

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: Імпульсне дефектографування обмоток силових трансформаторів

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕТс-41
спеціальнос
ті 141

електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Гринюк І.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Філюк Я.О.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л.Т.
(прізвище та ініціали)

Завідувач
кафедри

(підпис)

Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Микитишин А.Г.
(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 02 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

студенту Гринюку Ігору Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Імпульсне дефектографування обмоток силових трансформаторів

Керівник роботи ... Філюк Я.О., к.т.н., доц.

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

Затверджені наказом ректора від « 31 » Грудня 2025 року № 4/7-1164

2. Термін подання студентом завершеної роботи червень 2026 року

3. Вихідні дані до роботи провести дослідження методів імпульсного

дефектографування обмоток силових трансформаторів, виконати аналіз характерних дефектів обмоток та оцінити ефективність застосування імпульсних методів діагностування для підвищення надійності роботи трансформаторного обладнання

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

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунковий розділ

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Гурик О. Я. к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Мовчан Л.Т., к.т.н., доц		

7. Дата видачі завдання 2 січня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	20.01.2026	
2	Аналітичний розділ	03.02.2026	
3	Проектно-конструкторський розділ	10.03.2026	
4	Розрахунковий розділ	14.04.2026	
5	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	05.05.2026	
6	Висновки	31.05.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки	26.05.2026	
8	Оформлення графічної частини	10.06.2026	

Студент

(підпис)

Гринюк І.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Філюк Я.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41 - Т. : ТНТУ, 2026.

Стор.60; рис.35 ; табл.2 ; джерел 13; додатків -.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Імпульсне дефектографування обмоток силових трансформаторів».

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження методу імпульсного дефектографування обмоток силових трансформаторів та оцінювання його ефективності для виявлення механічних дефектів шляхом імітаційного моделювання і аналізу імпульсних сигналів.

У першому розділі проведено аналіз конструктивних особливостей силових трансформаторів, основних причин виникнення дефектів обмоток та факторів, що впливають на їх технічний стан. Розглянуто найбільш поширені види механічних пошкоджень і обґрунтовано необхідність своєчасного контролю стану обмоток трансформаторів.

У другому розділі досліджено сучасні методи діагностування силових трансформаторів та особливості їх застосування для контролю технічного стану обмоток. Особливу увагу приділено методу імпульсного дефектографування, його принципу дії, перевагам та можливостям виявлення механічних дефектів.

У третьому розділі розроблено імітаційну модель обмоток силового трансформатора та виконано моделювання процесів імпульсного дефектографування при різних видах пошкоджень. Проведено спектральний аналіз імпульсних сигналів і оцінено ефективність застосування методу для виявлення та локалізації дефектів обмоток силових трансформаторів.

Ключові слова: силовий трансформатор, технічний стан, імпульсний метод, дефекти обмоток.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.2 Проблема контролю технічного стану силових трансформаторів	8
1.2 Види дефектів обмоток трансформаторів та їх причини	13
1.3 Висновки до розділу	18
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	20
2.1 Способи та методи діагностування обмоток силових трансформаторів	20
2.2 Принцип імпульсного дефектографування обмоток силових трансформаторів	26
2.3 Висновки до розділу	33
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	34
3.1 Імітаційної моделі обмоток силового трансформатора для дослідження механічних дефектів	34
3.2 Результати моделювання імпульсного дефектографування обмоток силового трансформатора.	40
3.2.1 Дослідження дефекту типу «радіальне зміщення»	43
3.2.2 Дослідження дефекту типу «аксіальне зміщення»	47
3.3 Висновки до розділу	52
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	53
4.1 Охорона праці та електробезпека при експлуатації електроустановок	53

4.2. Проведення планування заходів цивільного захисту на підприємстві у випадку надзвичайних ситуацій	55
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	58
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	59

ВСТУП

Силові трансформатори є одним із найважливіших елементів електроенергетичних систем, від надійності роботи яких залежить безперервність передачі та розподілу електричної енергії. У процесі тривалої експлуатації обмотки трансформаторів зазнають впливу значних електродинамічних, теплових і механічних навантажень, що можуть призводити до виникнення різноманітних дефектів, зокрема радіальних та аксіальних зміщень, міжвиткових коротких замикань і пошкодження ізоляції. Більшість таких несправностей розвивається поступово та на початкових стадіях практично не впливає на робочі параметри обладнання, однак їх подальший розвиток може стати причиною серйозних аварій і значних матеріальних збитків.

Традиційні методи технічного обслуговування, що базуються на планово-попереджувальних ремонтах, не завжди дозволяють своєчасно виявляти приховані пошкодження обмоток трансформаторів. Тому в сучасній електроенергетиці все більшого поширення набувають методи діагностування, які забезпечують оцінювання фактичного технічного стану обладнання без його розбирання та виведення з експлуатації. Особливе місце серед них займають неруйнівні методи контролю, здатні виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку.

Одним із перспективних способів контролю механічного стану обмоток силових трансформаторів є імпульсне дефектографування. Даний метод ґрунтується на аналізі процесів поширення та відбиття імпульсних сигналів від неоднорідностей обмотки, що виникають унаслідок механічних деформацій або інших пошкоджень. Основними перевагами методу є неруйнівний характер контролю, висока чутливість до змін параметрів обмоток, можливість локалізації дефектів та використання сучасних засобів цифрової обробки сигналів для підвищення достовірності результатів діагностування.

Використання методів математичного та імітаційного моделювання дозволяє досліджувати процеси поширення імпульсних сигналів у трансформаторних обмотках, оцінювати вплив різних видів пошкоджень на характеристики сигналів та

вдосконалювати алгоритми їх обробки. Це створює передумови для розробки ефективних систем контролю технічного стану силових трансформаторів і підвищення надійності функціонування електроенергетичного обладнання.

У зв'язку з цим дослідження особливостей імпульсного дефектографування обмоток силових трансформаторів, аналіз сучасних методів діагностування та моделювання процесів виявлення механічних дефектів є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню експлуатаційної надійності силових трансформаторів та ефективності їх технічного обслуговування.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження методу імпульсного дефектографування обмоток силових трансформаторів та оцінювання його ефективності для виявлення механічних дефектів шляхом імітаційного моделювання і аналізу імпульсних сигналів.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

- дослідити сучасні методи діагностування силових трансформаторів та оцінити їх ефективність;
- розробити імітаційну модель обмоток силового трансформатора для дослідження механічних пошкоджень;
- виконати моделювання процесів імпульсного дефектографування при різних видах дефектів обмоток;
- провести спектральний аналіз імпульсних сигналів та дослідити вплив механічних деформацій на їх характеристики.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Проблема контролю технічного стану силових трансформаторів

Силові трансформатори є елементами сучасної електроенергетичної системи, які забезпечують передачу та розподіл електричної енергії між мережами різних класів напруги. Від надійності їх роботи залежить безперебійне електропостачання промислових підприємств, транспортної інфраструктури, комунального господарства та побутових споживачів. Вихід з ладу навіть одного силового трансформатора може призвести до значних матеріальних збитків, порушення роботи енергетичних систем та виникнення аварійних ситуацій. [1]

Силовий трансформатор являє собою статичний електромагнітний пристрій, призначений для перетворення одного рівня напруги в електричну енергію іншого рівня напруги без зміни частоти. Принцип його роботи базується на явищі електромагнітної індукції. При проходженні змінного струму через первинну обмотку створюється змінний магнітний потік в осерді, який індукує електрорушійну силу у вторинній обмотці. Завдяки цьому забезпечується передача електричної енергії між електричними колами з необхідним коефіцієнтом трансформації. [2]

Конструкція сучасного силового трансформатора складається з магнітопроводу, обмоток високої та низької напруги, трансформаторного бака, системи охолодження, введів, розширювача, перемикача відгалужень та допоміжних пристроїв контролю і захисту. Загальну конструкцію силового трансформатора наведено на рисунку 1.1.

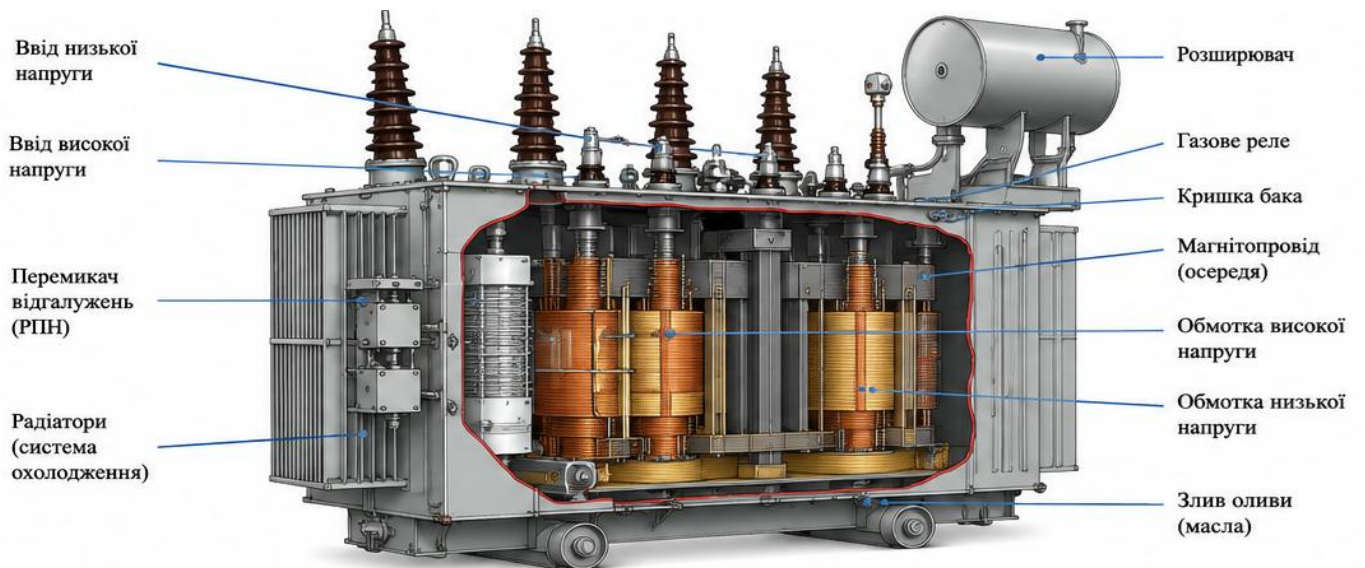


Рисунок 1.1 – Конструкція силового трансформатора

Під час експлуатації трансформатор працює в складних умовах, зазнаючи одночасного впливу електричних, механічних, теплових та зовнішніх факторів. Кожний із цих факторів може поступово погіршувати технічний стан обладнання та скорочувати термін його служби. [3]

На технічний стан та надійність експлуатації силового трансформатора найбільший вплив мають такі фактори:

- перевантаження;
- струми короткого замикання;
- атмосферні перенапруги;
- комутаційні перенапруги;
- старіння ізоляції;
- підвищена вологість;
- забруднення трансформаторної оливи;
- механічні навантаження;
- порушення умов транспортування та монтажу.

На технічний стан силового трансформатора впливає комплекс взаємопов'язаних факторів, основні з яких наведено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Основні фактори, що впливають на технічний стан силового трансформатора

У процесі тривалої експлуатації більшість дефектів не виникає раптово, а розвивається поступово. Спочатку відбувається незначне погіршення електричних або механічних характеристик окремих елементів конструкції, яке практично не впливає на роботу обладнання. Проте під дією повторних навантажень пошкодження накопичуються, що може призвести до виникнення серйозних аварій.

Одним із найбільш навантажених елементів силового трансформатора є його обмотки. Під час роботи вони зазнають впливу електродинамічних сил, теплових навантажень та механічних вібрацій. Особливо небезпечними є аварійні режими роботи, коли через обмотки проходять струми короткого замикання, що можуть у десятки разів перевищувати номінальні значення. [4]

Крім електричних навантажень, важливим фактором погіршення технічного стану трансформатора є старіння ізоляції. Під впливом температури, кисню, вологи та продуктів окиснення трансформаторної оливи механічна міцність ізоляційних

матеріалів поступово зменшується. Це призводить до погіршення діелектричних характеристик і збільшує ймовірність виникнення міжвиткових коротких замикань.

Небезпеку для трансформаторів становлять також атмосферні та комутаційні перенапруги. У результаті дії імпульсних перенапруг можливе часткове або повне руйнування ізоляції обмоток, виникнення часткових розрядів та прискорене старіння ізоляційної системи. [5]

Значний вплив на технічний стан обладнання мають механічні фактори. Механічні впливи, які виникають під час транспортування та експлуатації трансформатора, зокрема удари й вібрації, можуть спричиняти деформацію обмоток і зміщення окремих конструктивних елементів.

За статистичними даними, значна частина аварій силових трансформаторів пов'язана саме з пошкодженням ізоляції та механічною деформацією обмоток. Такі дефекти часто мають прихований характер і можуть тривалий час не проявлятися зовнішніми ознаками, поступово накопичуючись у процесі експлуатації.

У зв'язку з цим традиційна система планово-попереджувальних ремонтів поступово поступається місцем технічному обслуговуванню за фактичним станом обладнання. Важливою перевагою такого підходу є своєчасна діагностика прихованих дефектів і прогнозування зміни технічного стану обладнання. [6]

Для оцінювання технічного стану силових трансформаторів застосовуються різноманітні системи контролю, які забезпечують безперервний збір та аналіз інформації про робочі параметри обладнання. До основних контрольованих параметрів належать:

- температура обмоток та оливи;
- вологість ізоляції;
- концентрація розчинених газів;
- рівень часткових розрядів;
- навантаження трансформатора;
- стан вводів;
- механічний стан обмоток;
- вібраційні характеристики.

Загальну структуру системи контролю трансформатора наведено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Загальна структура системи контролю трансформатора

Застосування сучасних засобів діагностування дозволяє контролювати технічний стан силового трансформатора, своєчасно виявляти приховані пошкодження, визначати ступінь деградації його вузлів і прогнозувати залишковий ресурс обладнання. Це сприяє підвищенню надійності електропостачання, зменшенню кількості аварійних відключень та скороченню витрат на ремонт і технічне обслуговування обладнання. [7-8]

Таким чином, силові трансформатори є відповідальними елементами електроенергетичних систем, технічний стан яких безпосередньо впливає на надійність функціонування електричних мереж. У процесі експлуатації вони піддаються впливу комплексу несприятливих факторів, які можуть призводити до розвитку прихованих дефектів та аварійних пошкоджень. Одними з найбільш небезпечних є механічні та електричні дефекти обмоток, своєчасне виявлення яких є важливою задачею сучасної електроенергетики.

