

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Первов Віталій Вікторович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Розробка алгоритму визначення аварійних режимів роботи силових
трансформаторів
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Первов В.В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Савченко Л.Г.

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.і.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Первов В.В. Розробка алгоритму визначення аварійних режимів роботи силових трансформаторів. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Надійність енергопостачання значною мірою залежить від безперебійної роботи силових трансформаторів, що є критично важливим елементом енергетичної системи. Виникнення аварійних режимів їх роботи може призвести до серйозних наслідків, включаючи відключення споживачів та пошкодження обладнання. В роботі розглянута розробка ефективного алгоритму своєчасного виявлення аварійних режимів силових трансформаторів

Ключові слова: силові трансформатори, метод частотного відгуку, системи моніторингу.

ABSTRACT

Pervov V.V. Development of an algorithm for determining emergency operating modes of power transformers. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The reliability of power supply largely depends on the uninterrupted operation of power transformers, which are a critical element of the power system. The occurrence of emergency operating modes can lead to serious consequences, including consumer outages and equipment damage. The work considers the development of an effective algorithm for the timely detection of emergency modes of power transformers.

Keywords: power transformers, frequency response analysis, monitoring systems.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. ВИДИ ПОШКОДЖЕНЬ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	6
1.1. Основні види пошкодження обмотки трансформатора .	6
1.2 Причини несправності магнітопроводів, аналіз та наслідки	7
1.3 Пошкодження бака та системи охолодження силового трансформатора.	8
Висновок по першому розділу	9
2. СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ. АНАЛІЗ ТА НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ	10
2.1 Метод частотного відгуку	13
Висновки по другому розділу	16
3. ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИБОРУ ЕФЕКТИВНОГО ТЕСТОВОГО СИГНАЛУ З МЕТОЮ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ.	17
Висновки по третьому розділу.	19
4. ПРОПОЗИЦІЇ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	20
4.1 Алгоритм роботи системи моніторингу	20
4.2 Схема підключення системи моніторингу	21
4.3 Області застосування системи моніторингу	25
Висновки по четвертому розділу	26
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	27
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	28

ВСТУП

Ефективна та надійна робота силових трансформаторів є критично важливою для забезпечення безперебійного електропостачання. Аварійні режими роботи, викликані перевантаженнями, короткими замиканнями, зниженням рівня масла та іншими факторами, можуть призвести до серйозних пошкоджень обладнання та тривалих перерв у електропостачанні. Тому, розробка надійного алгоритму визначення аварійних режимів роботи силових трансформаторів є **актуальною** задачею.

Запропонований алгоритм повинен враховувати декілька ключових аспектів. По-перше, необхідний моніторинг критичних параметрів трансформатора, таких як струм, напруга, температура масла та газу, тиск, а також розчинені гази в маслі. По-друге, алгоритм повинен включати систему обробки отриманих даних, використовуючи статистичні методи та методи штучного інтелекту для виявлення аномалій. По-третє, необхідно розробити набір критеріїв, на основі яких буде прийматись рішення про настання аварійного режиму. Ці критерії мають враховувати не лише поточні значення параметрів, але й швидкість їх зміни, а також історичні дані про роботу трансформатора.

Крім того, алгоритм повинен бути інтегрований з існуючою системою управління електромережою, що дозволить швидко реагувати на виявлені аварійні режими, наприклад, шляхом автоматичного відключення трансформатора або перерозподілу навантаження.

Впровадження розробленого алгоритму визначення аварійних режимів роботи силових трансформаторів сприятиме підвищенню надійності електропостачання, зниженню витрат на ремонт та заміну обладнання, а також зменшенню ризику виникнення аварійних ситуацій. Подальші дослідження повинні бути направлені на вдосконалення алгоритму, враховуючи нові дані про роботу трансформаторів та застосування сучасних технологій обробки даних.

Метою розробки алгоритму визначення аварійних режимів роботи силових трансформаторів є забезпечення надійного та ефективного функціонування енергетичної системи шляхом своєчасного виявлення та попередження виникнення аварійних ситуацій у трансформаторному обладнанні.

Предметом розробки є створення математичної моделі та обчислювального алгоритму, який, спираючись на дані датчиків струму, напруги, температури, а також результати аналізу розчинених газів у трансформаторному маслі.

Об'єктом даного дослідження є процес розробки алгоритму, призначеного для ідентифікації аварійних режимів роботи силових трансформаторів.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

1. Первов В. В.

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ
МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРАНСФОРМАТОРА
«СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ 31 жовтня 2024 року м. Житомир.

2. Хаб`юк В. Ю., Первов В. В..

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ
КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ.
ЛІНІЙНА МЕРЕЖА

НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу
студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей НАДІЙНОСТІ
ЕНЕРГОСИСТЕМИ 23 квітня 2025 р. м. Житомир.

РОЗДІЛ 1

ВИДИ ПОШКОДЖЕНЬ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Силові трансформатори є критично важливим елементом сучасних електроенергетичних систем. Їх надійна робота необхідна для забезпечення безперебійного електропостачання споживачів. Проте, в процесі експлуатації трансформатори піддаються різноманітним впливам, що можуть призвести до їх пошкоджень та виходу з ладу.

Основні види пошкоджень силових трансформаторів можна класифікувати за кількома ознаками. Найперше, за місцем виникнення: пошкодження обмоток (міжвиткові замикання, пробій ізоляції на корпус, обрив провідників), пошкодження магнітопроводу (замикання листів, руйнування конструкції), пошкодження ізоляції (старіння, забруднення, зволоження), пошкодження бака та системи охолодження (протікання масла, пошкодження радіаторів, вихід з ладу насосів).

За характером розвитку пошкодження діляться на поступові (внаслідок старіння, перевантажень, впливу навколишнього середовища) та раптові (внаслідок коротких замикань, перенапруг, механічних пошкоджень).

Окремо виділяють електричні пошкодження (пробій ізоляції, короткі замикання), термічні пошкодження (перегрів обмоток, магнітопроводу), механічні пошкодження (деформація обмоток, руйнування конструкції) та хімічні пошкодження (розкладання масла, корозія металів).

1.1 Основні види пошкодження обмотки трансформатора

Основні види пошкодження обмотки трансформатора наступні:

1. Коротке замикання: несправності через надструм або коротке замикання

можуть призвести до раптового збільшення струму в обмотці, спричиняючи коротке замикання в обмотці. Це може призвести до локального нагрівання, горіння ізоляційного матеріалу та навіть ризику пожежі в обмотці.

2. Перегрів: Тривала робота під високим навантаженням або недостатнє

охолодження може призвести до надмірного підвищення температури обмотки, що призведе до старіння ізоляційного матеріалу та зниження його електроізоляційних характеристик, що зрештою призведе до виходу з ладу обмотки.

3. Старіння ізоляції: ізоляційний матеріал обмотки з часом погіршується, що призводить до зниження електричних характеристик ізоляції та підвищеного ризику пошкодження обмотки.

