обмоток постійному струму	2%
$\Delta 2, \text{tg } \Delta$ діелектричних втрат	1%
$\Delta 3$ , втрати ХХ	5%
$\Delta 4$ , опір ізоляції обмоток	1,3 МОм при $U \leq 35 \text{ кВ}$ ; 1,5 – 2 МОм при $U \geq 110 \text{ кВ}$

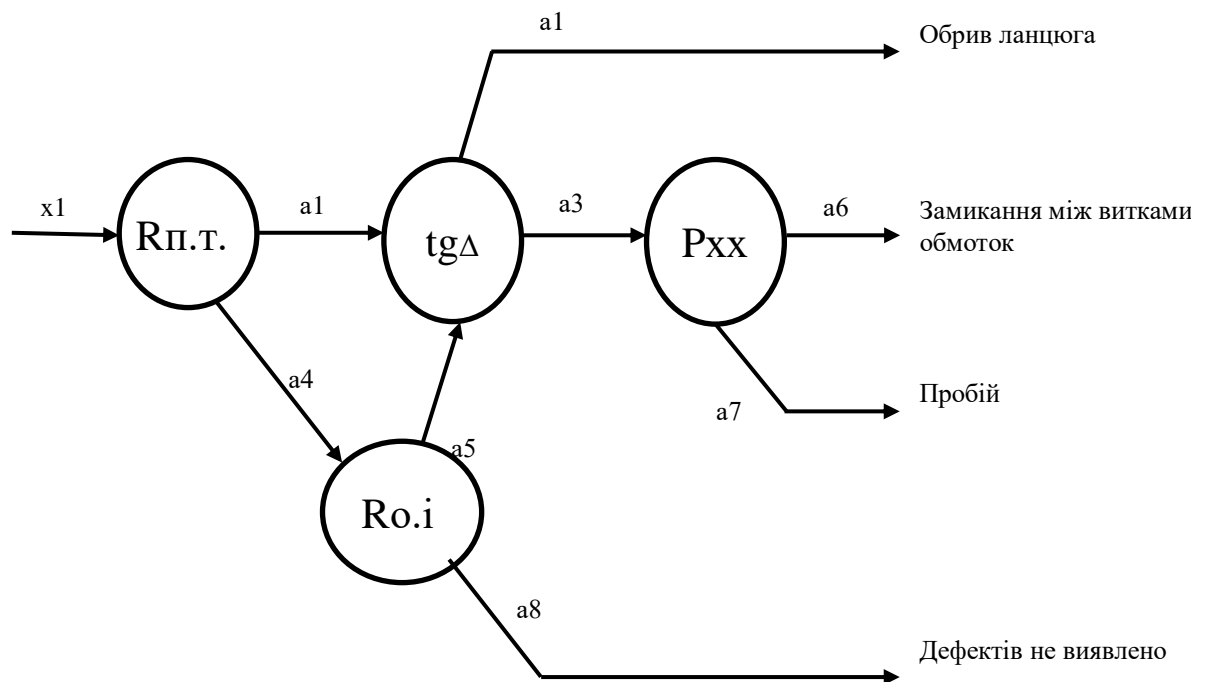


Рис. 5.1 – Діагностична модель на підставі орієнтованого графа

Складена діагностична модель дозволяє виявити основні несправності обмоток трансформатора :

- обрив;
- пробій;
- замикання між витками обмоток;
- деформація обмотки.

На основі спроектованої ДМ отримаємо вирази, що забезпечують зв'язок між вхідними і вихідними параметрами, де  $Y_i$  – вихідний сигнал,  $\Delta$  – відхилення контрольованого параметра,  $a_i$  – значення зв'язку :

$$y_1 = \Delta_1 - a_1 \Delta_2 - a_2;$$

$$y_2 = \Delta_1 - a_1 \Delta_2 - a_3 \Delta_3 - a_6;$$

$$y_3 = \Delta_1 - a_4 \Delta_4 - a_5 \Delta_2 - a_3 \Delta_3 - a_7;$$

$$y_4 = \Delta_1 - a_4 \Delta_4 - a_8.$$

Для спрощення методу діагностування, на основі діагностичної моделі і отримання виразів, складена матриця визначення несправності. Рядками в цій матриці служать кінцеві результати рівнянь(несправності), стовпцями параметри діагностування( $\Delta$ ).