1.2 Види дефектів обмоток трансформаторів та їх причини

Після того, як силовий трансформатор буде введений в експлуатацію, він вийде з ладу через надмірне електричне навантаження, проблеми з матеріалами, екологічні проблеми або людський фактор. Однак більшість несправностей не проявляться в часі, а будуть поступово впливати на нормальну роботу трансформатора під впливом несприятливих факторів. [9]

Статистика пошкоджень обмотки силового трансформатора представлена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні пошкодження обмотки силового трансформатора

Пошкодження	Причина виникнення пошкодження
Зсув і деформація обмоток	Короткі замикання ліній і швидкі зміни навантаження
Міжвиткове або міжшарове коротке замикання	Висока температура, яка обпалить ізоляцію
Зволоження і забруднення ізоляції обмоток	Порушення герметичності трансформатора від струмів короткого замикання
Дефект грозозахисної обмотки	У трансформатор влучила блискавка

На рисунку 1.4 показано одну з найбільш небезпечних відмов — радіальне зміщення обмотки, викликане дією радіальних динамічних сил, що створюються взаємодією осьового магнітного поля і струму в обмотці при короткому замиканні. Ця динамічна внутрішня сила викликає механічне напруження всередині обмотки і викликає характерний випучування (втрата стійкості) обмотки.

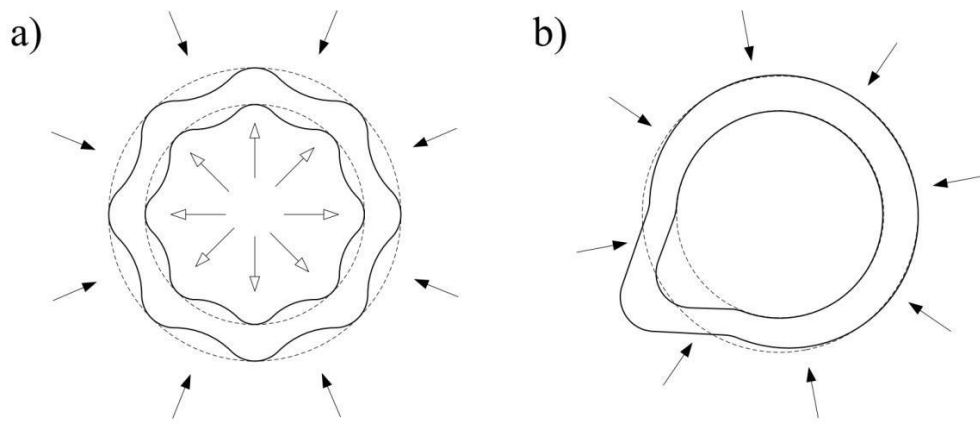


Рисунок 1.4 – Схема радіального зміщення обмоток

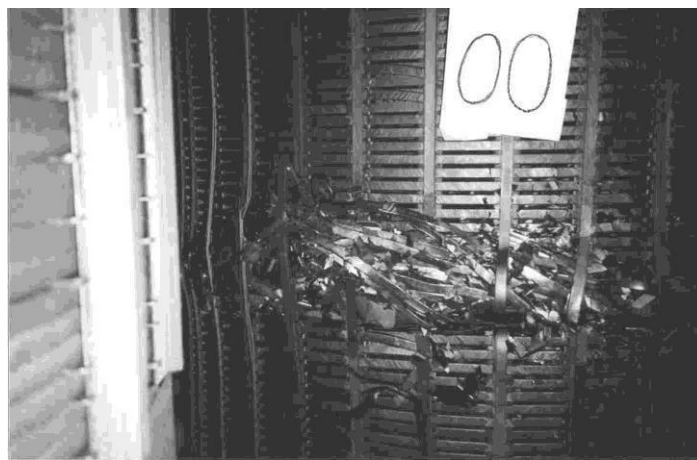


Рисунок 1.5 – Приклад радіального зміщення обмоток трансформатора



Рисунок 1.6 – Приклад аксіального зміщення обмоток трансформатора

Основними формами деформації обмотки трансформатора є непереборні деформаційні явища, такі як скручування, здуття, зміщення обмотки, а найбільш поширеними і типовими формами є міжвиткове замикання, розряд основної ізоляції або повний пробій з пошкодженням ізоляції. У повсякденному житті існує безліч причин деформації трансформатора, в основному це наступні:

На обмотки трансформатора впливає струм короткого замикання під час роботи, неминучий вплив різних струмів короткого замикання. Особливо в разі короткого замикання на коротку відстань і несправності розетки обмотка буде піддаватися дуже великій ударній силі від струму короткого замикання, що підвищить температуру обмотки і послабить механічну міцність відповідних проводів. трансформатора, він буде деформований або навіть повністю утилізований. [10]

Існує два види електричної потужності трансформатора: одна — радіальна (поперечна) сила, а інша — аксіальна (поздовжня) сила.

Радіальні (поперечні) сили. Напрямок струму і взаємне розташування котушок визначають вплив радіальної сили. У трансформаторі з подвійною котушкою радіальна сила в основному відіграє роль запуску внутрішньої котушки і розтягування зовнішньої котушки, щоб збільшити відносний діаметр всієї котушки жорсткість сили. Звичайна практика полягає в тому, щоб підтримувати смугу ізолюючим циліндром, а потім намотувати її котушкою, при цьому котушка піддається згинальним і стискаючим зусиллям, викликаним розтяжкою. Отже, якщо результуюча сила перевищує точку максимальної сили жорсткості котушки, котушка буде деформована або пошкоджена.

Аксіальна (поздовжня) сила. Дія осьової сили на трансформатор в основному проявляється в тому, що витки і сегменти згинаються в поздовжньому напрямку, а прокладки між сегментами і сегментами будуть стискатися, а деякі з них навіть будуть передаватися на залізне ярмо і відокремлюватися від ядра. Взагалі кажучи, відрізки дроту на двох кінцях котушки піддаються великій силі згину, а блок в центрі котушки по висоті піддається великій силі стиснення. Коли розподіл

магнітного потенціалу нерівномірний або висота котушки різна, осьова сила більш схильна до аварій трансформатора, ніж радіальна сила.

Особливу небезпеку для трансформаторів становлять міжвиткові короткі замикання. Вони можуть виникати внаслідок природного старіння ізоляції, локального перегріву, механічних деформацій або дії імпульсних перенапруг. Спочатку пошкодження охоплює декілька витків, однак із часом зона дефекту розширюється, що призводить до збільшення струму пошкодження та прискореного руйнування ізоляції. [11]

До причин виникнення дефектів обмоток також належать атмосферні та комутаційні перенапруги. У результаті дії імпульсних напруг у слабких місцях ізоляції можуть виникати часткові розряди, які поступово руйнують ізоляційні матеріали та сприяють розвитку внутрішніх пошкоджень.

Важливим фактором є порушення герметичності трансформатора. Потрапляння вологи до трансформаторної оливи призводить до погіршення її діелектричних властивостей та зменшення електричної міцності ізоляції обмоток. У результаті значно підвищується ймовірність виникнення міжвиткових та міжшарових коротких замикань.

На технічний стан обмоток суттєво впливають умови транспортування та монтажу трансформатора. Значні механічні удари, неправильне кріплення активної частини або порушення технології встановлення можуть спричинити зміщення обмоток ще до введення обладнання в експлуатацію.

Основні види деформацій обмоток силового трансформатора наведено на рисунку 1.7.

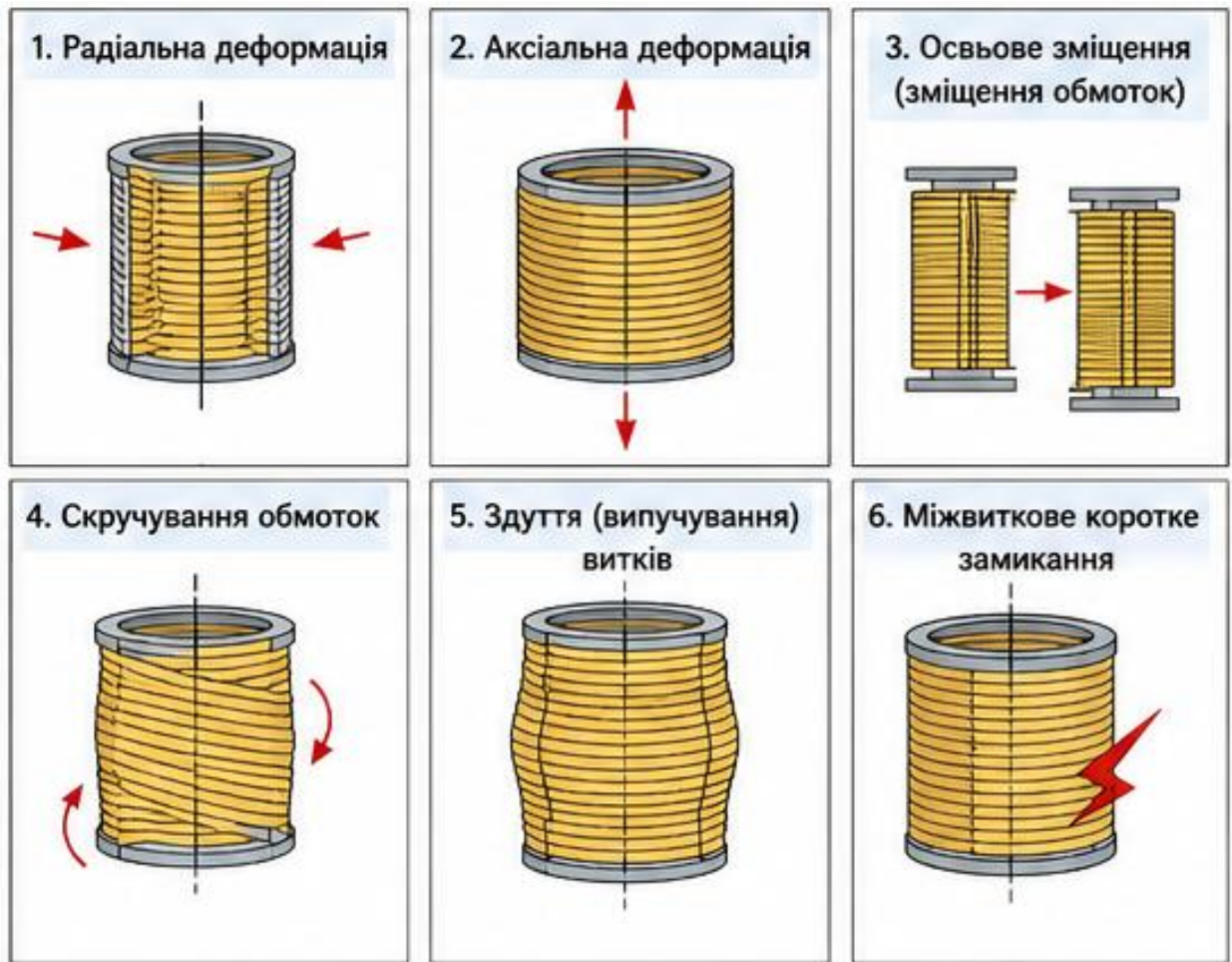


Рисунок 1.7 – Основні види деформацій обмоток силового трансформатора

Особливістю більшості пошкоджень обмоток є їх накопичувальний характер. Після першої деформації механічна міцність конструкції зменшується, тому кожне наступне коротке замикання прискорює розвиток дефекту. Такий процес отримав назву кумулятивного ефекту. [12]

Причини виникнення дефектів обмоток силових трансформаторів наведено на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Основні причини виникнення дефектів обмоток силового трансформатора

Досвід експлуатації показує, що після виникнення початкової деформації обмотки аварія не обов'язково відбувається одразу. Проте під час повторних коротких замикань або інших аварійних режимів навіть незначне пошкодження може стати причиною повного руйнування ізоляції та виходу трансформатора з ладу.

Таким чином, обмотки силових трансформаторів працюють у складних умовах, зазнаючи впливу електричних, механічних та теплових навантажень. Найбільш поширеними дефектами є радіальні та аксіальні деформації, міжвиткові короткі замикання та пошкодження ізоляції. Більшість несправностей має накопичувальний характер, що обумовлює необхідність своєчасного контролю технічного стану обмоток та застосування сучасних методів їх діагностування. [12]

1.3 Висновки до розділу

У першому розділі проведено аналіз особливостей конструкції та умов експлуатації силових трансформаторів, які є важливими елементами

електроенергетичних систем. Розглянуто основні фактори, що впливають на їх технічний стан, зокрема електричні, теплові та механічні навантаження, а також процеси старіння ізоляції та вплив перенапруг.

Встановлено, що найбільш уразливою частиною трансформатора є його обмотки, які під дією струмів короткого замикання та інших несприятливих факторів можуть зазнавати радіальних і аксіальних деформацій, міжвиткових замикань та інших пошкоджень. Показано, що більшість дефектів має прихований і накопичувальний характер, що ускладнює їх своєчасне виявлення та може призвести до серйозних аварій.

Проведений аналіз підтверджує необхідність застосування сучасних методів контролю та діагностування стану обмоток силових трансформаторів, здатних виявляти початкові ознаки пошкоджень і забезпечувати підвищення надійності та безпечності їх експлуатації.

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Способи та методи діагностування обмоток силових трансформаторів

Надійність функціонування силових трансформаторів є одним із ключових факторів забезпечення стабільної роботи електроенергетичних систем. Вони виконують важливу функцію передачі та розподілу електричної енергії між мережами різних класів напруги, забезпечуючи безперервне електропостачання промислових підприємств, транспортної інфраструктури, об'єктів комунального господарства та побутових споживачів. Вихід з ладу силового трансформатора часто супроводжується значними економічними втратами, порушенням режимів роботи енергосистеми та необхідністю проведення дороговартісних ремонтно-відновлювальних робіт.

У процесі експлуатації силові трансформатори піддаються впливу комплексу несприятливих факторів, серед яких найбільш суттєвими є електричні, механічні та теплові навантаження. Додатково на їх технічний стан впливають атмосферні та комутаційні перенапруги, старіння ізоляційних матеріалів, забруднення та зволоження трансформаторної оливи, механічні удари під час транспортування й монтажу, а також відхилення від номінальних режимів роботи. Під впливом цих факторів поступово відбувається погіршення характеристик ізоляційної системи, зниження механічної міцності конструктивних елементів та виникнення прихованих дефектів.