4. Волога та забруднення: Вплив на обмотку вологи та забруднюючих речовин може спричинити погіршення якості ізоляційного матеріалу, збільшуючи ризик електричного пробоя та знижуючи ефективність ізоляції обмотки.

5. Механічна напруга: під час роботи обмотка може зазнавати механічних навантажень, таких як вібрація, удари або електромагнітні сили, що може призвести до ослаблення або поломки провідників обмотки.

6. Перенапруги: раптові випадки перенапруги, такі як удари блискавки або збої в системі живлення, можуть спричинити стрибок напруги в обмотці, пошкодивши ізоляційний матеріал і саму обмотку.

7. Корозія: обмотка може піддаватися хімічній корозії, особливо під впливом корозійного середовища, такого як кислотне або лужне середовище.

8. Пробою ізоляції: наявність будь-якої тріщини або пошкоджень ізоляції всередині обмотки може призвести до пробоя напруги та пошкодження обмотки.

9. Несправність антипіренів: ізоляція обмоток трансформатора зазвичай містить антипірени для зменшення ризику пожежі. Відсутність антипіренів може збільшити ризик пожежі[1].

1.2 Причини несправності магнітопроводів, аналіз та наслідки

Магнітопровід, будучи ключовим елементом електричних машин та трансформаторів, вимагає ретельного контролю та діагностики. Відхилення в його роботі можуть призвести до серйозних збоїв та аварій. Серед основних

причин несправності магнітопроводів слід виділити декілька ключових факторів.

По-перше, дефектність міжлистової ізоляції та місцеві замикання пластин сталі створюють контури для циркуляції струмів Фуко, що призводить до локального перегріву, іноді досягаючи критичних значень, так званої "пожежі" в сталі. Це суттєво знижує ефективність пристрою та може призвести до руйнування ізоляції обмоток.

По-друге, підвищена вібрація магнітопроводу, викликана як електричними, так і механічними чинниками, сприяє пошкодженню ізоляції та збільшенню втрат на перемагнічування. Це, в свою чергу, також підвищує температуру та знижує термін служби магнітопроводу.

По-третє, збільшені зазори в стиках між пластинами активної частини та підвищена товщина прокладок в стиках ярм та колон в стиковому магнітопроводі порушують однорідність магнітного поля, збільшують магнітний опір та призводять до нерівномірного розподілу магнітного потоку. Це знижує ефективність магнітопроводу та може спричинити перевантаження окремих ділянок[2].

1.3 Пошкодження бака та системи охолодження силового трансформатора.

Силовий трансформатор, як ключовий елемент енергетичної системи, вимагає постійного та ретельного моніторингу, зокрема, щодо цілісності бака та ефективності системи охолодження. Пошкодження цих компонентів може призвести до серйозних наслідків, від зниження надійності трансформатора до його повного виходу з ладу.

Пошкодження бака силового трансформатора, найчастіше, пов'язане з корозійними процесами, механічними впливами або вібрацією. Корозія, спричинена впливом атмосферних факторів та забруднення навколишнього середовища, поступово руйнує металеву структуру бака, призводячи до виникнення мікротріщин та, згодом, до витoku трансформаторного масла.

Механічні пошкодження, викликані ударами або деформацією, також стають причиною втрати герметичності. Вібрація, що виникає під час роботи трансформатора, може посилювати корозійні процеси та призводити до розгерметизації з'єднань.

Система охолодження, яка зазвичай представлена радіаторами, масляними насосами та системою циркуляції масла, забезпечує відведення тепла, що виділяється в процесі роботи трансформатора. Пошкодження радіаторів, у вигляді витіку масла або їх механічної деформації, знижує ефективність тепловідведення. Несправність масляних насосів або забруднення системи циркуляції масла призводить до порушення циркуляції охолоджуючої рідини, що викликає перегрів обмоток трансформатора.

Наслідки пошкодження бака та системи охолодження можуть бути значними. Витік трансформаторного масла не тільки призводить до екологічного забруднення, але й до зниження рівня масла в баку, що викликає погіршення охолодження та, як наслідок, перегрів обмоток. Перегрів обмоток призводить до прискореного старіння ізоляції, збільшення втрат електроенергії та, в кінцевому підсумку, до міжвиткових замикань та виходу трансформатора з ладу[3].

Висновки по першому розділу

Своєчасне виявлення та усунення вищезазначених неполадок є критично важливим для забезпечення надійної та безперебійної роботи електрообладнання.

Дослідження видів пошкоджень силових трансформаторів показує, що для забезпечення їх надійної роботи необхідна систематична діагностика та контроль, спрямовані на виявлення та усунення потенційних причин пошкодження. Це дозволить знизити ризики та забезпечити стабільність електропостачання.

РОЗДІЛ 2

СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ. АНАЛІЗ ТА НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Аналогами системи моніторингу, що розробляється, є комплексна система моніторингу та діагностики силових трансформаторів марки «TDM» від компанії «DIMRUS», зокрема, програмне забезпечення «INVA» та продукція компанії «ProSoft», яка пропонує своїм клієнтам програмне забезпечення до програмованих логічних контролерів[6].

Серед закордонних компаній лідером є «Siemens». Усі вищеперелічені компанії реалізують свою продукцію для автоматизованої системи моніторингу та технічного діагностування. Принциповою відмінністю від даних аналогів є оцінка технічного стану магнітної системи силового трансформатора за амплітудно-частотною характеристикою в режимі «on-line». На сьогодні кожна система моніторингу зобов'язана контролювати стан трансформатора за розчиненим газом у трансформаторній оливі, температурою найбільш нагрітої точки, ефективністю роботи системи охолодження та частковими розрядами.

Кожен з перелічених методів не здатний продіагностувати магнітну систему на предмет деформації обмоток і магнітопроводу [5]. Для подібної діагностики трансформатор вимушено відключають від мережі. Подібний вид дефектів визначається "на око" у випадку серйозної поломки, коли магнітну систему витягують з корпусу трансформатора, що веде за собою значні економічні втрати. У випадку діагностування трансформатора в нерозібраному стані застосовується обладнання на зразок "FreDa" від тієї ж компанії "DIMRUS". Принцип роботи приладу так само, як і пропонований метод, ґрунтується на аналізі амплітудно- частотної характеристики. Даний прилад оснащений генератором частоти та напруги, що дозволяє виявляти широкий спектр пошкоджень магнітної системи. Прилад плавно змінює частоту в діапазоні від 2 Гц до 20 МГц [4]. Пристрій реєструє АЧХ і порівнює

з наявними характеристиками. Залежно від ступеня відхилення можна зробити висновок про характер поломки та її ступінь.

Наступним методом оцінки технічного стану силового трансформатора за допомогою частотної характеристики є частковий розряд (ЧР). Метод є одним з найбільш складних і вимогливих, так як вимагає досить точної настройки від перешкод. Датчики, які використовуються для реалізації цього методу, здатні вловлювати три типи частотного діапазону:

- низькочастотний діапазон від 20 до 500 кГц;
- високочастотний діапазон від 0,5 до 80 МГц;
- надвисокочастотний діапазон від 100 МГц до 2 ГГц.