Матриця має вигляд:

$$C = \begin{vmatrix} \Delta_1 \cdot a_1 & \Delta_2 \cdot a_2 & 0 & 0 \\ \Delta_1 \cdot a_1 & \Delta_2 \cdot a_3 & \Delta_3 \cdot a_6 & 0 \\ \Delta_1 \cdot a_4 & \Delta_2 \cdot a_3 & \Delta_3 \cdot a_7 & \Delta_4 \cdot a_5 \\ \Delta_1 \cdot a_4 & 0 & 0 & \Delta_4 \cdot a_8 \end{vmatrix}$$

Для перевірки працездатності моделі проведемо ряд експериментів. Початкові дані для обчислювального експерименту узяті з [22].

Дослід 1.



З побудованої моделі, видно, що перше випробування для визначення несправності – вимір опорів обмоток постійному струму.

Провівши виміри, виявлено, що опір обмотки кожної з двох здорових фаз 0,010 Ом. Опір дефектної фази 0,01222 Ом, тобто на 22% більше. Відмінність на фазах більше 2%, отже, несправність є.

Як можна спостерігати з ДМ наступне випробування вимір  $\text{tg}\Delta$ .

Значення фактичного  $\text{tg}\Delta$  ізоляції обмоток складає:

$$\text{tg}\delta = \frac{\text{tg}\delta}{K_1} - 0.45 * K_{M^2} = \frac{0,95}{1,09} - 0,45 * 0,2 = 0,78\%$$

Значення фактичного  $\text{tg}\Delta$  ізоляції обмоток перевищує значення  $\text{tg}\Delta$  ізоляції обмоток при заводських випробуваннях на 1%, але знаходиться в допустимих межах. Складена модель експерименту рис.4.2.

З діагностичної моделі видно, що якщо  $\text{tg}\Delta$  ізоляції обмоток знаходиться в допустимих межах, а вимір опорів обмоток постійному струму показав наявність дефекту, то цією несправністю є – обрив ланцюга.

Аналогічним шляхом, маючи значення контрольованих параметрів, можна точно і в короткі терміни встановити стан обмоток трансформатора.

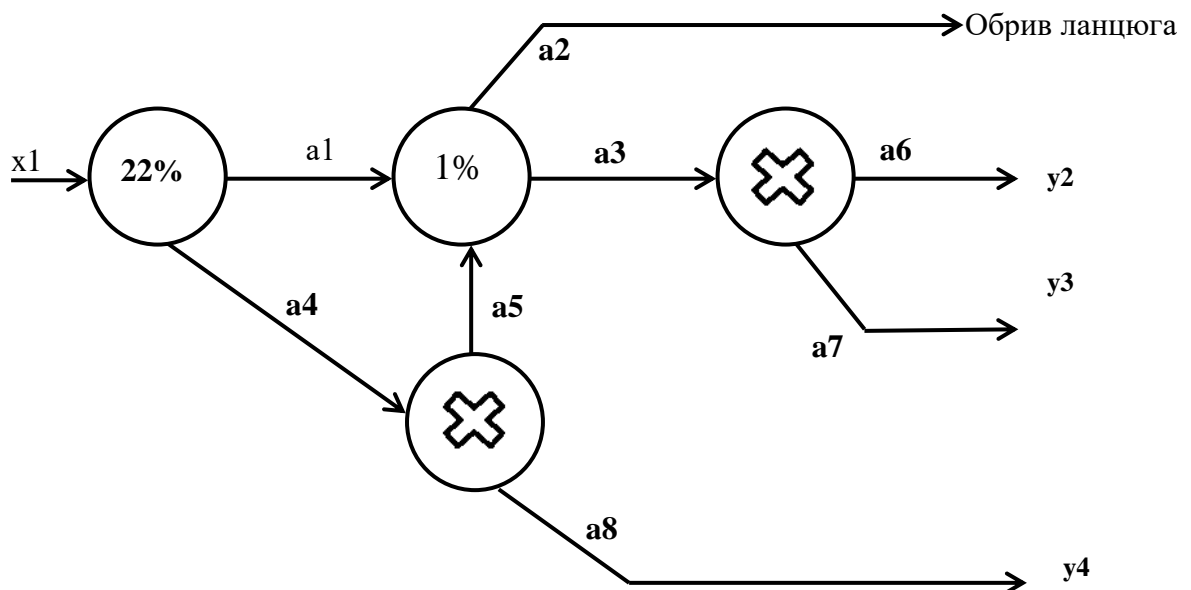


Рис. 5.2 – Визначення обриву ланцюга

✘ – цей символ показує, що для виявлення несправності "Обрив ланцюга", параметри втрати холостого ходу і опір ізоляції обмотки не потрібно.

Дослід 2.

Провівши виміри, виявлено, що опір обмотки кожної з двох справних фаз 0,010 Ом. Опір дефектної фази 0,01222 Ом, тобто на 22% більше. Різниця опорів на фазах більше 2%, отже, несправність є.