Особливістю більшості несправностей силових трансформаторів є їх поступовий розвиток. На початкових стадіях дефекти практично не впливають на робочі параметри обладнання та не супроводжуються помітними зовнішніми ознаками. Проте в процесі тривалої експлуатації відбувається накопичення пошкоджень, що може призвести до міжвиткових коротких замикань, деформації обмоток, часткового або повного руйнування ізоляції та виникнення аварійних режимів роботи. Саме тому одним із найважливіших завдань сучасної

електроенергетики є своєчасне виявлення початкових ознак несправностей та оцінювання технічного стану силових трансформаторів.

Система діагностування трансформаторів дозволяє вирішувати низку важливих практичних завдань, серед яких:

- контроль стану ізоляції обмоток;
- виявлення механічних деформацій;
- оцінювання стану трансформаторної оливи;
- контроль температурних режимів роботи;
- визначення ступеня старіння обладнання;
- прогнозування залишкового ресурсу;
- запобігання виникненню аварійних ситуацій;
- оптимізація графіків технічного обслуговування та ремонту.

На відміну від традиційних планово-попереджувальних ремонтів, сучасні системи технічного обслуговування базуються на безперервному контролі фактичного стану обладнання та прогнозуванні його працездатності. Такий підхід дозволяє виконувати ремонтні роботи лише за необхідності, зменшувати експлуатаційні витрати та підвищувати надійність функціонування енергетичних об'єктів.

Класифікація методів діагностування силових трансформаторів здійснюється за декількома основними ознаками, до яких належать спосіб отримання інформації, умови проведення досліджень, тип контрольованих параметрів та характер впливу на обладнання. З практичної точки зору найбільшого поширення набув поділ методів на руйнівні та неруйнівні.

Руйнівні методи передбачають часткове або повне розбирання окремих вузлів трансформатора та безпосереднє дослідження їх технічного стану. Як правило, вони застосовуються під час капітального ремонту або після виникнення серйозних аварійних пошкоджень. До таких методів належать візуальний контроль внутрішніх елементів, випробування зразків ізоляції, металографічні дослідження матеріалів та інші спеціалізовані способи контролю. Основною перевагою руйнівних методів є можливість отримання детальної інформації про стан окремих конструктивних

елементів, однак вони потребують виведення обладнання з експлуатації та значних матеріальних витрат.

У сучасній практиці найбільшого поширення набули неруйнівні методи діагностування, які дозволяють проводити оцінювання технічного стану трансформатора без його розбирання та, у багатьох випадках, без відключення від електричної мережі. Такі методи характеризуються високою інформативністю, безпечністю та можливістю регулярного проведення вимірювань.

До основних неруйнівних методів діагностування силових трансформаторів належать:

- аналіз розчинених у трансформаторній оліві газів;
- вимірювання опору обмоток постійному струму;
- контроль часткових розрядів;
- частотний аналіз відгуку обмоток;
- контроль вібраційних характеристик;
- імпульсне дефектографування обмоток.

Кожний із зазначених методів має власні переваги та область застосування. Одні способи дозволяють оцінити стан ізоляції, інші – виявити механічні деформації обмоток або визначити наявність внутрішніх пошкоджень. Тому для забезпечення високої достовірності результатів на практиці часто використовують комплексне діагностування, що поєднує декілька різних методів контролю.

Основні методи діагностування силових трансформаторів та їх класифікацію наведено на рисунку 2.1. Одним із найпоширеніших методів оцінювання технічного стану трансформаторів є аналіз розчинених у трансформаторній оліві газів, який дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку.

Метод базується на тому, що під час розвитку дефектів відбувається термічне або електричне руйнування ізоляційних матеріалів, у результаті чого утворюються різні гази. Залежно від характеру пошкодження змінюється їх концентрація та співвідношення.

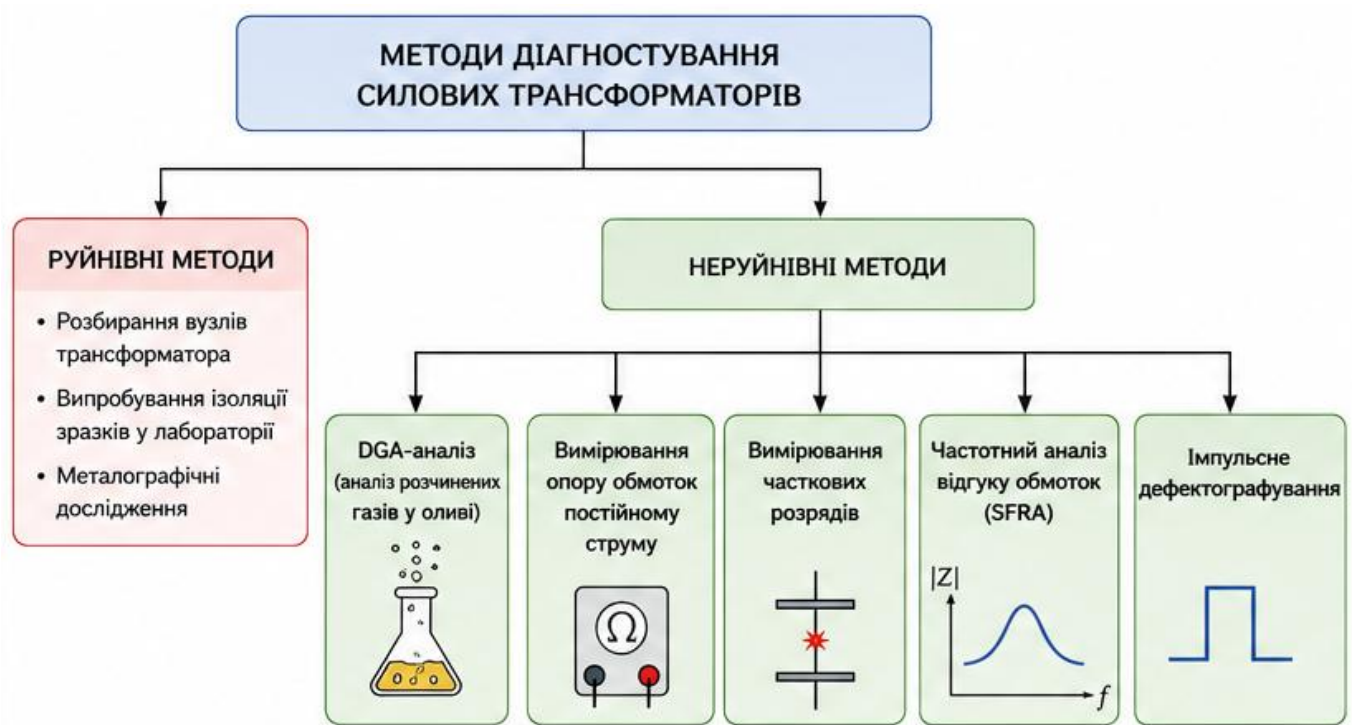


Рисунок 2.1 – Класифікація методів діагностування силових трансформаторів

До основних газів, що контролюються під час аналізу, належать:

- водень;
- метан;
- етан;
- етилен;
- ацетилен;
- оксид вуглецю;
- діоксид вуглецю.

За результатами аналізу можна оцінити наявність перегріву, електричних розрядів або міжвиткових коротких замикань. Однак цей метод не дозволяє знайти місце дефекту.

Іншим важливим методом є вимірювання опору обмоток постійному струму. Цей спосіб використовується для контролю якості контактних з'єднань, перевірки перемикачів відгалужень та виявлення обривів окремих провідників. Порівняння результатів із паспортними даними дозволяє виявити відхилення, що виникли в процесі експлуатації.

Значного поширення в практиці контролю технічного стану силових трансформаторів набув метод реєстрації часткових розрядів, який характеризується високою чутливістю до пошкоджень ізоляції. Він ґрунтується на реєстрації локальних електричних пробоїв у дефектних ділянках ізоляції. Часткові розряди виникають у місцях концентрації електричного поля та свідчать про початкові стадії руйнування ізоляційної системи.

Принцип виникнення часткових розрядів наведено на рисунку 2.2.

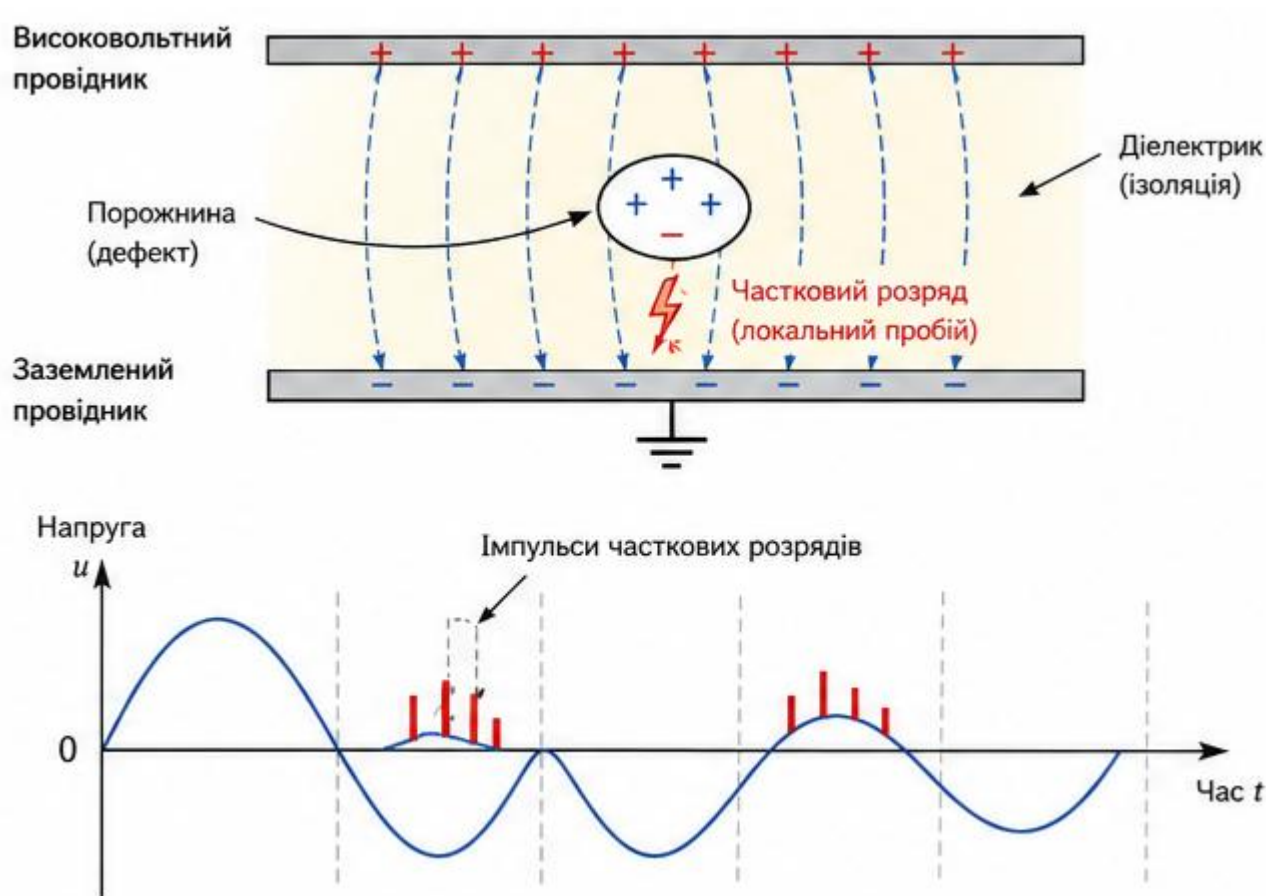


Рисунок 2.2 – Принцип виникнення часткових розрядів в ізоляції

До сучасних методів діагностування належить частотний аналіз відгуку обмоток (SFRA). Метод базується на тому, що обмотки трансформатора утворюють складну систему індуктивностей, ємностей та активних опорів. При механічній деформації або зміщенні окремих елементів змінюються електричні параметри обмотки, що призводить до зміни її частотної характеристики.

Перевагами методу SFRA є:

- висока чутливість до механічних деформацій;
- можливість виявлення зміщення обмоток;
- контроль стану магнітопроводу;
- неруйнівний характер контролю.

Недоліком є необхідність наявності еталонних характеристик або результатів попередніх вимірювань.

Метод імпульсного дефектографування, який базується на введенні короткого електричного імпульсу в обмотку трансформатора та аналізі сигналів, відбитих від неоднорідностей і дефектів. У місцях зміни хвильового опору частина енергії імпульсу відбивається, що дозволяє визначити місце пошкодження.

Принцип роботи імпульсного дефектографування наведено на рисунку 2.3.

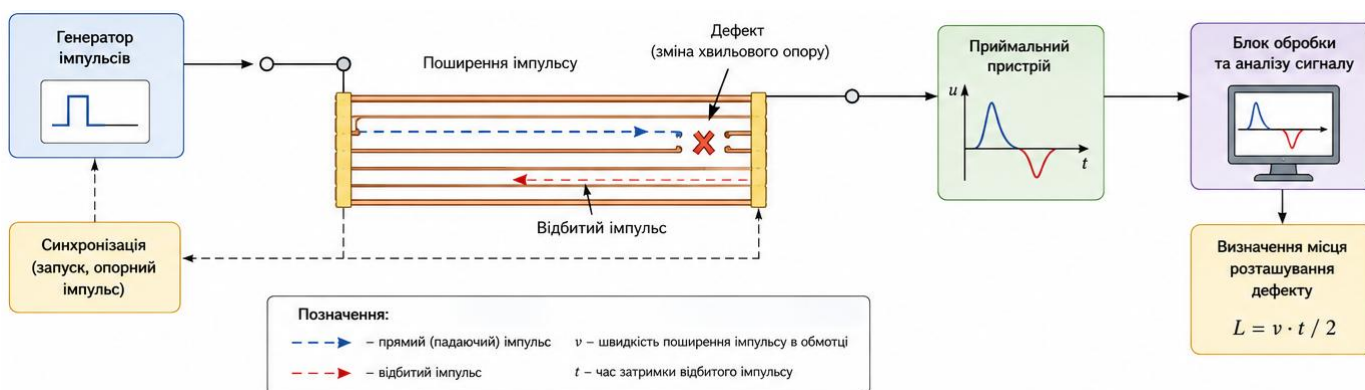


Рисунок 2.3 – Принцип імпульсного дефектографування обмоток

Основними перевагами імпульсного дефектографування є:

- висока швидкість проведення вимірювань;
- можливість визначення місця пошкодження;
- висока чутливість до механічних дефектів;
- неруйнівний характер контролю;
- можливість автоматизації процесу діагностування.