Також варто зазначити, що можливо реалізувати контроль не лише магнітної системи трансформатора, використовуючи частотний аналіз, але й параметри оливи та кута втрат ізоляції [11]. Такий підхід у моніторингу вважається відносно новим. Пристрої діагностики кута діелектричних втрат працюють за тим же принципом, що й «FreDa», тобто подається сигнал з певною напругою та частотою. Частотний спектр так само змінюється в момент проведення вимірювання, проте головна відмінність полягає саме в частотному спектрі. На відміну від систем контролю магнітної системи, в яких під час вимірювань частота може досягати декількох мегагерц, пристрої, що використовуються для оцінки тангенса кута, подають сигнал від декількох десятитисячних герц до декількох сотень. Тим не менш, метод є досить затребуваним через свою точність та схожість з іншими методами контролю ізоляції [1]. На рисунку 3 наведено залежність тангенса кута діелектричних втрат від прикладеної частоти.

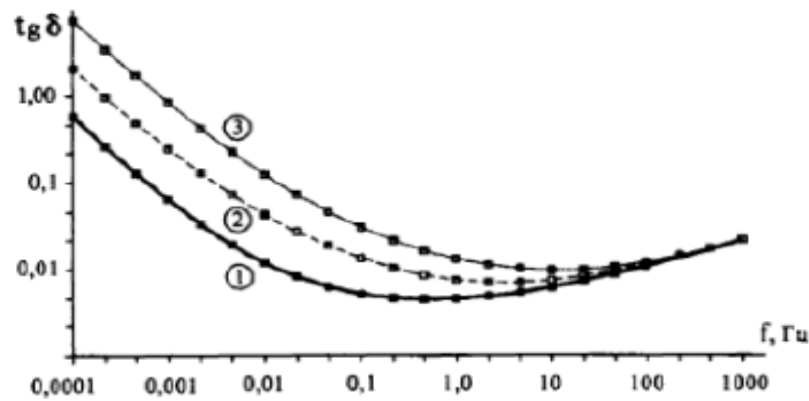


Рисунок 3 – Залежність кута діелектричних втрат від частоти

Графік ілюструє відмінності у величині тангенса кута діелектричних втрат при різному рівні вологовмісту у твердій ізоляції, в даному випадку це 1, 2 та 3% відповідно.

В процесі експлуатації силового трансформатора в його конструкції можуть з'являтися дефекти різного типу. Усі дефекти, які можуть виникнути в трансформаторі, поділяються на механічні та електричні пошкодження. До механічних належать деформація магнітної системи трансформатора, пошкодження ізоляції, порушення функціонування пристрою регулювання під навантаженням (РПН) та системи охолодження. Електричними дефектами є часткові розряди (ЧР).



Рисунок 4 – ТДН-16000/100У1 (а – параметри трансформатора; б – місце плавлення обмотки; в – зміщення обмотки)

У переважній більшості випадків на сьогоднішній день активні системи моніторингу встановлюються на трансформатори класом напруги 220 кВ і вище. Розподільчі та малопотужні трансформатори напругою до 110 кВ залишаються менш захищеними. Але навіть ті трансформатори, які оснащуються системами моніторингу, обслуговуються виходячи зі стандартів, розроблених у минулі десятиліття, що, у свою чергу, може призвести до великих економічних втрат. Так, наприклад, трансформатор ТДН-16000/110У1 (Рисунок 4) зазнав тривалої дії струмів короткого замикання (КЗ), що призвело до деформації та оплавлення низьковольтної обмотки та повної її заміни.

2.1 Метод частотного відгуку

Метод моніторингу трансформатора за розчиненими газами в маслі є досить показовим, проте за його допомогою неможливо продіагностувати магнітну систему на предмет відхилень. Пошкодження та частоти, на яких вони розпізнаються, представлені в таблиці 1 [7].

Таблиця 1 – Домінуючий діапазон частот при різних пошкодженнях

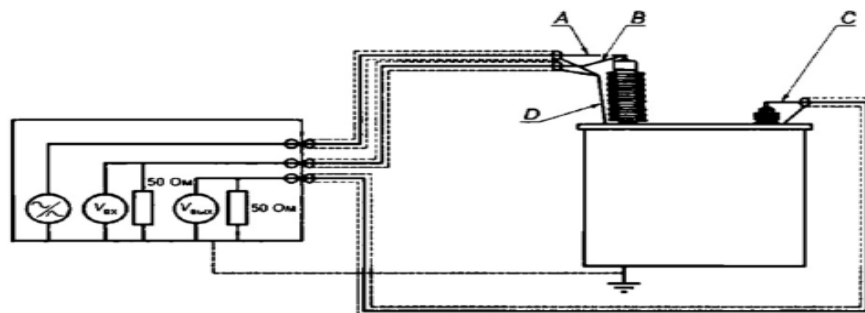
Елементи конструкції трансформатора	Стан елементів конструкції	Діапазон частот
Обмотка	Деформація центральної та нижньої частини обмотки	Від 20 кГц до 400 кГц
	Зміщення центральної та нижньої частини обмотки	Від 400 кГц до 1 МГц
	Зміщення обмоток щодо один одного та затискнутою конструкцією	Від 2 кГц до 20 кГц
	Осьова деформація обмоток	> 400 кГц
	Зміщення дисків	> 100 кГц
	Радіальна деформація обмоток	> 50 кГц
		> 100 кГц
		Від 5 кГц до 500 кГц
	Міжвіткове замикання	> 200 кГц
		<2 кГц
		<10 кГц
	Осьове зміщення	> 500 кГц
		> 100 кГц
		> 100 кГц

Магнітопровід	Деформація магнітопроводу	<10 кГц
Інше	Зміна опору заземлення	Від 400 кГц до 1 МГц
	Залишкове намагнічування	<2 кГц

Як правило, для діагностування магнітної системи трансформатор відключають від мережі. Така незручність зумовлена конструктивними особливостями приладів, якими це роблять. Одним із таких приладів є «FreDa» від компанії «DIMRUS». Принцип роботи «FreDa» базується на аналізі частотної розгортки. По суті, метод досить простий.

Під час калібрування пристрою в нього заноситься «ідеальна» амплітудно-частотна характеристика, і подальші вимірювання, отримані в ході діагностування обмоток трансформатора, порівнюються з нею. Зазвичай вихідну характеристику, з якою в подальшому проводять порівняння, запитують у виробника трансформаторів, або проводять вимірювання на трансформаторі, який не було введено в експлуатацію. Спосіб отримання цілісної характеристики є одним з найпростіших, проте він не гарантує повну відсутність дефектів магнітної системи трансформатора.

Одним з найскладніших методів отримання АЧХ є віртуальне моделювання обмоток трансформатора та магнітопроводу. Тим не менш, цей варіант є одним з найточніших, оскільки під час симуляції частотної характеристики повністю відсутні всі відхилення від номінальних параметрів.



A – кабель джерела; B – кабель подібної напруги; C – кабель вихідної напруги;
D – заземлюючий провідник

Рисунок 5 – Приклад схеми виміру АЧХ

Прилад підключають до вводів або нейтрального проводу трансформатора та подають на них синусоїдальний сигнал, а з кінців інших вводів реєструють відгук і реакцію обмоток на поданий сигнал.