Як можна спостерігати з ДМ наступне випробування вимір  $\text{tg}\Delta$ .

Значення фактичного  $\text{tg}\Delta$  ізоляції обмоток складає:

$$\text{tg}\delta = \frac{\text{tg}\delta}{K_1} - 0.25 * K_{M^2} = \frac{0,95}{1,09} - 0,45 * 0,2 = 0,78\%$$

Значення  $\text{tg}\Delta$  ізоляції обмоток перевищує значення  $\text{tg}\Delta$  ізоляції обмоток при заводських випробуваннях на 1,73%, і не знаходиться в допустимих межах.

Наступне випробування визначить відхилення втрат х.х. Усі виміри робилися при частоті 50Гц. Напруга(525 В) складає 5% від номінального. Втрати приладів склали 20 Вт.

Втрати, приведені до номінальної напруги обмотки НН :

$$P_{\text{прив.С}} = P_{\text{прив.А}} = (428 - 20) * (10500/525) * 1,8 = 89,64 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{прив.В}} = (554 - 20) * (10500/525) * 1,8 = 121,7 \text{ кВт}$$

$$P_0 \text{ прив} = (P_{\text{прив.С}} + P_{\text{прив.В}} + P_{\text{прив.А}}) / 2 = (89,64 + 89,64 + 121,7) / 2 = 150,5 \text{ кВт},$$

що 0,5% більше заводських втрат холостого ходу.

Втрати  $P_{\text{прив.С}}$  і  $P_{\text{прив.А}}$  рівні між собою, а  $P_{\text{прив.В}}$  більше втрат  $P_{\text{прив.С}}$  і  $P_{\text{прив.А}}$ :

$$\frac{P_{\text{В}}}{P_{\text{А}}} = \frac{P_{\text{В}}}{P_{\text{С}}} = \frac{121,7}{89,64} = 1,358$$

Усе це вказує, що контрольований параметр трансформатора знаходиться в допустимих прибудовах. На основі проведених випробувань виявлена несправність – пробій.

### Дослід 3.

Провівши виміри на наступному об'єкті, виявлено, що опір обмотки кожної з трьох фаз 0,011 Ом. Дефектної фази або фаз (відмінність на фазах більше 2%) не виявлене, отже, можна переходити по графові до наступного випробування.

Для ухвалення рішення про можливість подальшої експлуатації трансформатора проводиться, комплексний аналіз вимірних значень параметрів ізоляції, зіставлення вимірних абсолютних значень параметрів з раніше вимірними значеннями, а також аналізується динаміка змін цих параметрів. Опір ізоляції обмоток 1,3МОм при  $U \leq 35 \text{ kV}$ . Провівши випробування, мегомметр показав 1,25Мом – несправність не виявлена, це свідчить про повну працездатність трансформатора і не вимагає додаткової діагностики.

При проведенні випробувань і виявленні таких несправностей як: міжвиткове замикання, пробій, рекомендується провести додаткове випробування, яке дозволить виявити деформацію обмотки. Результати вимірів на трансформаторі, показали, що є істотні зміни  $Z_k$ , причому найбільша не симетрія по фазах виявлена в схемах вимірів за участю обмотки СН.

Додатковий контроль показав найбільші зміни  $Z_k$  між регулювальною обмоткою і обмоткою СН (СН – РО), таблиця 5.2. Позитивні значення змін  $Z_k$  повинні відповідати деформаціям, що збільшують відстань між відповідними обмотками; негативні – їх зближенню. Знаки змін  $Z_k$  відповідають взаємному розташуванню обмоток в трансформаторі, що діагностується

Таблиця 5. 2 – Постановка діагноз: деформація обмотки СН

Схема виміру	Фаза	$Z_k$ , Ом	$Z_{кб}$ , Ом	$\Delta Z_k$ , %
ВН – СН	А	86,3		3,5
	В	88,1	83,4	5,6
	С	90,6		8,6
ВН – НН	А	272		-4,9
	В	277	286	-3,1
	С	272		-4,9
СН – НН	А	22,0		-3,1
	В	22,0	22,7	-3,1
	С	21,0		-7,5
СН – РО	А	12,9		-5,1
	В	12,7	13,6	-6,6
	С	12,2		-10,3

Для обліку можливих неточностей вимірів з метою отримання достовірного результату в алгоритмі передбачена можливість коригування нормативу бракування по опору короткого замикання. В якості початкового значення, береться значення 3(5)% для усіх можливих поєднань обмоток. У разі, якщо  $\Delta Z_k$  за абсолютною величиною перевершує норматив бракування для усіх пар обмоток, то в алгоритмі передбачено його збільшення з кроком 0,5% до тих пір, поки хоч би одно з обмотувальних поєднань цьому нормативу не задовольнятиме.