Порівняльний аналіз основних методів діагностування наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння сучасних методів діагностування обмоток силових трансформаторів

Метод	Виявлення дефектів	Визначення місця дефекту
Аналіз газів	Так	Ні
Вимірювання опору	Частково	Ні
Часткові розряди	Так	Частково
SFRA	Так	Частково
Імпульсне дефектографування	Так	Так

Таким чином, сучасна практика експлуатації трансформаторів передбачає використання комплексу методів діагностування, кожний з яких має свої особливості та область застосування. Аналіз існуючих способів контролю показує, що одним із найбільш перспективних методів виявлення механічних дефектів обмоток є імпульсне дефектографування, яке поєднує неруйнівний характер контролю, високу чутливість до пошкоджень та можливість визначення місця їх виникнення. Саме тому цей метод доцільно використовувати для контролю стану обмоток силових трансформаторів та розглядати як основу подальших досліджень.

2.2 Принцип імпульсного дефектографування обмоток силових трансформаторів

Одним із напрямків діагностики силових трансформаторів є імпульсне дефектографування обмоток. Метод належить до неруйнівних способів контролю та дозволяє виявляти механічні й електричні пошкодження без розбирання обладнання та порушення його конструкції. Використання імпульсного дефектографування забезпечує своєчасне виявлення прихованих дефектів, визначення місця їх виникнення та оцінювання стану обмоток трансформатора.

Принцип дії методу базується на теорії довгих електричних ліній. Обмотку трансформатора можна розглядати як систему з розподіленими параметрами, яка характеризується активним опором, індуктивністю, ємністю та провідністю ізоляції.

За нормального технічного стану ці параметри рівномірно розподілені вздовж усієї довжини обмотки, що забезпечує стабільне поширення електромагнітного імпульсу.

Під час виникнення механічних деформацій, міжвиткових коротких замикань, ослаблення кріплень або пошкодження ізоляції змінюються локальні електричні параметри окремих ділянок обмотки. У результаті виникає неоднорідність хвильового опору, яка спричиняє часткове відбиття електричного імпульсу. Саме аналіз відбитих сигналів лежить в основі методу імпульсного дефектографування.

Принцип поширення та відбиття імпульсного сигналу наведено на рисунку 2.4.

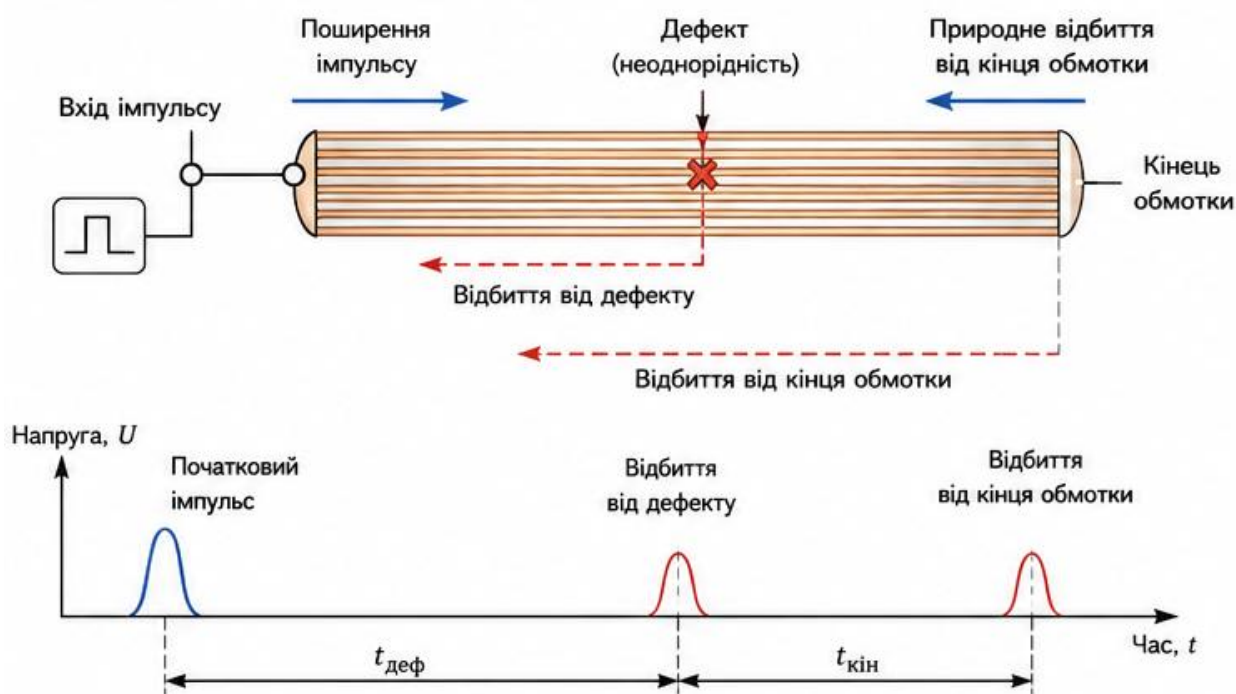


Рисунок 2.4 – Принцип поширення імпульсу в обмотці силового трансформатора

У процесі діагностування короткий електричний імпульс подається на один із виводів обмотки. Імпульс поширюється вздовж провідника зі швидкістю, яка залежить від конструктивних особливостей обмотки та електричних властивостей ізоляції. Якщо на шляху поширення відсутні дефекти, то сигнал практично без спотворень досягає кінця обмотки, де відбувається його природне відбиття.

У разі наявності неоднорідностей частина енергії імпульсу відбивається від місця дефекту та повертається до вимірювального пристрою. За формою,

амплітудою та часом затримки відбитого сигналу можна оцінити характер пошкодження та визначити його розташування.

Основні етапи процесу імпульсного дефектографування включають:

- формування електричного імпульсу;
- введення сигналу в обмотку;
- поширення імпульсу вздовж провідника;
- відбиття сигналу від неоднорідностей;
- реєстрацію відбитих імпульсів;
- цифрову обробку отриманої інформації;
- визначення місця можливого дефекту;
- формування результатів діагностування.

Принцип роботи системи імпульсного дефектографування наведено на рисунку 2.5.

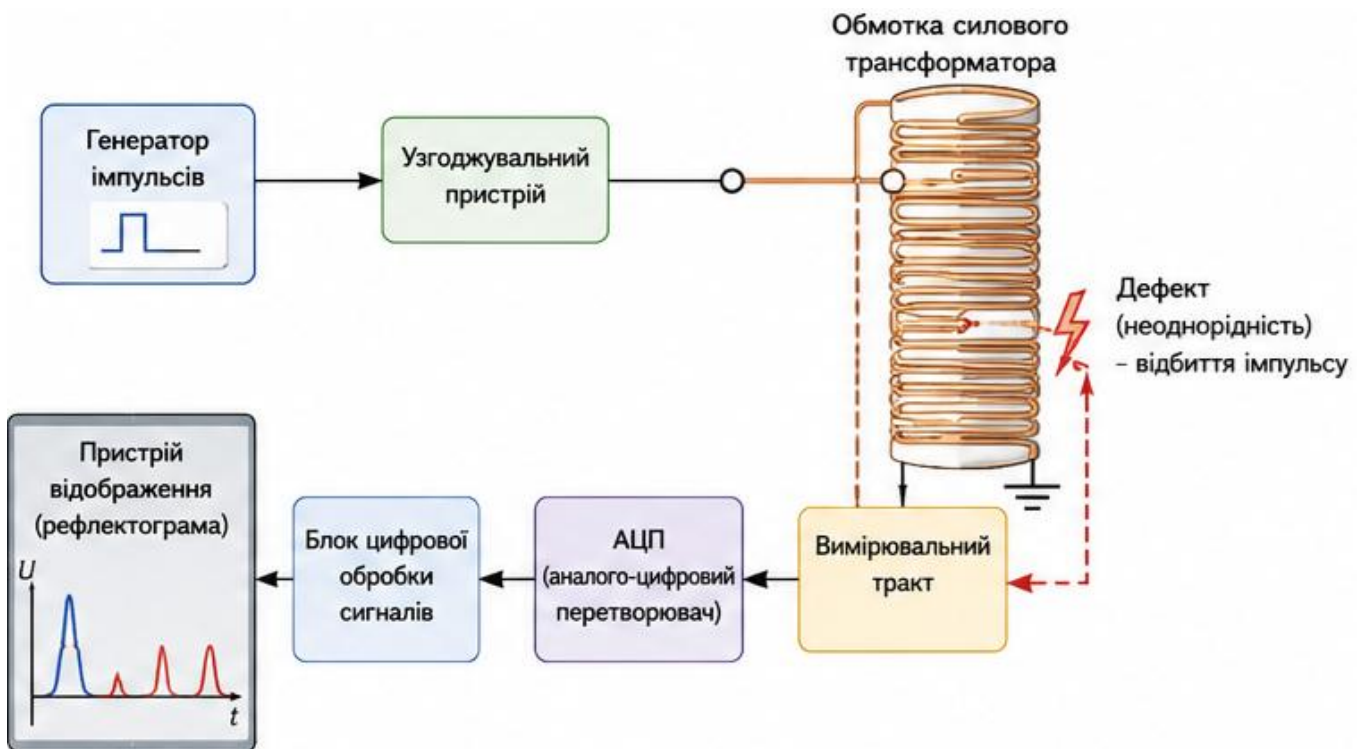


Рисунок 2.5 –Робота імпульсного дефектографування

Суттєвою особливістю методу є можливість не лише виявлення дефекту, а й визначення координати його розташування вздовж обмотки трансформатора. Для

цього використовується час проходження імпульсу від точки введення до місця виникнення дефекту та назад. Відстань до місця пошкодження визначається за виразом

Для визначення відстані до місця виникнення дефекту в методі імпульсного дефектографування використовується співвідношення

$$L = \frac{v \cdot t}{2} \quad (2.1)$$

де:

L – відстань від точки підключення вимірювального пристрою до місця виникнення дефекту, м;

v – швидкість поширення електромагнітного імпульсу вздовж обмотки трансформатора, м/с;

t – час проходження імпульсу від місця введення до дефекту та назад, с.

Коефіцієнт 2 у знаменнику враховує те, що вимірюється повний час проходження імпульсу: від точки введення до пошкодження та відбиття назад до вимірювального пристрою.

Принцип визначення координати дефекту полягає в тому, що після введення короткого електричного імпульсу в обмотку трансформатора він поширюється вздовж провідника. При досягненні неоднорідності, викликаній механічною деформацією, міжвитковим коротким замиканням або іншим пошкодженням, частина енергії сигналу відбивається і повертається до приймального пристрою. Вимірявши час затримки відбитого сигналу та знаючи швидкість поширення хвилі, можна визначити місце розташування дефекту.

Наприклад, якщо швидкість поширення імпульсу в обмотці становить

$$v = 1,8 \cdot 10^8 \text{ м / с} \quad (2.2)$$

а час між подачею імпульсу та прийманням відбитого сигналу дорівнює

$$t = 10 \text{ мкс} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ с} \quad (2.3)$$

то відстань до дефекту буде

$$L = \frac{1,8 \cdot 10^8 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{2} = 900 \text{ м} \quad (2.4)$$

У реальних силових трансформаторах швидкість поширення імпульсу залежить від конструкції обмотки, типу ізоляції та її діелектричних властивостей, тому перед проведенням вимірювань зазвичай визначають або калібрують її експериментальним шляхом. Це дозволяє підвищити точність локалізації дефектів та достовірність результатів діагностування.

Чим більший час затримки відбитого сигналу, тим далі від точки підключення знаходиться місце пошкодження.

Метод імпульсного дефектографування дозволяє виявляти різні види дефектів обмоток силових трансформаторів, серед яких:

- міжвиткові короткі замикання;
- міжшарові короткі замикання;
- радіальні деформації;
- аксіальні зміщення;
- обриви провідників;
- ослаблення механічних кріплень;
- пошкодження ізоляції;
- локальні неоднорідності конструкції.

Особливу ефективність метод демонструє при контролі механічного стану обмоток після проходження струмів КЗ. Навіть незначні зміщення витків змінюють розподілені параметри обмотки, що призводить до появи додаткових відбитих сигналів.

Для реалізації імпульсного дефектографування використовується спеціалізований вимірювальний комплекс, структурну схему наведено на рисунку 2.6.

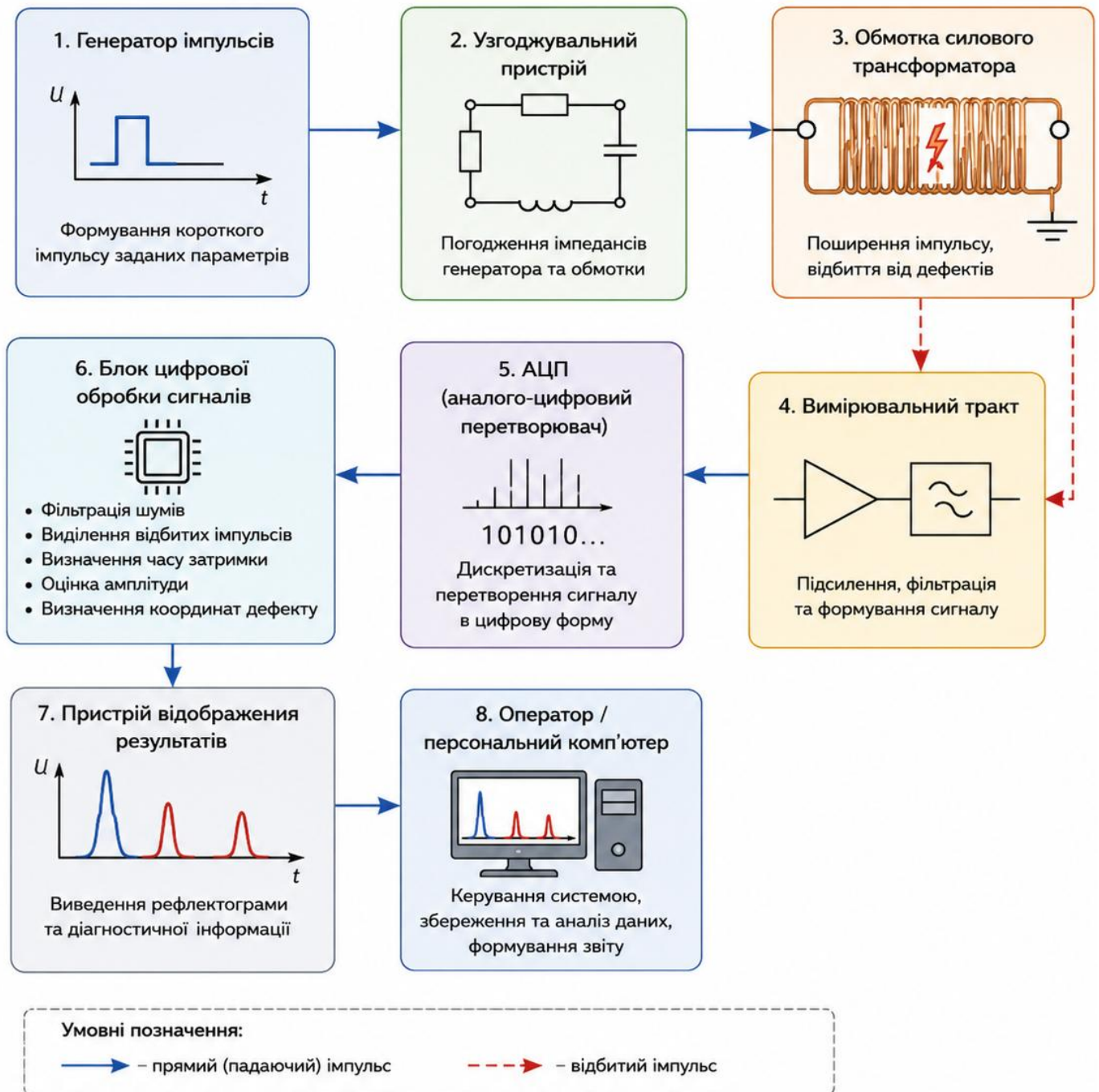


Рисунок 2.6 – Структурна схема системи імпульсного дефектографування

До складу системи входять:

- генератор імпульсів;

- узгоджувальний пристрій;
- обмотка силового трансформатора;
- вимірювальний тракт;
- аналого-цифровий перетворювач;
- блок цифрової обробки сигналів;
- пристрій відображення результатів.