Схематично цей принцип представлено на рисунках 5 і 6 [6].

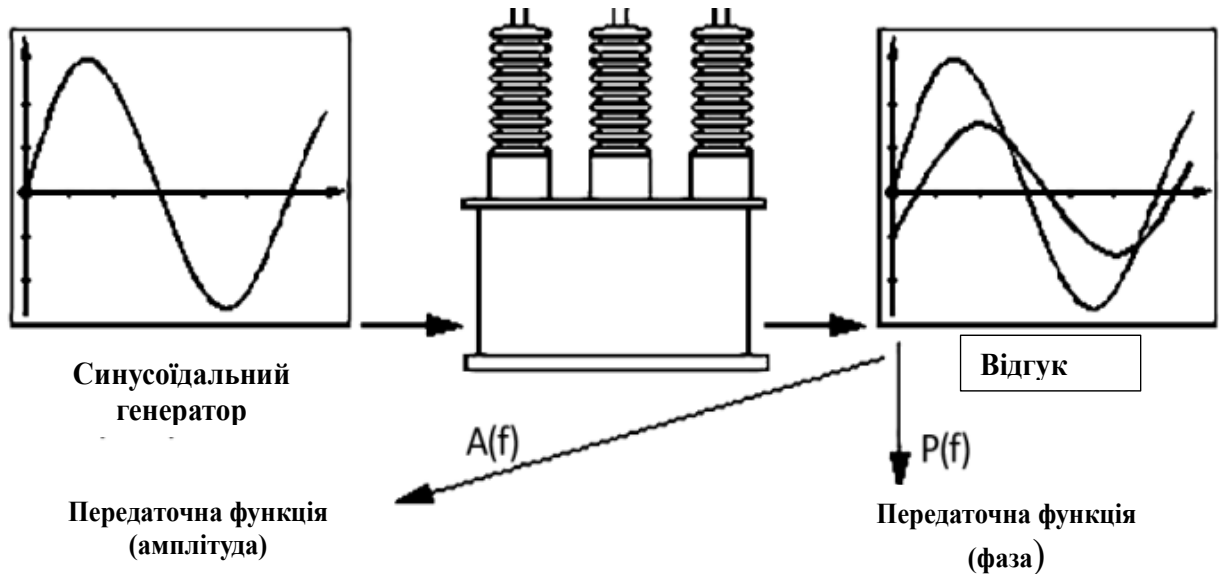


Рисунок 6 – Метод частотного відгука

Як було представлено раніше в таблиці 1, кожному типу пошкоджень відповідає свій частотний діапазон. Так, в межах від 20 Гц до 5 кГц найбільш показовим є індуктивний зв'язок, що, в свою чергу, дозволяє виявити дефекти магнітопроводу; від 5 кГц до 50 кГц характерним є прояв взаємодії з витками; від 50 кГц до 1 МГц можна виявити безпосередню деформацію обмоток; від 1 МГц до 2 МГц виявляють проблеми, пов'язані з осердям або **заземленням** [19].

Приклад, що ілюструє вплив деформації частин трансформатора, представлено на рисунку 7.

На практиці таке вимірювання та порівняння з «ідеальною» характеристикою виглядає згідно з рисунком 8.



Рисунок 7 – Вплив дефектів на сигнал

На практиці таке вимірювання та порівняння з «ідеальною» характеристикою виглядає згідно з рисунком 8.

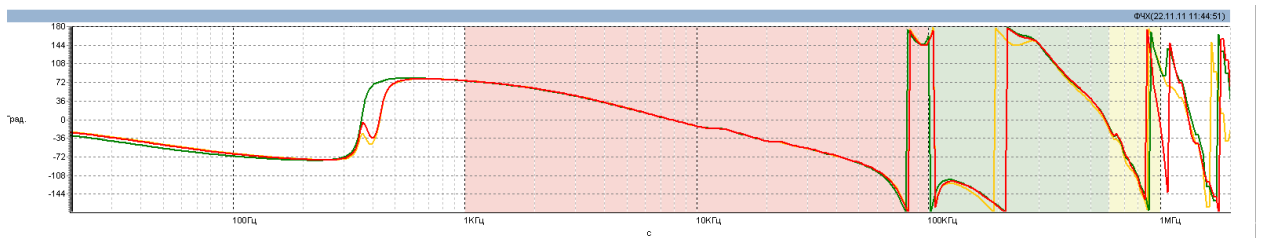


Рисунок 8 – АЧХ ТНЦ 1000000/500У1

Під час випробувань фаз А-В даного трансформатора було виявлено незначну деформацію.

Висновок по другому розділу

У цьому розділі було розглянуто існуючі методи моніторингу технічного стану силового трансформатора, а також пристрої та обладнання. Було стисло викладено основні компанії, що постачають продукцію в області моніторингу та контролю трансформаторного обладнання. Продемонстровано метод діагностики магнітної системи силового трансформатора за амплітудно-частотною характеристикою. Було визначено діапазони частот, які характеризують конкретний вид дефектів магнітної системи.

РОЗДІЛ 3

ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИБОРУ ЕФЕКТИВНОГО ТЕСТОВОГО СИГНАЛУ З МЕТОЮ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ.

Для створення методики «on-line» моніторингу стану трансформатора за АЧХ спочатку було створено лабораторний стенд для перевірки існуючих методів контролю стану обмоток і магнітопроводу за частотною характеристикою. Випробувальний стенд складався з: однофазного силового трансформатора, джерела живлення зі змінною напругою, генератора сигналів, цифрового вольтметра, LRC та осцилографа. Первинний аналіз технічного стану високовольтної та низьковольтної обмоток, а також магнітопроводу проводився згідно зі стандартом ДСТУ ГОСТ 59239:2020 (ІЕС 60076-18:2012) «Трансформатори силові та реактори. Метод вимірювання частотних характеристик» [9]. Під час підготовки до проведення випробувань було вивчено наукові дослідження на подібну тематику, з яких було сформовано теорію та запропоновано найбільш показові спектри частот для досліджуваного трансформатора. Було прийнято рішення провести два вимірювання з класичним синусоїдальним імпульсом та прямокутним. Випробувальний стенд представлено на рисунку 9.



Рисунок 9 – Випробувальний стенд

У першому досліді на обмотки досліджуваного трансформатора подавався синусоїдальний сигнал, який генерувався джерелом сигналів у діапазоні від 20 Гц до 6 МГц. Через необхідність проведення великої кількості вимірювань крок зміни частоти було обрано 500 Гц. Однак, через обмеження осцилографа по розгортці, сигнал від 20 Гц до 3 МГц був неінформативним, спотворення сигналу почалися після 3 МГц і тривали до 6 МГц. Осцилограми, отримані в ході випробувань, представлені на рисунках 10 та 11.