## 5.2 Розробка рекомендацій по застосуванню методу

Розроблена граф-модель проста в застосуванні і дозволяє в короткі терміни і з мінімальними витратами встановити точний стан обмоток трансформатора.

Для застосування на практиці розробленої моделі потрібні: персональний комп'ютер, дані випробувань і вимірів параметрів, паспортні дані трансформатора.

Спочатку необхідно визначити чи знаходиться параметр опору обмоток постійному струму у межах працездатного стану або є його відхилення. Залежно від результату першого випробування перевірка (опір постійному струму) йде перевірка опору обмоток або коефіцієнта кута діелектричних втрат. Контрольований параметр, що визначає втрати холостого ходу, перевіряється при відхиленні  $\text{tg } \Delta$  і залежно від свого результату свідчить про наявність міжвиткового замикання або пробую.

Додаткові результати можна отримати, провівши перевірку параметра опору короткого замикання. Цей параметр дозволяє виявити деформацію обмотки (при перевищенні значення  $Z_K$ ). У режимі КЗ струми обмоток обмежуються тільки внутрішнім опором трансформатора, що відповідає паралельному включенню опорів  $Z_0$  і  $Z_K$ , або тільки  $Z_K$ , або тільки  $X_K$ , яке звичайне приблизно на порядок менше опору навантаження. Тому струми КЗ приблизні на порядок більше робочих струмів трансформатора і є аварійними. Трансформатор має бути здатний витримувати динамічну і термічну дію цих струмів впродовж декількох секунд, поки він не буде відключений релейним захистом.

При значеннях близьких до межі контрольованого параметра, але що свідчать про працездатність необхідно перевірити відсоток відмінності з верхньою межею контрольованого параметра. Якщо він дорівнює одному

відсотку 1% і менше, потрібно негайний ремонт цієї частини щоб уникнути дорожчих поломок.

Результати перевірки стану обмоток можна отримати при використанні програми описаної нижче, або вручну пройшовши по вершинах граф–моделі і зафіксувавши результати в матриці виявлення несправності. Тут представлені чотири матриці.

Перша матриця показує наявність обриву ланцюга, друга — міжвиткове замикання, третя замикання на корпус(пробій) і четверта показує відсутність несправностей :

$$\begin{array}{l}
 C1= \left| \begin{array}{cccc} \Delta 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right| \\
 \\
 C2= \left| \begin{array}{cccc} \Delta 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta 2 & \Delta 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right| \\
 \\
 C3= \left| \begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta 1 & \Delta 2 & 0 & \Delta 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right| \\
 \\
 C4= \left| \begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right|
 \end{array}$$

Представлені матриці можна використати як шаблони при визначенні несправностей. Де: C1– обрив ланцюга, C2– міжвиткове замикання, C3– пробій, C4– працездатний.

Спростити процес оцінки стану обмоток допоможе алгоритм, написаний на мові C++.

```
include // стандартне введення і виведення
#include // графічні функції
#include // математичні функції
int (float a)
if ( a > 2 ) { int (float b)
if ( b >1 ) { return “обрив”}
else { int (float d) if (d >5 )
return “замикання на корпус”}
else {return “пробій”}
} else { int (float c)
if ( c>1, 5& c<=1.3 ) { return “справний”}
else { int (float d) if (d >5 )
return “замикання на корпус”}
else {return “пробій”}
main ()
}
```

На практиці часі всього зустрічається ушкодження обмоток трансформатора.

Граф – модель на основі орієнтованого графа можна розширити, за рахунок додаткових контрольованих параметрів і зв'язку між ними, тоді вона може виявляти несправності пов'язані не лише з обмотками, але і з магнітною системою трансформатора, відведеннями, трансформаторною олією і іншими частинами ТР.

При збільшенні контрольованих параметрів ця модель ускладниться, але не втратить своєї наочності, що є однією з основних переваг граф – моделей.



### **5.3 Аналіз вимог нормативних документів до "стану обмоток" трансформаторів**

Обмотки трансформатора є засадничою частиною, і саме не їх рахунок приходиться більшість поломок. Несправності в обмотках трансформатора можуть нанести великий фізичний і матеріальний ущерб об'єкту. Тому дуже важливо підтримувати працездатність і справність цього вузла трансформатора.

Для продовження терміну життя трансформатора, а також, його подальшої експлуатації потрібне точне розуміння об'єкту, а також знання норм працездатності трансформатора.