Генератор формує короткий електричний імпульс із заданими параметрами. Через узгоджувальний пристрій сигнал надходить на обмотку трансформатора та поширюється вздовж неї. Відбиті імпульси приймаються вимірювальним трактом, після чого виконуються їх підсилення, перетворення та цифрова обробка.

Блок цифрової обробки сигналів виконує:

- фільтрацію шумів;
- аналіз форми сигналу;
- визначення часу затримки;
- визначення амплітуди відбиття;
- порівняння з еталонними характеристиками;
- визначення координат дефекту;
- формування діагностичного висновку.

Отримані результати можуть відображатися у вигляді рефлектограм, часових діаграм або цифрових звітів про технічний стан обмоток.

Основними перевагами імпульсного дефектографування є:

- неруйнівний характер контролю;
- можливість визначення місця пошкодження;
- висока чутливість до механічних деформацій;
- можливість автоматизації процесу діагностування.

Разом із перевагами метод має певні обмеження. Точність визначення місця дефекту залежить від конструкції обмотки, параметрів імпульсу, рівня шумів та правильності обробки сигналів. Для підвищення достовірності результатів імпульсне дефектографування часто застосовується спільно з іншими методами діагностування.

Таким чином, імпульсне дефектографування є сучасним та ефективним методом неруйнівного контролю технічного стану обмоток силових трансформаторів. Принцип роботи полягає в аналізі процесів поширення та відбиття електромагнітних імпульсів від неоднорідностей обмотки. Метод забезпечує своєчасне виявлення механічних та електричних пошкоджень, визначення їх місця розташування та може бути ефективно використаний для підвищення надійності експлуатації трансформаторів.

2.3 Висновки до розділу

У другому розділі досліджено принцип імпульсного дефектографування обмоток силових трансформаторів, який ґрунтується на аналізі процесів поширення та відбиття електромагнітних імпульсів від неоднорідностей обмотки. Розглянуто особливості визначення місця виникнення дефекту, структурну схему системи імпульсного дефектографування та принцип роботи її основних функціональних блоків. Встановлено, що даний метод характеризується неруйнівним характером контролю, високою чутливістю до механічних пошкоджень та можливістю локалізації дефектів на ранніх стадіях їх розвитку.

Проведений аналіз підтверджує доцільність застосування імпульсного дефектографування для контролю технічного стану обмоток силових трансформаторів, що дозволяє підвищити надійність їх експлуатації, своєчасно виявляти приховані пошкодження та зменшувати ймовірність виникнення аварійних ситуацій в електроенергетичних системах.

3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Імітаційна модель обмоток силового трансформатора для дослідження механічних дефектів

Одним із важливих етапів дослідження ефективності імпульсного дефектографування є створення імітаційної моделі обмоток силового трансформатора, яка дозволяє відтворити процеси поширення імпульсних сигналів та оцінити вплив різних видів механічних пошкоджень на характеристики електромагнітної хвилі. Використання математичного та імітаційного моделювання дає можливість проводити дослідження без втручання в роботу реального обладнання, скоротити матеріальні витрати та значно прискорити процес аналізу різних аварійних режимів.

Основною метою проведених досліджень є створення адекватної, надійної та зручної для практичного використання моделі обмоток силового трансформатора, яка дозволяє моделювати найбільш поширені механічні дефекти та оцінювати можливість їх виявлення методом імпульсного дефектографування. При побудові моделі враховувалися електричні та конструктивні особливості високовольтних силових трансформаторів, а також фізичні процеси поширення імпульсних сигналів у системі обмоток.

За основу імітаційної моделі було взято конструктивні параметри силового трансформатора марки ТМ-160/10-У1, який широко застосовується в розподільних електричних мережах. Такий вибір дозволяє максимально наблизити результати моделювання до реальних умов експлуатації та забезпечити практичну цінність отриманих результатів.

Загальну схему імітаційної моделі наведено на рисунку 3.1.

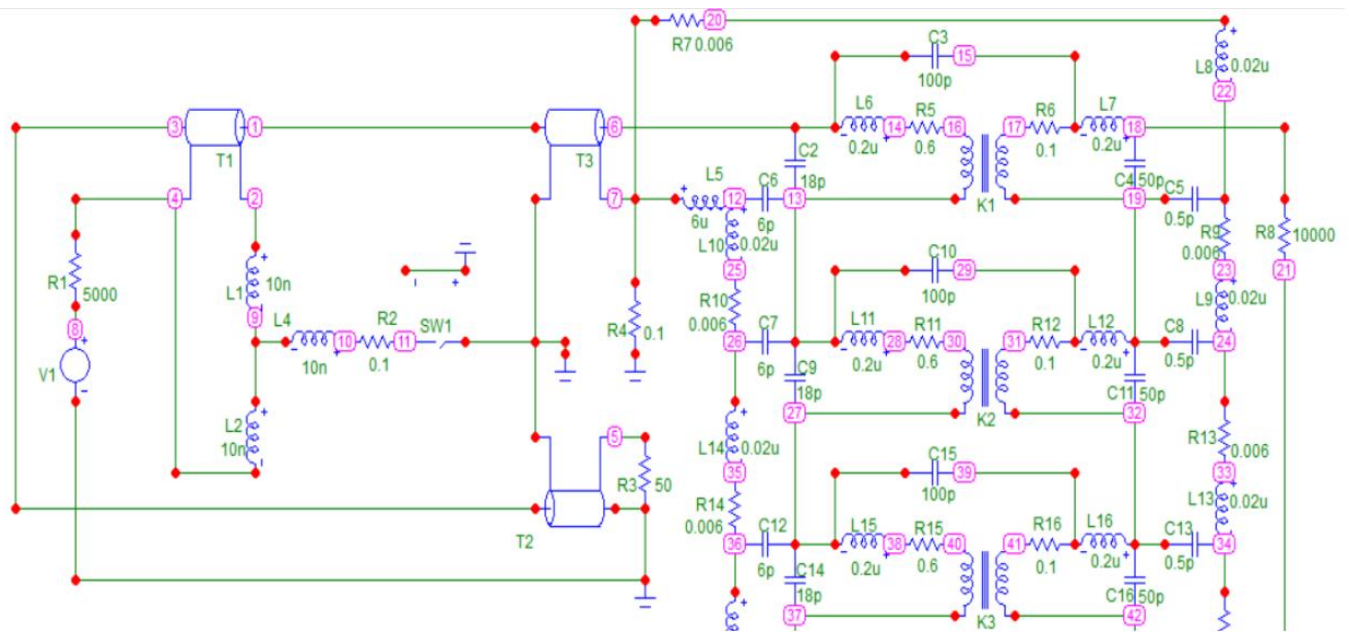


Рисунок 3.1 – Схема імітаційної моделі обмоток силового трансформатора.

Імітаційна модель складається з двох основних функціональних частин. Перша частина являє собою генератор імпульсних сигналів, який формує короткий електричний імпульс із заданими параметрами амплітуди та тривалості. Друга частина моделі представляє собою еквівалентну схему обмоток силового трансформатора, побудовану на основі системи зосереджених активних, індуктивних та ємнісних параметрів.

Ліва частина моделі відповідає високовольтній обмотці трансформатора, тоді як права частина моделює обмотку низької напруги. Обидві обмотки взаємозв'язані між собою через магнітний зв'язок та паразитні ємності, що дозволяє максимально точно відтворити процеси, які відбуваються в реальному трансформаторі під час проходження імпульсного сигналу.

Для моделювання різних видів механічних дефектів у схемі передбачено систему додаткових ємнісних елементів. Зокрема, конденсатори C6, C7 та C12 використовуються для імітації радіального зміщення витків обмотки. Зміна значень цих елементів дозволяє відтворити зміну відстані між сусідніми провідниками та відповідне збільшення або зменшення міжвиткової ємності.

Конденсатори C2, C9 та C14 призначені для моделювання аксіального зміщення витків обмотки. Такий вид деформації виникає під дією поздовжніх

електродинамічних сил під час проходження струмів короткого замикання. У процесі зміщення відбувається зміна взаємного розташування окремих секцій обмотки, що призводить до зміни її електричних параметрів та характеристик поширення імпульсних сигналів.

При значному розвитку аксіальної деформації сусідні витки можуть зближуватися настільки, що виникає міжвиткове коротке замикання. Такий режим також може бути відтворений за допомогою розробленої імітаційної моделі шляхом відповідної зміни параметрів окремих елементів схеми.

У процесі проведення досліджень використовувалися два варіанти підключення вимірювального обладнання. На початковому етапі осцилограф підключався між точками 6 і 7 схеми, що дозволяло спостерігати форму вхідного імпульсу, сформованого генератором. Далі осцилограф підключався між точками 23 і 24, де реєструвався сигнал, який пройшов через модель обмоток трансформатора.

Такий спосіб дослідження є класичним методом імпульсної діагностики. Його принцип полягає у порівнянні форми початкового та вихідного сигналів. Будь-яка механічна деформація або зміна електричних параметрів обмотки призводить до зміни амплітуди, тривалості або форми імпульсу, що дозволяє зробити висновок про наявність дефекту.

Разом із класичним методом у роботі запропоновано вдосконалений підхід до імпульсного дефектографування. Його особливістю є використання лише одного вимірювального каналу, при якому на екрані осцилографа спостерігається лише одна рефлектограма. Такий підхід дозволяє значно спростити процес проведення вимірювань та аналізу результатів.

Основною перевагою вдосконаленого методу є зменшення кількості контрольованих сигналів та спрощення інтерпретації отриманих даних. У цьому випадку аналізується лише форма відбитих імпульсів, що виникають унаслідок неоднорідностей обмотки. Кожна механічна деформація створює характерну зміну рефлектограми, яка може бути використана для визначення типу та місця виникнення дефекту.

На основі розробленої імітаційної моделі було проведено серію комп'ютерних експериментів, спрямованих на дослідження впливу різних механічних пошкоджень на форму імпульсного сигналу. Під час моделювання послідовно змінювалися параметри окремих елементів схеми, що дозволяло відтворити різні ступені радіальних та аксіальних зміщень обмоток, а також міжвиткові короткі замикання.

Результати моделювання дають можливість оцінити чутливість методу імпульсного дефектографування до різних видів механічних пошкоджень та визначити характерні ознаки кожного виду дефекту. Отримані дані є основою для подальшого проведення експериментальних досліджень та аналізу ефективності застосування імпульсного дефектографування при контролі технічного стану обмоток силових трансформаторів.

Основним завданням моделювання є розробка універсальної імітаційної моделі силового трансформатора класу напруги 10/0,4 кВ, яка забезпечує можливість відтворення різних типів дефектів обмоток, їх локалізації та ступеня розвитку. Створення такої моделі дозволяє проводити комплексні дослідження технічного стану обмоток силових трансформаторів та оцінювати ефективність сучасних методів їх діагностування без необхідності проведення дорогих натурних експериментів.

Основною вимогою до імітаційної моделі є її здатність відображати фізичні процеси, що відбуваються в обмотках трансформатора під час поширення імпульсного сигналу. При цьому модель повинна забезпечувати можливість імітації різних механічних та електричних пошкоджень, зокрема радіальних і аксіальних зміщень витків, міжвиткових коротких замикань, локальних змін параметрів ізоляції та комбінованих дефектів різного ступеня складності.

Розроблена схема контролю технічного стану обмоток реалізується за допомогою програмного середовища **Micro-Cap**, яке дозволяє виконувати моделювання електричних процесів у складних схемах із зосередженими та розподіленими параметрами. Загальну структуру процесу моделювання та контролю стану обмоток наведено на рисунку 3.2.