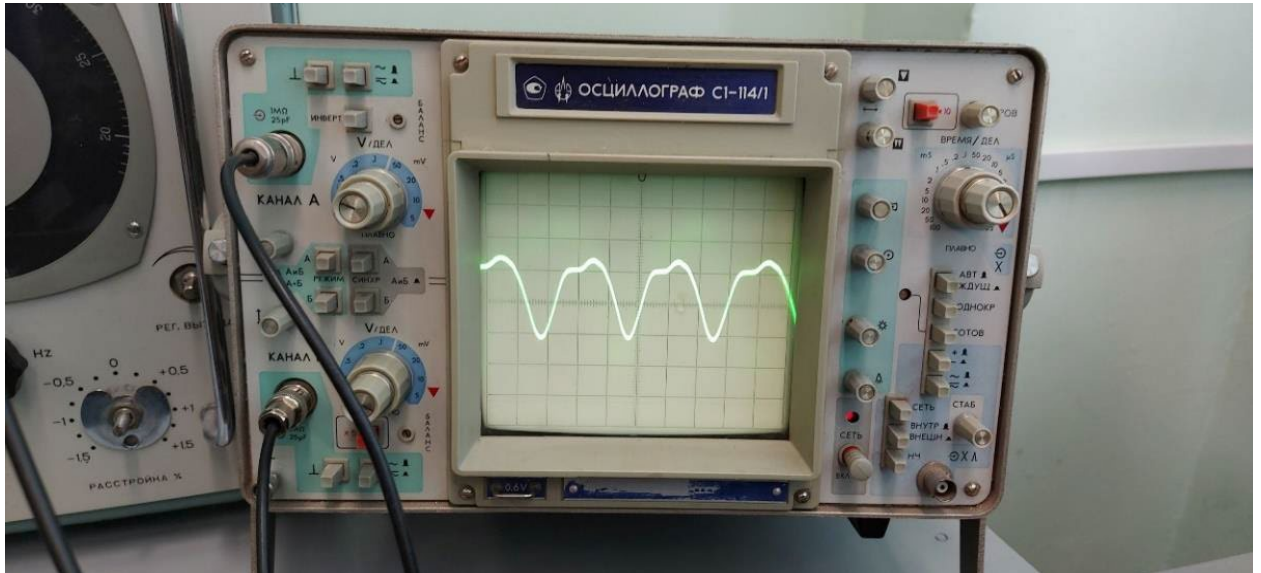


Рисунок 10 – Осцилограма синусоїдального сигналу частотою 5,5 МГц

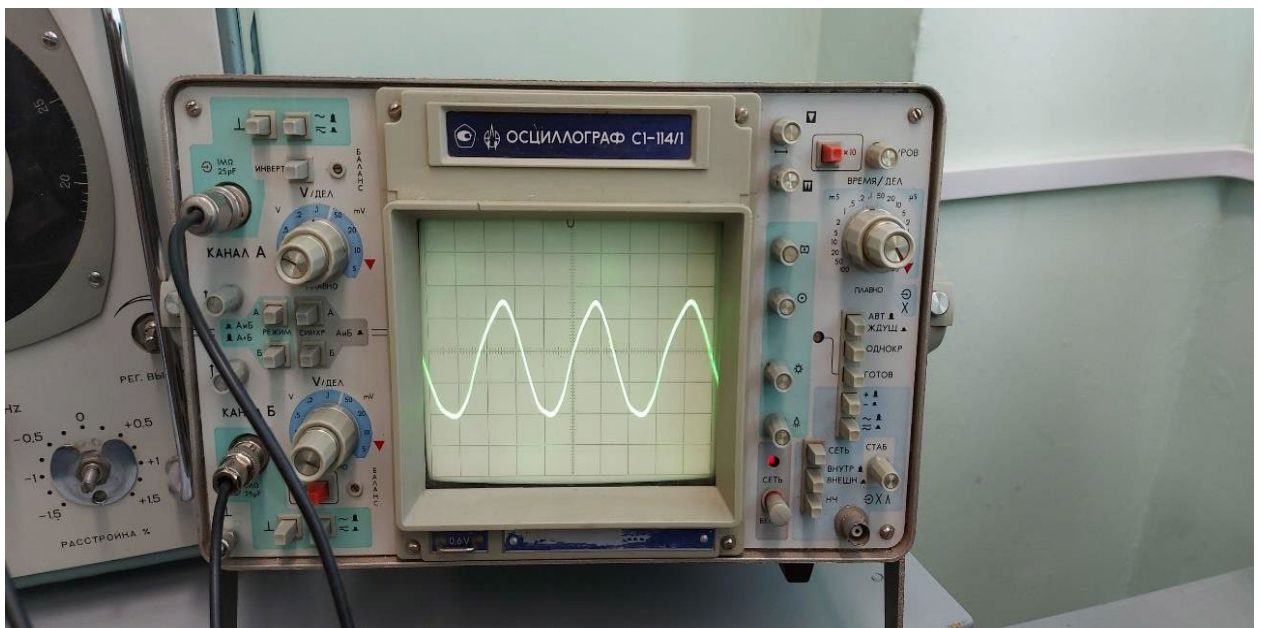


Рисунок 11 – Осцилограма синусоїдального сигналу частотою 3 МГц

Базуючись на таблиці 1, синусоїдальний сигнал виявився неінформативним, і використовувати його в подальших вимірюваннях виявилось недоцільним, оскільки основні види пошкоджень визначаються на частоті до 2 МГц. Внаслідок цього було прийнято рішення скористатися прямокутним сигналом та методикою частотного відгуку, описаною в дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук М. Ндайзейє [9]. Запропонована методика базується на вимірюванні частотного відгуку обмоток автотрансформатора марки АТДЦТН-200000/220 з використанням прямокутного сигналу. Такий тип сигналу виявився найбільш інформативним та придатним до умов, в яких проводились випробування. Осцилограма прямокутного сигналу, поданого на низьковольтну обмотку, представлена на рисунку 12.



Рисунок 12 – Осцилограма прямокутного сигналу частотою 1 МГц

Висновки по третьому розділу.

Розглянуто лабораторний стенд для тестування існуючих методів контролю стану обмоток трансформатора за АЧХ методом швидкого перетворення Фур'є [10]. Було перевірено різні види сигналів, що подавалися на обмотки випробувального трансформатора. Було визначено найбільш результативний вид сигналу.

РОЗДІЛ 4

ПРОПОЗИЦІЇ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

4.1 Алгоритм роботи системи моніторингу

Системи, що входять до автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП), зобов'язані прогнозувати час експлуатації трансформатора у разі виникнення дефектів у його конструкції. Одним із таких шляхів вирішення поставленої задачі є створення бази даних про зміну параметрів струму при відхиленні від номінальних параметрів роботи контрольованого трансформатора. Формована база даних повинна містити інформацію про гармоніки, притаманні певному типу пошкодження для конкретного типу трансформатора, та постійні значення, які є актуальними для всіх типів трансформаторів.