У справжній час для силових трансформаторів встановлюють наступні показники надійності :

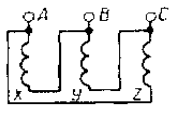
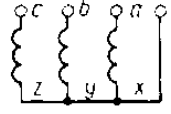
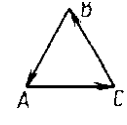
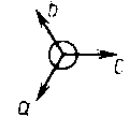
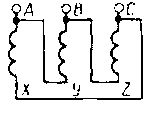
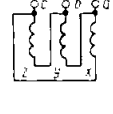

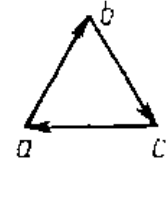
- безвідмовне напрацювання – 25000 годин і більше;
- безвідмовної роботи за 8800 годин – з напрацюванням не менше 0,995;
- термін служби не менше 12 років перед першим капітальним ремонтом.

Обмотки трансформатора є його засадничою частиною. Основні вимоги і норми відносно обмоток трансформаторів приведені в ДСТУ 3270–95, Контроль стану ізоляції трансформаторів перед введенням у експлуатацію – Норми випробування електрообладнання ДОДАТОК Б (обов'язковий) і Методичні рекомендації з оцінки технічного стану силових трансформаторів напругою від 35 кВ до 750 кВ. Затверджені Наказом Міненергуюгільля України від 28.10. 2014 року № 761. Для надійної і безвідмовної роботи потрібне дотримання норм, вимог, а також

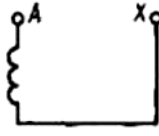
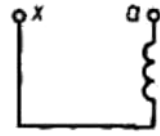


стандартизації позначення. Схеми, а також групи з'єднання обмоток, повинні відповідати представленим в таблицях 5.1–5.9.

Таблиця 5.1 – Схеми і групи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів

Схема з'єднання обмоток		Діаграма векторів напруги холостого ходу		Умовне позначення
ВН	НН	ВН	НН	
1	2	3	4	5
				У/У <sub>н</sub> -0
				У <sub>н</sub> /У-0
				У/Д-11
				У <sub>н</sub> /Д-11
				У/З <sub>н</sub> -11

1	2	3	4	5
				Д/УН-11
				Д/Д-0

Таблиця 5.2 Схема і група з'єднання обмоток однофазних двухобмоточного трансформатора

Схема з'єднання обмоток		Діаграма векторів напруги холостого ходу		Умовне позначення
ВН	НН	ВН	НН	
				1/1-0

Таблиця 5.3 – Схеми і групи з'єднання обмоток трифазних трьохобмоткових трансформаторів

Схема з'єднання обмоток			Діаграма векторів напруги холостого ходу			Умовне позначення
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
						У <sub>Н</sub> /У <sub>Н</sub> /Д-0-11
						У <sub>Н</sub> /Д/Д-11-11

Таблиця 5.4 – Схема і група з'єднання обмоток трифазних трьохобмоткових автотрансформаторів

Схема з'єднання обмоток		Діаграма векторів напруги холостого ходу		Умовне позначення
ВН и СН	НН	ВН и СН	НН	
				У <sub>н</sub> авто/Д-0-11

Таблиця 5.5 – Схема і група з'єднання обмоток однофазних трьохобмоткових автотрансформаторів

Схема з'єднання обмоток		Діаграма векторів напруги холостого ходу		Умовне позначення
ВН и СН	НН	ВН и СН	НН	
				1 авто/1-0-0

Таблиця 6.6 – Схема і група з'єднання обмоток трифазних двообмоткових автотрансформаторів

Схема з'єднання обмоток	Діаграма векторів напруги холостого ходу	Умовне позначення
ВН и НН	ВН и НН	
		УН авто

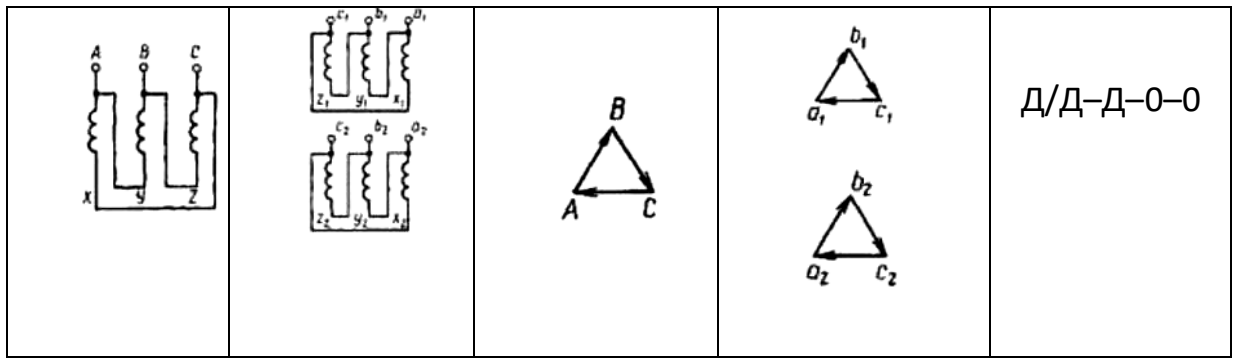
Вказані в таблицях 5.1–5.8 схем з'єднання обмоток не відносяться до дійсного розташування відведень активної частини і введень на кришці бака трансформатора.