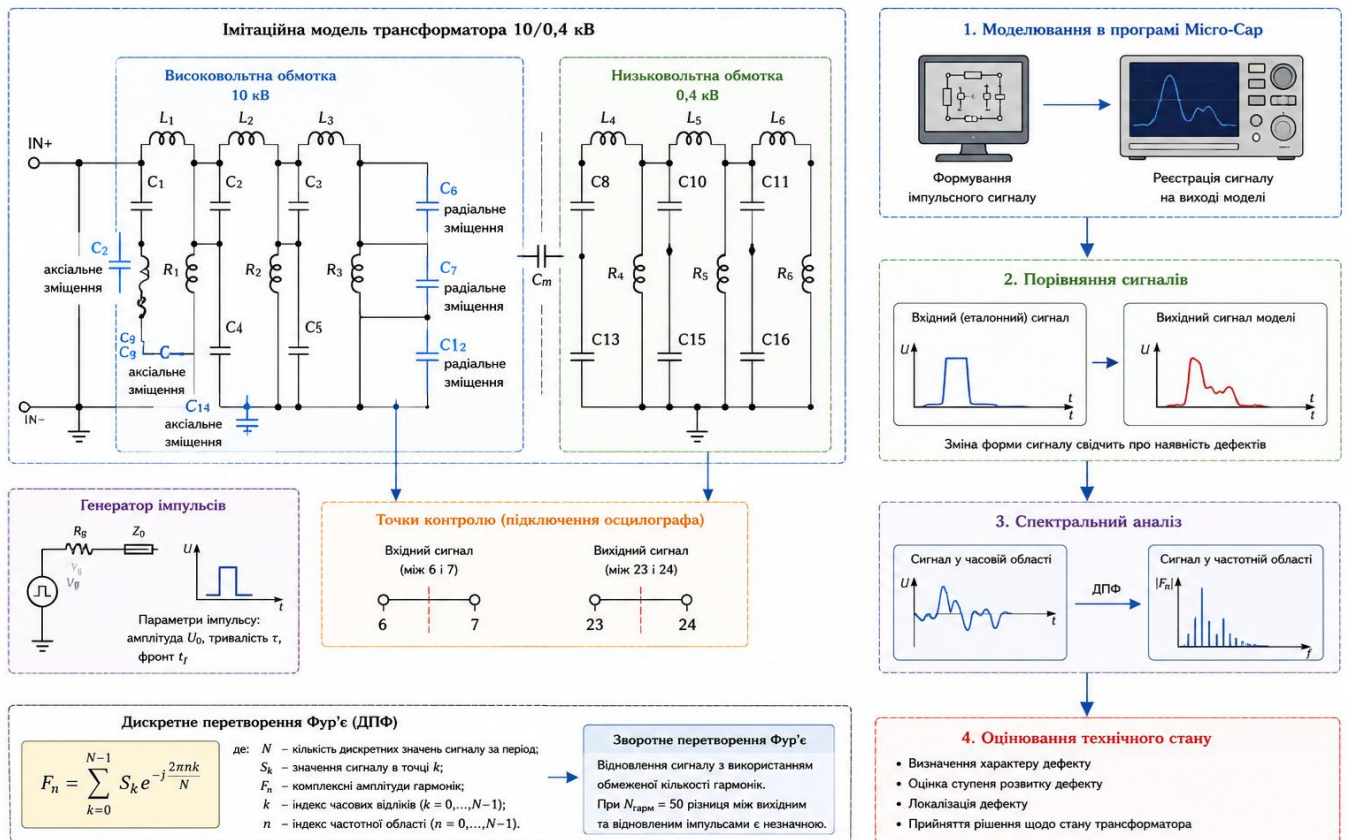


Рисунок 3.2 – Схема процесу моделювання та контролю стану обмоток трансформатора.

На першому етапі моделювання генератор імпульсів формує тестовий сигнал із заданими параметрами амплітуди та тривалості. Сформований імпульс подається на імітаційну модель обмотки трансформатора, після чого здійснюється реєстрація сигналу, що пройшов через досліджувану систему.

У процесі моделювання отримані сигнали порівнюються між собою. За відсутності дефектів форма вихідного сигналу практично відповідає еталонній характеристиці. При виникненні механічних або електричних пошкоджень відбувається зміна амплітуди, тривалості, фронту імпульсу та його спектрального складу. Ці зміни можуть бути використані як діагностичні ознаки дефектного стану обмоток трансформатора.

На початковому етапі досліджень проводиться якісний аналіз отриманих результатів моделювання. При цьому здійснюється візуальне порівняння форми імпульсних сигналів для справної та пошкодженої обмоток. Такий підхід дозволяє

визначити загальні закономірності впливу різних дефектів на процес поширення електромагнітних імпульсів.

Для підвищення точності діагностування та отримання кількісних характеристик пошкоджень використовуються сучасні методи цифрової обробки сигналів. Одним із найбільш ефективних підходів є спектральний аналіз імпульсних сигналів, який дозволяє оцінити зміни частотного складу сигналу при виникненні дефектів обмоток.

Використання спектрального аналізу дає можливість:

- підвищити чутливість діагностування;
- визначити характер пошкодження;
- оцінити ступінь розвитку дефекту;
- підвищити достовірність результатів контролю;
- автоматизувати процес аналізу сигналів.

Для дослідження різних технічних станів обмоток у роботі використовується метод аналізу амплітудно-частотних характеристик. Побудова АЧХ здійснюється на основі чисельного спектрального аналізу із застосуванням дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Використання цього математичного апарату дозволяє представити складний імпульсний сигнал у вигляді сукупності гармонічних складових різної частоти.

Дискретне перетворення Фур'є описується співвідношенням

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}, \quad (3.1)$$

де: N – кількість виміряних за період значень сигналу;

S_k – значення сигналу, виміряні в дискретних часових точках;

F_n – комплексні амплітуди синусоїдальних сигналів, що складають вихідний сигнал (позначають одночасно амплітуду і фазу);

k – тимчасовий індекс вхідних відліків, $k=0, \dots, N-1$;

n – індекс, що використовується в частотній області, $n=0, \dots, N-1$.

Застосування дискретного перетворення Фур'є дозволяє перейти від часового представлення імпульсного сигналу до його спектрального представлення. При цьому кожна гармонічна складова характеризується певною амплітудою та фазою, а їх сукупність повністю описує досліджуваний сигнал.

Для оцінювання впливу кількості гармонік на точність відтворення імпульсного сигналу використовується процедура спектрального розкладання з подальшим виконанням зворотного перетворення Фур'є. У ході моделювання імпульсний сигнал розкладається на окремі гармонічні складові, після чого виконується його відновлення із використанням різної кількості гармонік.

Результати досліджень показують, що зі збільшенням кількості гармонічних складових точність відтворення початкового імпульсу поступово підвищується. Зокрема, встановлено, що при використанні приблизно 50 гармонік відмінність між початковим та відновленим імпульсним сигналом стає незначною. Це свідчить про достатню точність спектрального представлення сигналу та можливість ефективного використання дискретного перетворення Фур'є для аналізу стану обмоток силових трансформаторів.

3.2 Результати моделювання імпульсного дефектографування обмоток силового трансформатора.

Для оцінювання ефективності імпульсного дефектографування та перевірки працездатності розробленої імітаційної моделі було проведено серію комп'ютерних експериментів. Основною метою досліджень є аналіз впливу різних видів механічних дефектів обмоток силового трансформатора на характеристики імпульсних сигналів та оцінювання можливості їх виявлення за допомогою спектрального аналізу.

Під час досліджень використовувалися два методи діагностування: двоступеневий та одноступеневий. Кожний із них має свої особливості та дозволяє отримати інформацію про технічний стан обмоток трансформатора.

Принцип двоступеневого методу полягає у введенні зондуєчого імпульсу на вхід обмотки трансформатора та одночасній реєстрації сигналу на її виході. У цьому випадку генератор імпульсів формує короткий низьковольтний сигнал, який проходить через всю систему обмоток, а вихідний сигнал реєструється вимірювальною апаратурою.

Схему аналізу двоступеневого методу наведено на рисунку 3.3.

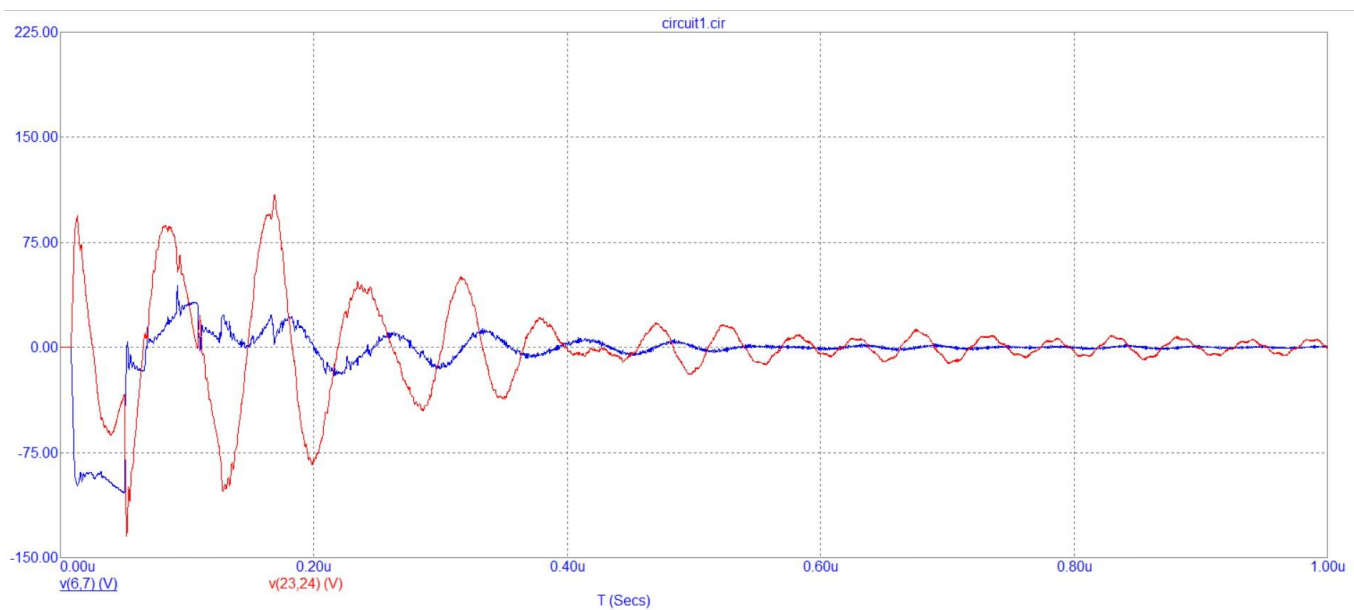


Рисунок 3.3 – Графік аналізу двоступеневого методу імпульсного дефектографування

При відсутності пошкоджень форма вихідного сигналу практично відповідає еталонному імпульсу. Поява механічних деформацій або змін електричних параметрів обмотки призводить до зміни амплітуди, тривалості та форми імпульсу, що дозволяє встановити наявність дефекту.

Для підвищення ефективності діагностування використовується одноступеневий метод аналізу. Його особливістю є використання лише одного вимірювального каналу, що значно спрощує проведення експериментів та обробку результатів.

У цьому випадку в обмотку трансформатора подається зондуєчий імпульс, а на осцилографі реєструється лише сигнал відгуку. Після цього отриманий сигнал

піддається спектральному аналізу та визначається відношення спектра відгуку до спектра зонduючого імпульсу.

Форму хвилі для робочої обмотки, отриману за допомогою одноступеневого методу на імітаційній моделі, наведено на рисунку 3.4. Аналогічний сигнал, отриманий під час дослідження реальної обмотки трансформатора, наведено на рисунку 3.5.

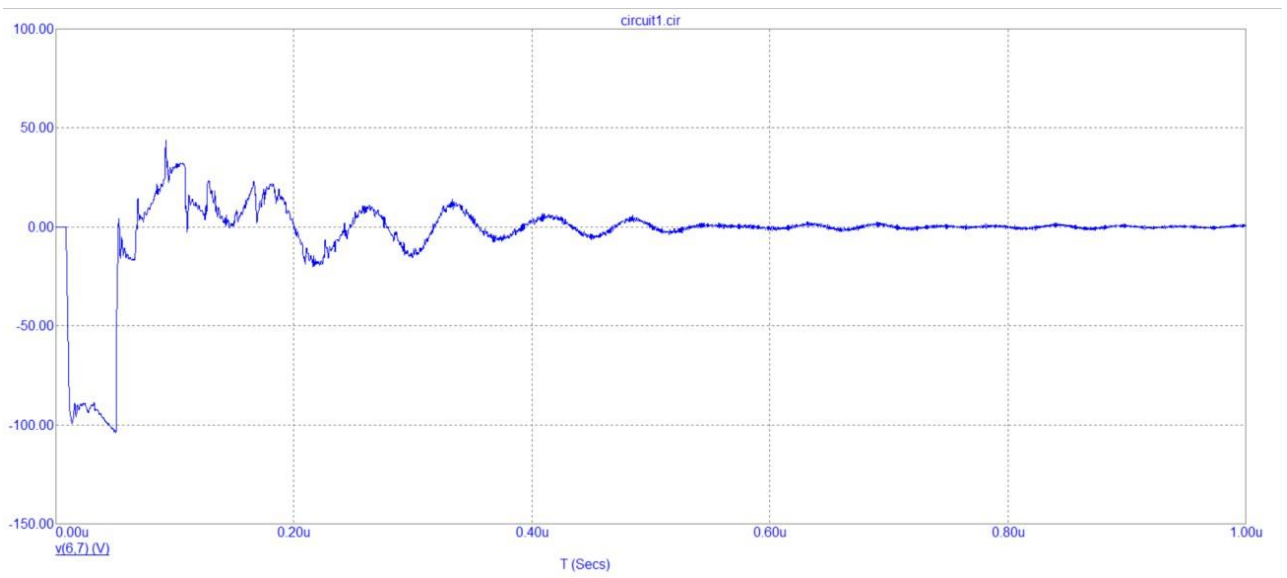


Рисунок 3.4 – Форма хвилі робочої обмотки, отримана одноступеневим методом на імітаційній моделі.

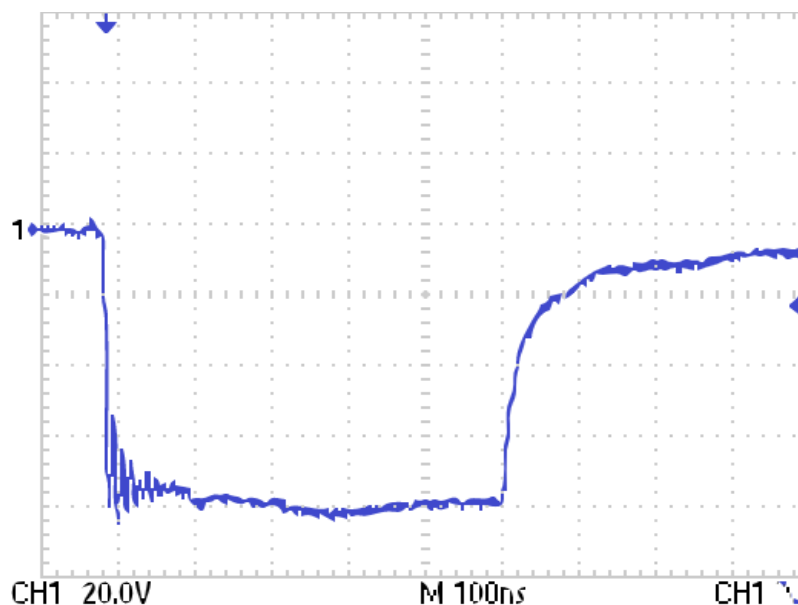


Рисунок 3.5 – Форма хвилі робочої обмотки, отримана одноступеневим методом на реальному трансформаторі.