Сформувавши первинну базу даних (БД), наступним етапом є написання програми (алгоритму) роботи системи моніторингу, що розробляється. Передбачається, що під час розробки система моніторингу буде реалізована на базі програмованого логічного контролера (ПЛК) та шаф контролю трансформаторного обладнання. Вибір на користь такого типу обчислювальних засобів пояснюється їх відносно широким розповсюдженням та можливістю легко інтегрувати розроблену систему в встановлене на підстанції обладнання, якщо таке там є [11].

Запрограмувавши логічний контролер, підключений до системи моніторингу, далі ведеться збір даних для доповнення раніше створеної бази даних. Постійне поповнення БД зумовлене тим, що алгоритм розробляється під конкретний тип трансформатора. Використання одного й того ж алгоритму можливе лише на підстанціях, які знаходяться в однакових кліматичних, сейсмічних та географічних умовах, а також обладнання, яке встановлюється на підстанціях, схоже між собою [2]. Таке детальне калібрування алгоритму пояснюється унікальністю умов, в яких експлуатується трансформатор.

Деякі його параметри неможливо врахувати на етапі програмування контролера. Такий тип даних можна ввести в роботу алгоритму вже на моменті його застосування. Однак це не означає, що клієнтам, які придбають розроблювану систему, буде продано «сирий» продукт. Такий підхід, навпаки, дозволить досягти максимальної ефективності роботи алгоритму.

Також варто зазначити, що з огляду на вимоги прогнозування працездатності контрольованого силового трансформатора, підхід постійного збору даних та оновлень алгоритму, показаного на рисунку 23, дозволить виконати необхідні вимоги [12].

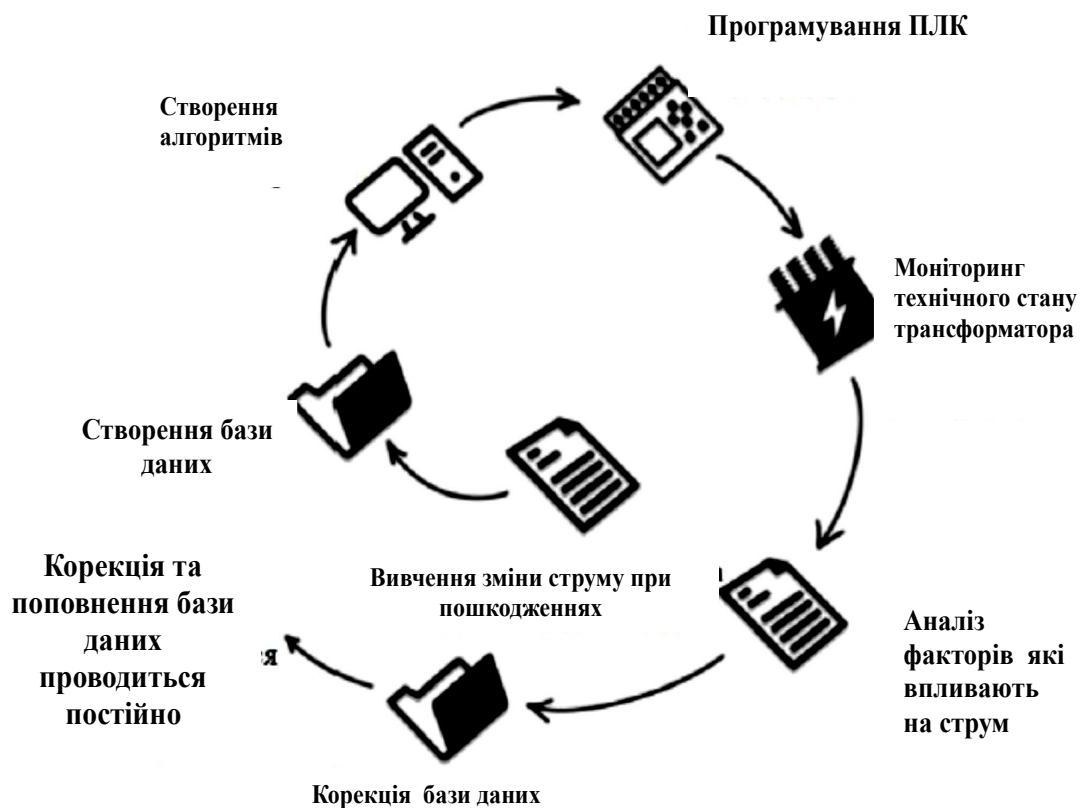


Рисунок 23 – Цикл роботи алгоритму

4.2 Схема підключення системи моніторингу

Розроблювана система моніторингу технічного стану магнітної системи трансформатора має бути реалізована на трьох рівнях автоматизованої

системи моніторингу та технічного діагностування. Перший рівень, він же польовий, включає в себе набір всіх необхідних датчиків і пристроїв, завдяки яким інформація надходить на вищі рівні.

Другий рівень АСМИД полягає у первинному аналізі даних та виявленні критичних відхилень вимірюваних параметрів роботи силового трансформатора від номінальних, оперативній сигналізації за допомогою світлової індикації. Світлова індикація є певним аналогом світлофора, який складається з трьох кольорів. Зелений – параметри трансформатора знаходяться в межах допуску, жовтий – параметри роботи трансформатора перевищують номінальні значення, але ще не перевищили критично допустимі, і червоний – параметри трансформатора перевищують критично допустимі параметри. Як правило, при перевищенні критичних параметрів комплекс моніторингу повинен повідомити диспетчеру про те, що трансформатор знаходиться в аварійному стані і його слід відключити від мережі для запобігання його повній поломці. У деяких випадках деякі виробники встановлюють на програмовані логічні контролери (ПЛК), що випускаються, екрани, на яких відразу виводиться вся необхідна інформація для контролюючого персоналу [13-16].

Останньою задачею другого рівня АСМИД є передача первинно оброблених даних на третій рівень. На третьому рівні зосереджено весь математичний апарат, який здійснює повноцінний аналіз даних і прогнозування терміну служби трансформатора.

При розробці системи раннього виявлення аномального та аварійного режимів роботи силового трансформатора за амплітудно-частотною характеристикою в режимі «on-line» головним завданням було опрацювати польовий і третій рівні АСМИД [14]. Оскільки даний метод знаходиться лише на стадії вивчення і на практиці широкого поширення набув лише метод аналізу магнітної системи трансформатора на вимкненому від мережі пристрої за АЧХ, то повноцінних стандартів до таких систем моніторингу на сьогодні не прописано. Зважаючи на це, необхідно було продумати схеми підключення

АСУ ТП

Рівень 1-11

Датчик

Вхід

Виходи релейні (сухий контакт)

Аналогові входи 4-20мА

Живлення

ПЛК

Норма

Попередження

Аварія

RS-485 (Modbus RTU)

Рівень 111

PM1

PM2

БПІ

ПК

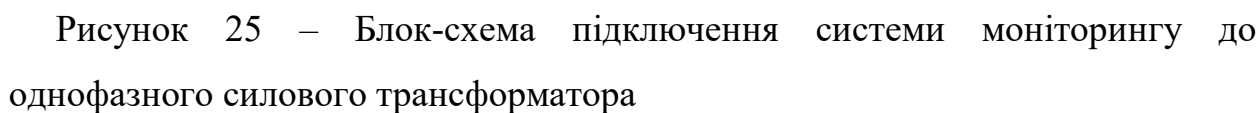
Живлення

RS-485 (Modbus RTU)

Ethernet TX (Modbus TCP)

Радіоканал

Ідеальним варіантом при розробці схем підключення системи моніторингу було б прив'язатися до наявного обладнання на підстанції, проте оскільки метод перебуває на стадії розробки, для зручності отримання даних та аналізу було розроблено блок-схему, представлену на рисунку 25.