Таблиця 6.7 – Схема і група з'єднання обмоток однофазних двообмоткових трансформаторів з розщепленою обмоткою НН

Схема з'єднання обмоток		Діаграма векторів напруги холостого ходу		Умовне позначення
ВН	НН	ВН	НН	
				1/1-1-0-0

Таблиця 6.8 – Схеми і групи з'єднання обмоток трифазних двообмоткових трансформаторів з розщепленою обмоткою НН

Схема з'єднання обмоток		Діаграма векторів напруги холостого ходу		Умовне позначення
ВН	НН	ВН	НН	
				УН/Д-Д-11-11



Схеми з'єднання обмоток ВН вказані з боку відведень обмотки ВН, а схеми з'єднання обмоток СН і НН – з боку відведень обмотки НН

*Примітка* – Схеми і групи з'єднання обмоток однофазних трансформаторів для праці в трифазному гурті вказують в НД на ці трансформатори.

Використовуючи трансформатори з правильним з'єднанням обмоток, ми не лише заощадимо на передчасному ремонті, але і зменшимо втрати холостого ходу.

Якщо трансформатор має нейтраль, розщеплену на дві частини обмоткою НН, номінальна потужність кожної з її частин має бути, як правило, дорівнює 50% номінальною потужності трансформатора.

Допускається робота трансформаторів 110, 150 і 220 кВ, що мають випробувальну напругу нейтралі відповідно до 100, 130 і 200 кВ, з розземленою нейтраллю за умови приєднання до виведення нейтралі вентильного розрядника відповідного класу ізоляції. В цьому випадку мають бути вжиті відповідні заходи (за допомогою облаштувань релейного захисту і автоматики, оперативні заходи та ін.), що унеможливають роботу трансформатора в нормальних режимах на ділянку мережі з ізолюваною нейтраллю, таблиця 6.9.

Таблиця 6.9 – Напряга невживаної обмотки

Напряга обмотки ВН кВ	Напряга невживаної обмотки, кВ першою від магнітопроводу між концентрами обмотки ВН	
110	15	20
150	20	35
220 і вище	35	35

До обмоткам усіх трансформаторів для захисту їх від перенапружень необхідно приєднувати вентиляльні розрядники згідно ПУЕ, що постійно забезпечують захист обмоток відповідно до рівня їх ізоляції.

Невживані обмотки нижчої(чи середнього) напруги трансформаторів і нижчої напруги автотрансформаторів мають бути сполучені в зірку або трикутник і захищені від перенапружень.

Перша від магнітопроводу обмотка захищається заземленням однієї фази або нейтралі або ж вентиляльними розрядниками відповідного класу напруги, приєднаними до введення кожної фази. Обмотки, розташовані між концентрами обмоток ВН, захищають тільки вентиляльними розрядниками, приєднаними до введення кожної фази. Захист невживаних обмоток не потрібно, якщо до обмотки постійно(без комутаційної апаратури) приєднана кабельна лінія завдовжки не менше 30 м, за наявності автоматичного повторного включення на під'єднуванні обмотки, а також при оперативних перемиканнях.

Масляні трансформатори допускають тривале перевантаження кожної обмотки струмом, що перевищує на 5% від номінального, якщо напруга ні на одній з обмоток не перевищує номінального; при цьому для обмотки з відгалуженнями навантаження не повинне перевищувати 1,05 номінального струму відгалуження.



У трьохобмоткових трансформаторів допускається будь-який розподіл тривалих навантажень по обмоткам за умови, що жодна з обмоток не буде навантажена струмом, що перевищує номінальний, а температура верхніх шарів олії також не перевищуватиме номінальних значень.

Усі трансформатори, окрім елементів активної частини, що мають підвищені нагриви, залежно від режиму роботи допускають систематичні перевантаження, значення і тривалість яких регламентуються в ДСТУ 14209–85. Трансформатори силові масляні загального призначення. Допустимі навантаження(зі Зміною N 1).

Систематичні перевантаження трансформаторів допускаються залежно від характеру, добового графіку навантаження, температури охолоджувального середовища і недовантаження в літній час.