Порівняння результатів моделювання та експериментальних досліджень показує, що розроблена імітаційна модель достатньо точно відтворює процеси поширення імпульсних сигналів у реальній обмотці трансформатора.

Для кількісного оцінювання технічного стану обмоток використовується спектральний аналіз отриманих сигналів. Відношення амплітудно-частотних характеристик еталонної та досліджуваної обмоток наведено на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 – Відношення АЧХ справної обмотки.

При відсутності дефектів відношення спектральних характеристик залишається практично незмінним. Якщо ж у конструкції обмотки виникають механічні пошкодження або зміни електричних параметрів, відбувається суттєва зміна амплітудно-частотної характеристики. Такі відхилення можуть бути використані як діагностична ознака несправності.

3.2.1 Дослідження дефекту типу «радіальне зміщення»

Одним із найбільш поширених механічних пошкоджень обмоток є радіальне зміщення витків. Для дослідження цього виду дефекту в імітаційній моделі змінювалися параметри відповідних ємнісних елементів, що дозволяло відтворити різний ступінь розвитку пошкодження.

Осцилограми зонduючих імпульсів для різних варіантів моделі наведено на рисунках 3.7 та 3.8.

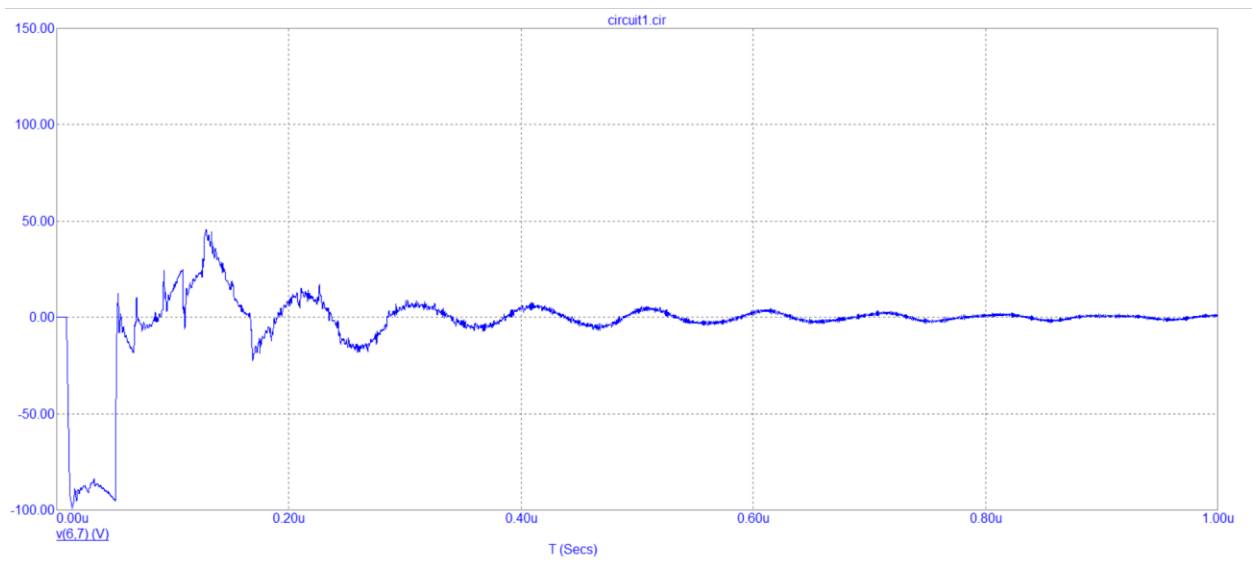


Рисунок 3.7 – Осцилограма зонduючого імпульсу при дефекті «радіальне зміщення», модель №1 $C_6=20p$ $C_7=6p$ $C_{12}=6p$ // $C_2=18p$ $C_9=18p$ $C_{14}=18p$

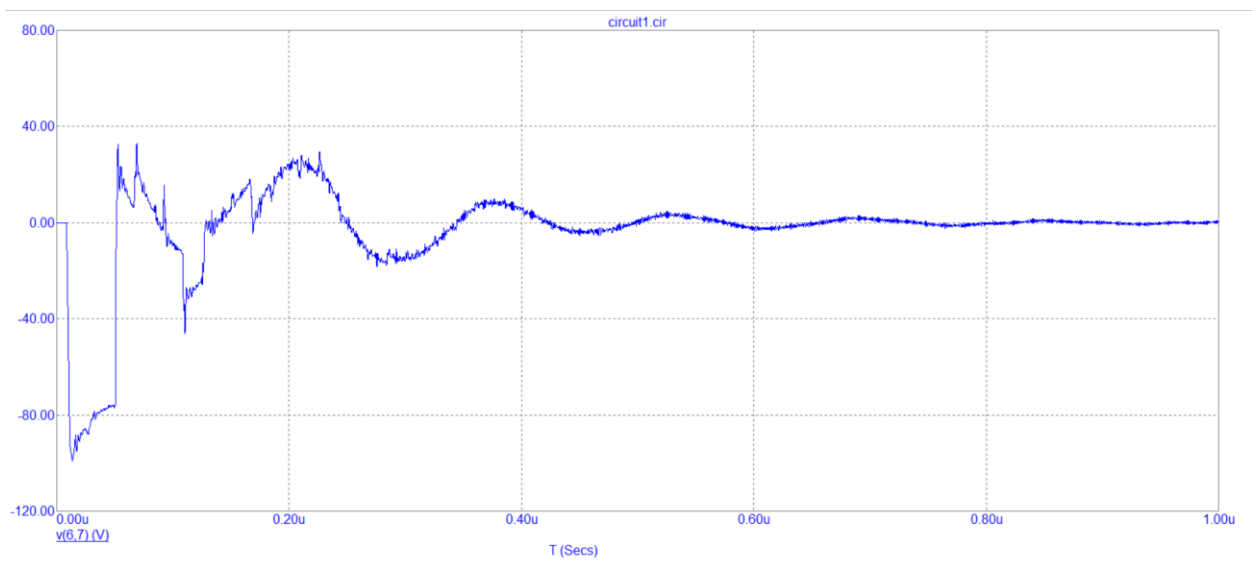


Рисунок 3.8 – Осцилограма зонduючого імпульсу при дефекті «радіальне зміщення», модель №2. $C_6=100p$ $C_7=6p$ $C_{12}=6p$ // $C_2=18p$ $C_9=18p$ $C_{14}=18p$

Порівняння отриманих результатів показує, що зі збільшенням ступеня деформації відбувається зміна форми імпульсного сигналу та його спектральних характеристик.

Подальший спектральний аналіз виконувався для дефекту радіального зміщення трьох верхніх витків обмотки. Осцилограми імпульсів, отримані на моделі та реальному трансформаторі, наведено на рисунках 3.9 та 3.10.

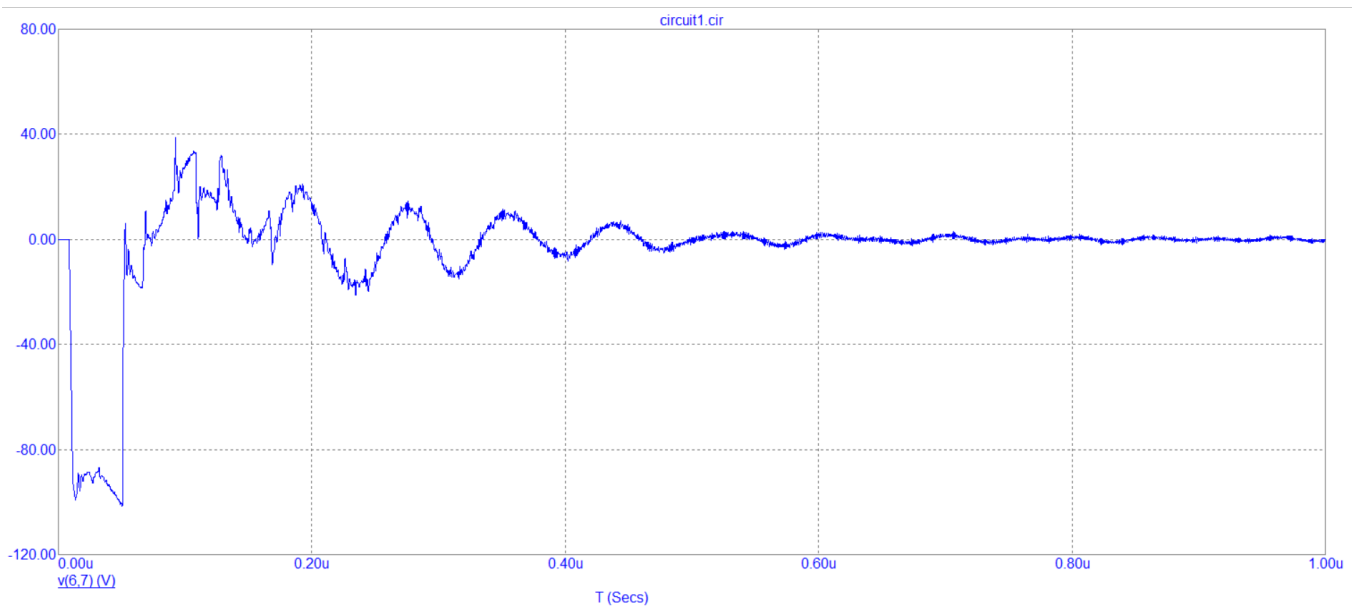


Рисунок 3.9 – Осцилограма зонduючого імпульсу при радіальному зміщенні трьох витків, отримана на моделі.

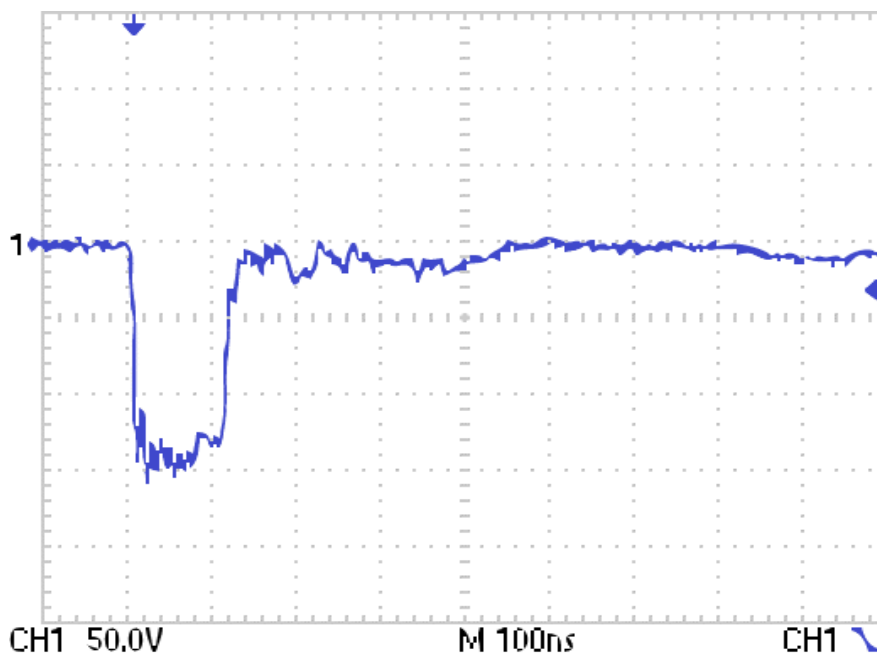


Рисунок 3.10 – Осцилограма зонduючого імпульсу при радіальному зміщенні трьох витків, отримана на реальному трансформаторі.

Для оцінювання впливу різного ступеня пошкодження було проведено моделювання радіального зміщення двох та трьох витків обмотки. Відповідні результати наведено на рисунках 3.11 та 3.12.

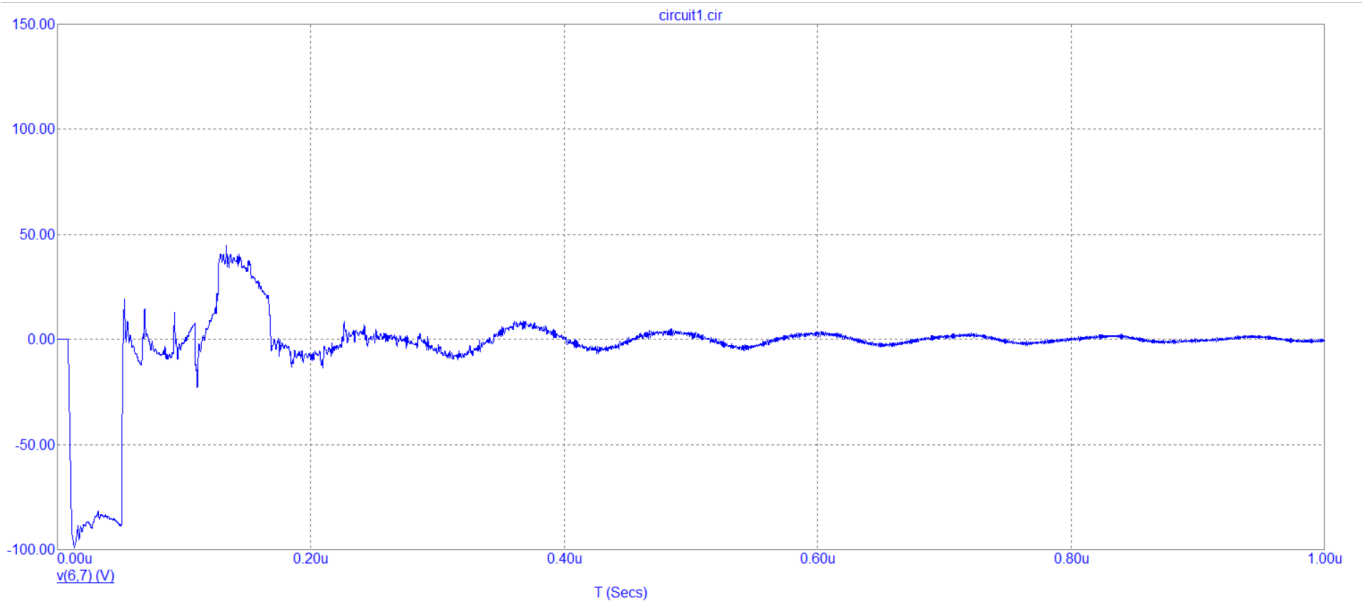


Рисунок 3.11 – Форма хвилі при дефекті «радіальне зміщення» двох витків, визначена за допомогою одноступеневого методу