Другий рівень АСМД є найбільш простим, оскільки на ньому реалізовано лише первинний аналіз даних. У деяких випадках другий і третій рівні об'єднуються в один, і на базі цього реалізується система, яка здатна одразу проводити оцінку технічного стану силового трансформатора. Як правило, більшість виробників використовують інтерфейс RS-485 (рисунок 26) для передачі даних між рівнями. RS-485 є фізичним стандартом передачі даних за допомогою крученої пари. Даний інтерфейс здатен працювати у двох режимах: напівдуплекс (рисунок 26а), де використовується лише два канали, та повний дуплекс (рисунок 26б), де задіяно чотири канали.

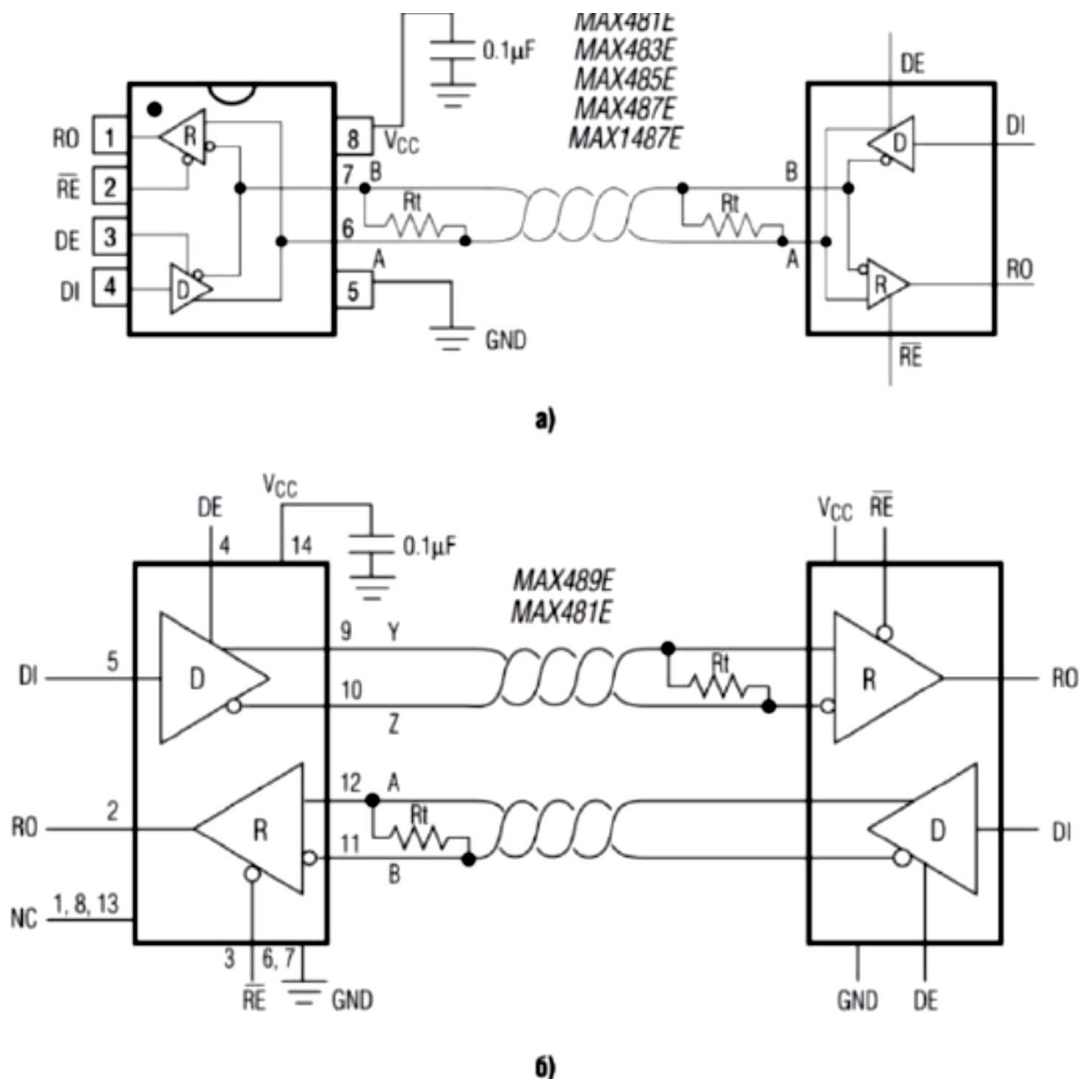


Рисунок 26 – Приклад роботи протоколу RS-485 (а – напівдуплекс; б – повний дуплекс).

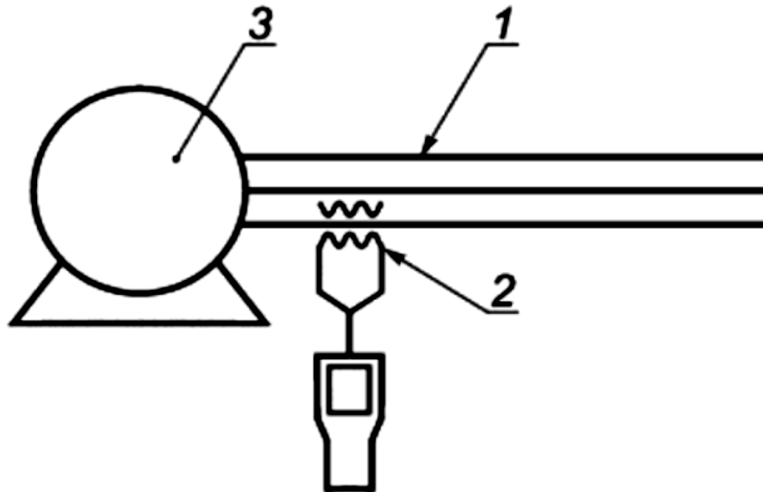
Виходячи з власних припущень, обраний інтерфейс зв'язку буде реалізовано за схемою повного напівдуплексу. Такий вибір пояснюється тим, що система реалізована за принципом «ведучий-ведений», де ведучі пристрої будуть лише передавати дані веденому пристрою і потреби у зворотному зв'язку немає. Також умовою вибору такої схеми зв'язку є інтервали часу, через які ведучий пристрій буде опитувати ведені.

4.3 Області застосування системи моніторингу

Оскільки розроблена система моніторингу базується на принципі аналізу амплітудно-частотної характеристики, сфера застосування даної системи не обмежується лише магнітною системою силового трансформатора. Розроблений метод можна застосувати на обладнанні, яке є частиною комплексної системи підтримки номінального функціонування трансформатора, а саме на елементах системи охолодження. Основним напрямком у цій частині обладнання є насоси та вентилятори [3].