Допустиме значення перевантаження і її тривалість для масляних трансформаторів потужністю до 250 МВ·А, виготовлених відповідно до ДСТУ 11677–65 і 11677–75, встановлюються по графіках здатності навантаження згідно ДСТУ 14290–69 "Трансформаторів і автотрансформатори силові масляні. Здатність навантаження». Ці вказівки поширюються і на трансформатори потужністю більше 250 МВ · А, якщо в стандартах або технічних умовах на такі трансформатори немає інших вказівок по здатності навантаження. При цьому систематичне перевантаження трансформатора не повинне перевищувати 50% від номінальної потужності.

Систематичні перевантаження більш ніж 1,5–кратним номінальним струмом можуть бути допущені тільки за узгодженням із заводом-виробником.

Важливою частиною в роботі трансформатора є перевантаження. Перевантаження обмоток трансформаторів, виготовлених відповідно до ДСТУ 11677–65 до 1 липня 1970 р., забезпечених введеннями на напругу 110 кВ і вище, а також введеннями на нижчу напругу на номінальний струм 3000

А і більше, допускаються струмом, не більше ніж на 10 % перевищуючим номінальний струм зазначених уведень.

Допустимі перевантаження масляних трансформаторів, виготовлених по ДСТУ 401–41, встановлюються по графіках здатності (згідно ДСТУ 14290–69) навантаження, але еквівалентна температура приймається на 5 °С вище розрахунковою для місцевості, де встановлений трансформатор.

Не допускаються перевантаження трансформаторів, виготовлених відповідно до ДСТУ 401–41, під час роботи їх при температурі охолоджувальної води вище 25 °С або при середньодобовій температурі охолоджувального повітря вище 30 °С.

Допустимі перевантаження трансформаторів на напругу до 500 кВ включно, виготовлених за технічними умовами до випуску ДСТУ 11677–65, визначаються згідно ДСТУ 14290–69 по графіках здатності навантаження, якщо розрахункове перевищення середньої температури обмотки складає 65 °С, і по графіках здатності навантаження для еквівалентної температури на 5 °С вище розрахунковою для цієї місцевості, якщо розрахункове перевищення середньої температури обмотки складає 70 °С.

Допустимі перевантаження трансформаторів на напругу 750 кВ визначаються згідно з вказівками технічних умов на ці трансформатори.

Перевантаження трьохобмоткових трансформаторів, вказані вище, відносяться до найбільш навантаженої обмотки.

Трансформатори з розщепленою обмоткою допускають такі ж перевантаження кожної гілки, віднесені до її номінальної потужності, як і трансформатори з нерозщепленою обмоткою.

Дотримуючись усіх вимог і норм відносно обмоток трансформатора, тим самим збільшується термін служби, зменшуються втрати і перевантаження. Дотримання нормативних вимог є важливою частиною при виготовленні, діагностуванні і ремонті трансформатора.

## ВИСНОВКИ

Результати та основні положення магістерської роботи :

1. Для силового трифазного трансформатора розглянуті основні види несправностей і відмов.

2. На основі аналізу несправностей і відмов вибрані діагностичні ознаки і складений перелік контрольованих параметрів. Проведено ранжирування несправностей і контрольованих параметрів. Побудовані схеми причинно-наслідкових зв'язків несправностей, діагностичних ознак і параметрів.

3. Проведений аналіз методів побудови діагностичних моделей ТР. Розроблений принцип побудови граф-моделі для визначення стану обмоток ТР

4. Розроблена методика оцінки стану обмоток ТР. Надані рекомендації по застосуванню розробленої методики.

7. Представлені приклади практичного використання методики оцінки стану обмоток трансформатора.

8. Систематичні перевантаження більш ніж 1,5-кратним номінальним струмом можуть бути допущені тільки за узгодженням із заводом-виробником.