На відміну від розробленого методу контролю магнітної системи силового трансформатора за АЧХ, метод контролю системи охолодження не є новаторським. Дана модель йде під номером шість у переліку математичних моделей, стандартизованому ЄЕС ФСК. Ця модель називається «контроль стану системи охолодження». Застосування аналізу частотної характеристики для оцінки технічного стану електродвигунів і насосів є досить ефективним. Таким методом можна продіагностувати дефекти ротора – тріщини, дефекти лиття, обриви стержнів короткозамкненого ротора, тріщини в кільцях. Також за частотною характеристикою можливо визначити підвищений ексцентриситет повітряного зазору, дефекти підшипників, міжвиткові замикання в обмотці статора та несправності приводу. Схема отримання даних по струму продемонстрована на рисунку 27.

Незважаючи на те, що даний метод використовується в комплексній системі моніторингу параметрів роботи силового трансформатора, широке розповсюдження він отримав на трансформаторах напругою 220 кВ і вище.



1 – фазний провід; 2 – кліщі для вимірювання струму; 3 – двигун із короткозамкненим ротором

Рисунок 27 – Вимірювання параметрів струму

Підстанції напругою 110 кВ практично не оснащуються подібними системами, проте контроль параметрів системи охолодження є одним з найбільш важливих, оскільки при досягненні гранично допустимих значень по температурі швидкість руйнування ізоляції обмотки зростає. Використання системи моніторингу електродвигунів і насосів, що застосовуються для охолодження трансформаторів напругою 110 кВ і нижче, може значно скоротити витрати та економічні втрати у випадку відхилення від номінальних параметрів в момент роботи трансформатора.

Висновки по четвертому розділу

У розділі було описано додатковий напрямок використання розроблюваної системи моніторингу раннього визначення аномального та аварійного режимів роботи силового трансформатора, що враховує не тільки параметри роботи його основних частин конструкції, але й допоміжного обладнання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Вході роботи над кваліфікаційною роботою розглянуто основні пошкодження обмотки та магнітопроводів, а також пошкодження бака та системи охолодження силового трансформатора. Проаналізовано системи моніторингу та діагностики силових трансформаторів, аналіз та новітні технології. Окремо розглянуто метод частотного відгуку. Створено лабораторний стенд для вибору ефективного тестового сигналу з метою оцінки технічного стану силових трансформаторів.

Пропоновано алгоритм системи моніторингу технічного стану силових трансформаторів. Впровадження алгоритму, інтегрованого в систему моніторингу та діагностики, забезпечить підвищення надійності роботи трансформаторного обладнання, зменшення витрат на ремонт та заміну пошкоджених трансформаторів, а також підвищення загальної стабільності енергосистеми.

Отже, розробка та впровадження ефективного алгоритму визначення аварійних режимів роботи силових трансформаторів є нагальною необхідністю для забезпечення безперебійного та надійного електропостачання.

Оскільки розроблена система моніторингу базується на принципі аналізу амплітудно-частотної характеристики, сфера застосування даної системи не обмежується лише магнітною системою силового трансформатора. Розроблений метод можна застосувати на обладнанні, яке є частиною комплексної системи підтримки номінального функціонування трансформатора, а саме на елементах системи охолодження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://ua.x-fullstartech.com/info/transformer-winding-damage-44790735.html>
2. Хавтирко В.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФЕКТІВ В СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ. Вінницький національний технічний університет. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/21342/4740.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
3. Заходи по ремонту та відновленню силових трансформаторів <https://electrocontrol.com.ua/ua/stati-sxemy-i-spravochnaya-informaciya/meropriyatiya-po-remontu-i-vosstanovleniyu-silovyx-transformatorov.html>
4. Переносний прилад «FreDA» Інструкція з експлуатації
5. Русов В.А. Діагностичний моніторинг високовольтних силових трансформаторів 2012. 159 с.
6. TDM-M – система діагностичного моніторингу силових трансформаторів 110÷330 кВ <https://dimrus.com/tdmm.html>
7. Frequency Response Analysis to Investigate Deformation of Transformer Winding, M. Fairouz M. Yousof, Chandima Ekanayake and Tapan K. Saha, The University of Queensland Brisbane, Australia, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 4, August 2015
8. Analysis of Transient Actions Influence in Power Transformer, Jurcik, Josef & Gutten, Miroslav & Korenciak, Daniel. (2011). Analysis of Transient Actions Influence in Power Transformer. Advances in Electrical and Electronic Engineering. 9. 10.15598/aeec.v9i2.501.
9. Ндайізейє М., Контроль стану обмоток силових автотрансформаторів та трансформаторів напруги методами частотного аналізу та резистивних вимірювань. 2016
10. Effects of GIC on Power Transformers and Power Systems, R. Girgis and K. Vedante, "Effects of GIC on power transformers and power systems," PES T&D 2012, 2012, pp. 1-8, doi: 10.1109/TDC.2012.6281595.

11. Seismic Analysis of a 500-kV Power Transformer of the Type Damaged in the 2008 Wenchuan Earthquake, Ma, Guo-Liang & Xie, Qiang. (2018). Seismic Analysis of a 500-kV Power Transformer of the Type Damaged in the 2008 Wenchuan Earthquake. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 32. 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001145.

12. Improved Power Transformer Winding Fault Detection using FRA Diagnostics – Part 2: Radial Deformation Simulation, N. Hashemnia, A. Abu-Siada and S. Islam, "Improved power transformer winding fault detection using FRA diagnostics – part 2: radial deformation simulation," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 1, pp. 564-570, Feb. 2015, doi: 10.1109/TDEI.2014.004592.

13. A probabilistic feature to determine type and extent of winding mechanical defects in power transformers, K. Pourhosseina, G.B. Gharehpetianb, E. Rahimpour, B.N. Araabi, Department of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Electrical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, ABB AG, Power Products Division, Transformers, R&D Department, Bad Honnef, Germany, Control and Intelligent Processing Centre of Excellence, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, *Electric Power Systems Research*, Vol.82, Issue 1, January 2012, Pages 1-10

14. A Novel Online Technique to Detect Power Transformer Winding Faults, A. Abu-Siada and S. Islam, "A Novel Online Technique to Detect Power Transformer Winding Faults," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 849-857, April 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2180932.

15. A Comparative Study on Propagation of Voltage Sag through Different Transformer Winding Connections, D. Paul, A. K. Goswami, S. Kumar, S. Jain and A. Pandey, "A Comparative Study on Propagation of Voltage Sag through Different Transformer Winding Connections," 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEDES.2018.8707514.

16. Analysis of Transient Actions Influence in Power Transformer, Jurcik, Josef & Gutten, Miroslav & Korenciak, Daniel. (2011). Analysis of Transient Actions Influence in Power Transformer. Advances in Electrical and Electronic Engineering. 9. 10.15598/aeee. v9i2.501.