Важливою частиною в роботі трансформатора є перевантаження. Перевантаження обмоток трансформаторів, виготовлених відповідно до ДСТУ 11677–65 до 1 липня 1970 р., забезпечених введеннями на напругу 110 кВ і вище, а також введеннями на нижчу напругу на номінальний струм 3000 А і більше, допускаються струмом, не більше ніж на 10 % перевищуючим номінальний струм зазначених уведень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Журахівський А.В., Кінаш Б.М., Пастух О.Р. Надійність електричних систем і мереж: [навч. посіб.]. – НУ «ЛП», 2016. – 280 с.
2. Надійність електроенергетичних систем: [навч. посіб.]/ С.В.Казанський, Ю.П.Матеєнко, Б.М.Сердюк.. – К.:НТУУ «КПІ», 2011. – 216
3. Казак В. М., Доценко Б. І., Кузьмін В. П. та ін. Надійність та діагностика електрообладнання: [навч. посіб.].–К: НАУ, 2013. — 280 с.
4. ДСТУ 2105–92 (ГОСТ 11920–93) Трансформатори силові масляні загального призначення напругою до 35 кВ включно. Технічні умови Держстандарт України, 1992 [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=73427](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73427)
5. ДСТУ 2104–92 (ГОСТ 12965–93) Трансформатори силові масляні загального призначення класів напруги 110 і 150 кВ. Технічні умови Держстандарт України, 1992 [https://dnaop.com/html/62233/doc-ДСТУ\\_2104-92](https://dnaop.com/html/62233/doc-ДСТУ_2104-92)
6. TMDS Transformer monitoring and diagnostic system [Electronicresource]. – Access mode: <http://www.energy.siemens.com/us/en/services/power-transmission-distribution/transformer-lifecyclemanagement/transformer-monitoring-diagnostic-system.htm> (accessed May 1, 2020). 70. Power transformers. Part 7. Loading guide for oil-immersed power transformers : IEC 60076–7:2005. – Geneva : IEC, 2010. – 62 p.
7. Діагностика стану електротехнічного обладнання: Курс лекцій [навч. посіб.]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійних програм «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / КПІ ім.Ігоря

Сікорського; уклад.: О. Р. Проценко Я. –Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 162 с.

8. Жежеленко І.В., Півняк Г. Г., Трофімов Г. Г., Папаїка Ю.А. Реактивна потужність в електричних мережах: монографія; М–во освіти і науки України, Нац. техн. ун–т "Дніпровська політехніка". – Дніпро: НТУ "ДП", 2020. – 72 с.

9. СОУ–Н ЕЕ 20.302:2007 Норми випробування електрообладнання. Київ. Міністерство палива та енергетики. України Об'єднанн енергетичних підприємств "Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики", 2007. –271 с.

10. Белікова Л. Я., В. П. Шевченко В. П. Електричні машини: [навч. посіб.] – О.: Наука і техніка, 2012.– 480 с.

11. Монтаж, наладка і експлуатація електрообладнання. Конспект лекцій (для студентів 5 курсу денної і 6 курсу заочної форм навчання спеціальності 7.0906003 – «Електричні системи електроспоживання») / Авт. А.В. Хитров – Харків: ХНАМГ, 2009. – 328 с.

12. СОУ–Н ЕЕ 20.302:2020Норми випробування електрообладнання НЕК "УКРЕНЕРГО" 2020 243 с.

13. Матвійчук В.А., Рубаненко О.Є., Гунько І.О. Діагностування електрообладнання: [навч. посіб.] –Вінниця : ВНАУ, 2020. 138 с.

14. Кислицын А.Н. Трансформатори: : [навч. посіб. –по курсу "Електромеханіка"], 2001.– 115с.

15. Рубаненко О. Є., Лабзун М. П., Грищук М. О. Обґрунтування можливості виявлення дефектів деформації обмоток силового трансформатора за результатами вимірювань FRA //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2017. – №. 186. – С. 103–106.

16. Чорний О.П., Зачепа Ю.В., Титюк В.К., Чорна О.А. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів : [навч. посіб.]– Кременчук : ПП Щербатих А.В., 2019. – 122 с.

17. Боянич Б., Поляк М. : Вимірювальні трансформатори – діагностика як передумова надійної роботи. – Кончар.: Електротехнічний інститут, 2007.- 205с.
20. ДСТУ 19.701–90(ИСО 5807–85) "Єдина система програмної документації".
21. Комплексне обстеження силових трансформаторів. URL: <http://www.diaworld.ru/about/publications/1424/>
22. Грабко В. В. Діагностування трансформаторів власних потреб та систем технологічних захистів енергоблока теплової електростанції. – Вінниця :ВНТУ, 2010. – 124 с.
23. Піротті О. Є., Баленко О. І., Бречко В. О, Гузін М. Ю. Аналіз принципів побудови та функціональних можливостей систем моніторингу стану високовольтних силових трансформаторів Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика надійність та енергоефективність, № 1 (1) 2020стор. 61–70 <http://erec.khpi.edu.ua/index>
24. Монтаж та випробування електричних машин: : [навч. посіб. –по курсу "Електромеханіка"], /Уклад. М. Г. Анпілогов, О. М. Давидов, М. О. Реуцький. – К.: НТУУ “КПІ”, 2013. – 117 с.
25. Паламар М. І. Контрольно-вимірювальні комплекси: Конспект лекцій. – Тернопіль: ТНТУ, 2014. – 157 с.