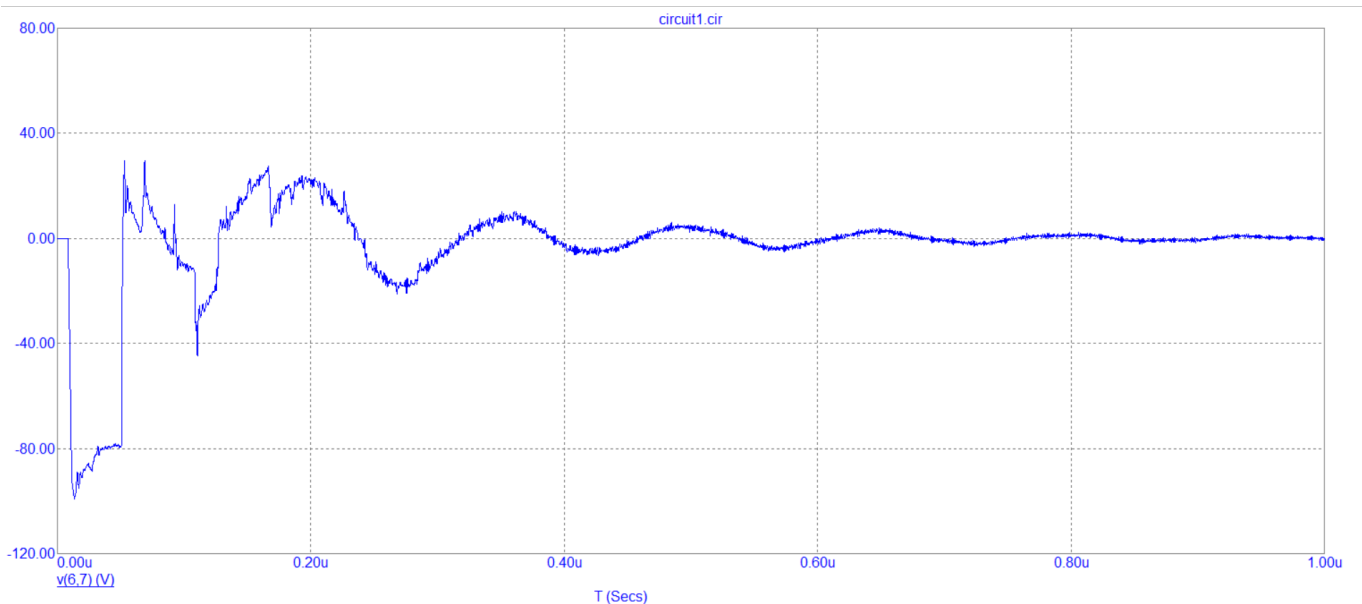


Рисунок 3.12 – Відношення амплітудно-частотних характеристик при дефекті «радіальне зміщення» трьох витків, визначена за допомогою одноступеневого методу

Відношення АЧХ спектрів дефекту «радіальне зміщення» 3 витків наведено на рисунку 3.13.

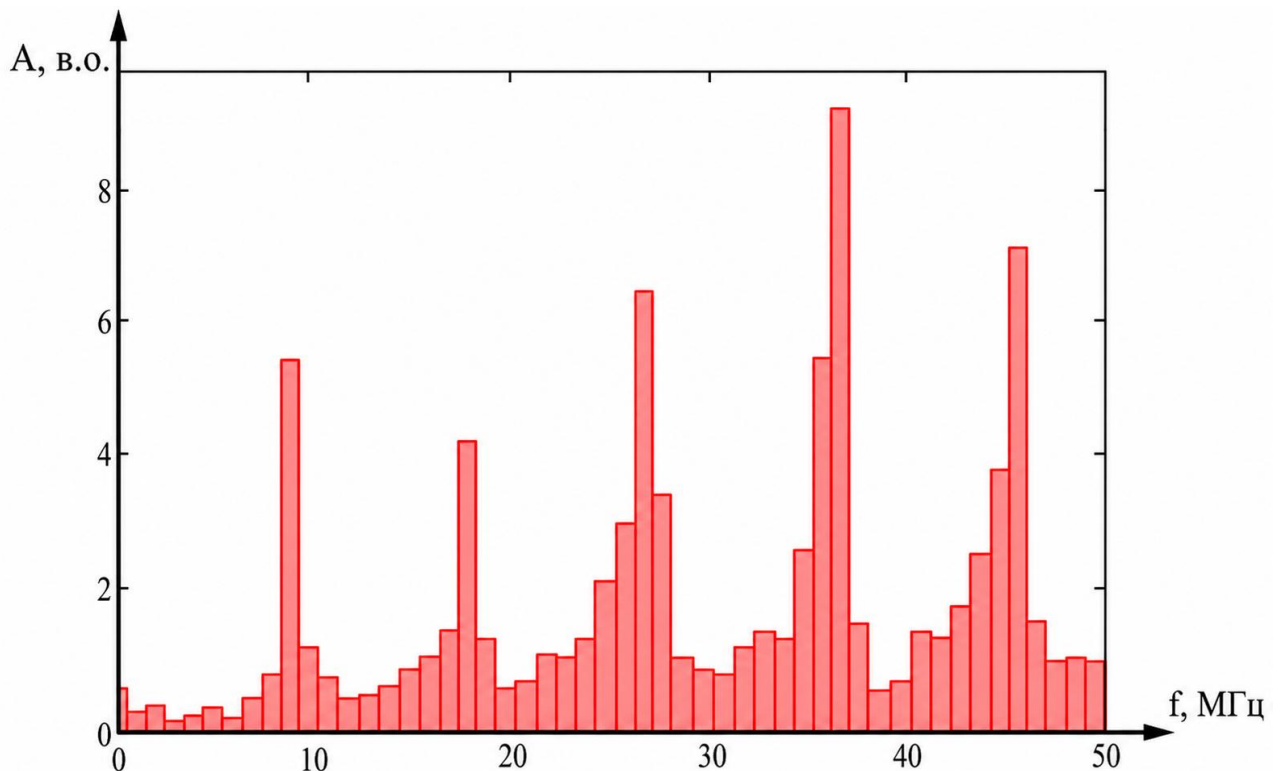


Рисунок 3.13 - Відношення АЧХ спектрів дефекту «радіальне зміщення» 3 витків

Проведені дослідження показали, що зі збільшенням кількості деформованих витків зростає відхилення спектральних характеристик від еталонних значень, що дозволяє оцінити ступінь розвитку пошкодження.

3.2.2 Дослідження дефекту типу «аксіальне зміщення»

Наступним етапом дослідження було моделювання аксіального зміщення витків обмотки, яке виникає під дією поздовжніх електродинамічних сил.

У даній роботі проведено моделювання дефекту аксіального зміщення чотирьох витків обмотки. Осцилограми імпульсних сигналів для двох варіантів моделі наведено на рисунках 3.14 та 3.15.

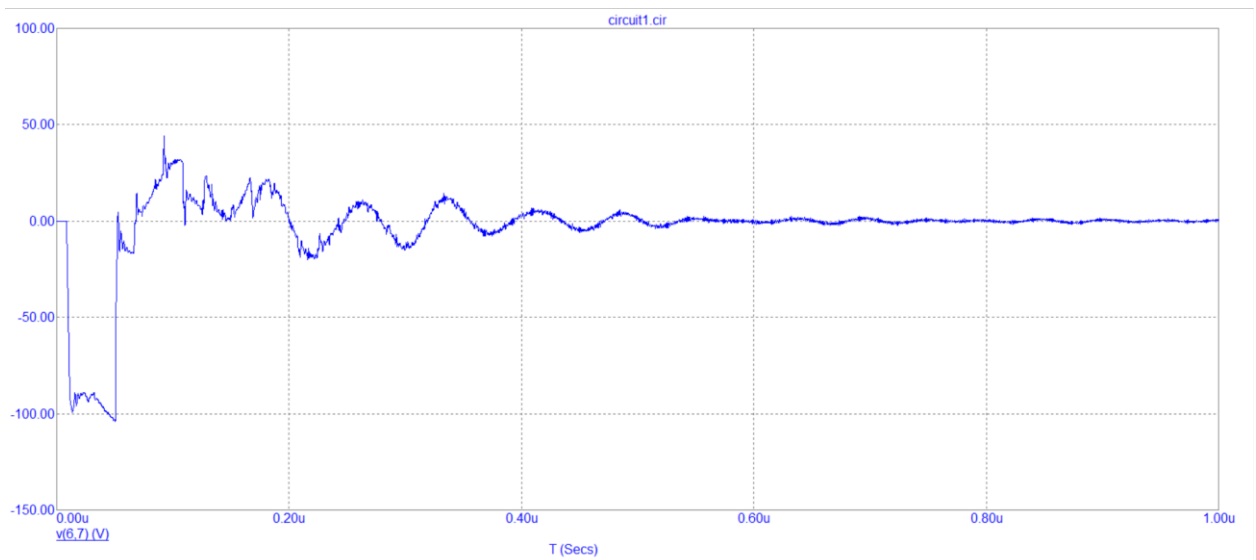


Рисунок 3.14 – Осцилограма зонduючого імпульсу при дефекті «аксіальне зміщення», модель №1 C2=20p C9=20p C14=18p

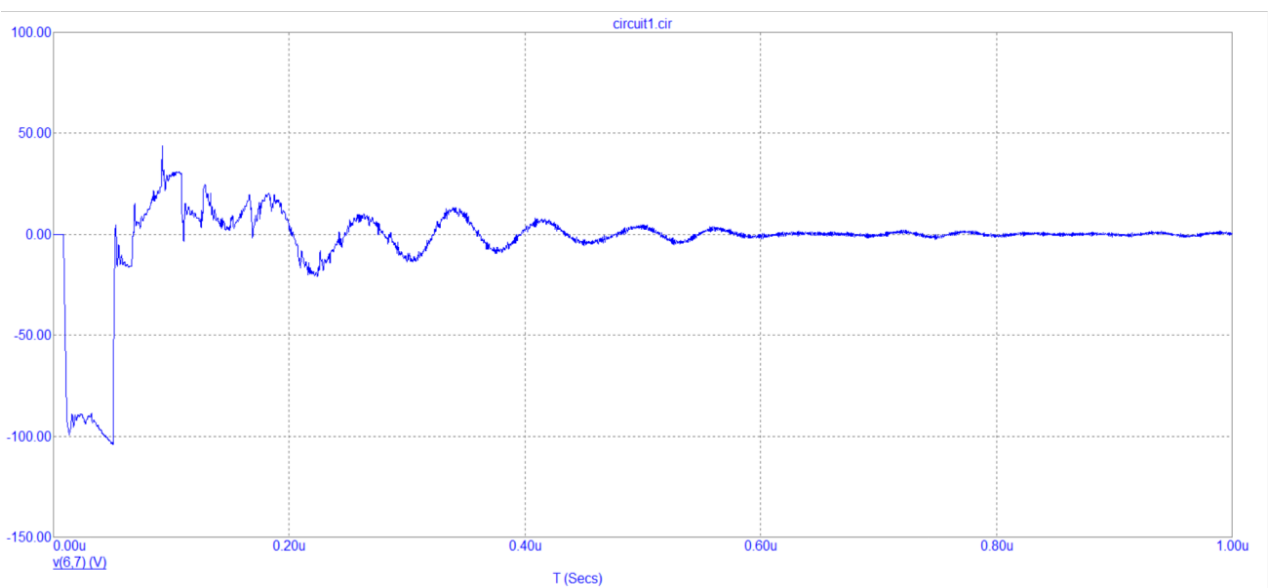


Рисунок 3.15 – Осцилограма зонduючого імпульсу при дефекті «аксіальне зміщення», модель №2 C2=30p C9=30p C14=30p

Подальший аналіз проводився із застосуванням одноступеневого методу діагностування та спектрального аналізу сигналів.

Форми хвиль та відповідні спектральні характеристики для різних ступенів аксіального зміщення наведено на рисунках 3.16–3.21.

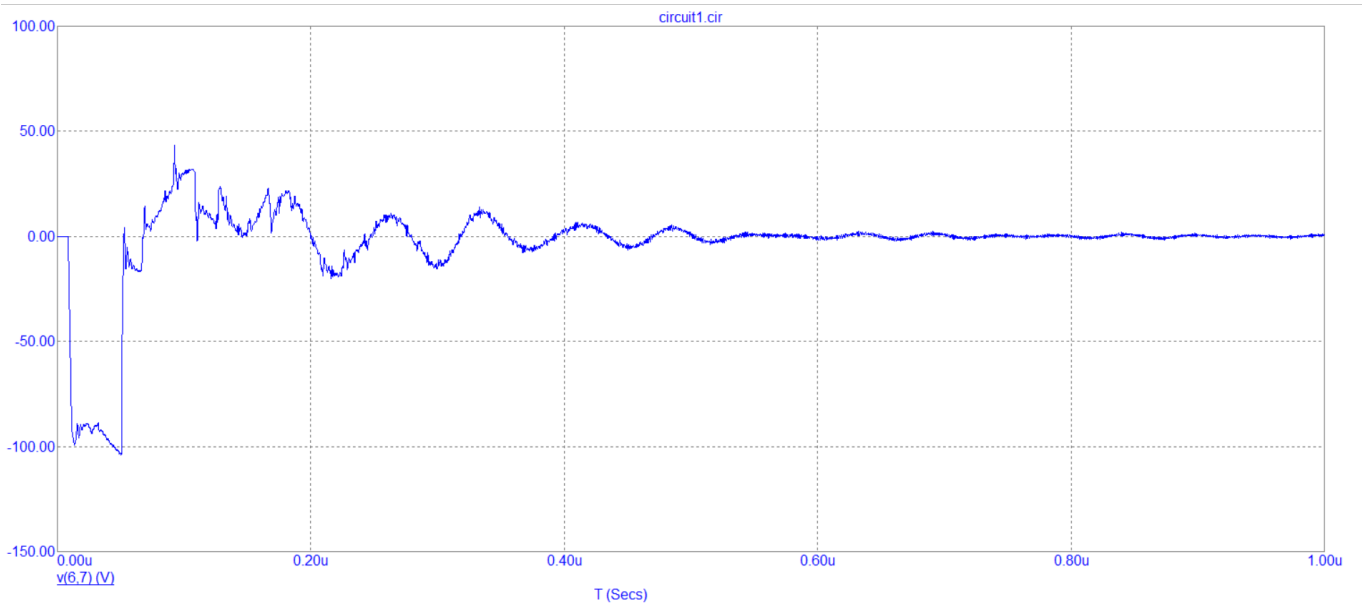


Рисунок 3.16 – Форма хвилі при дефекті «аксіальне зміщення» чотирьох витків, визначена за допомогою одноступінчастого методу

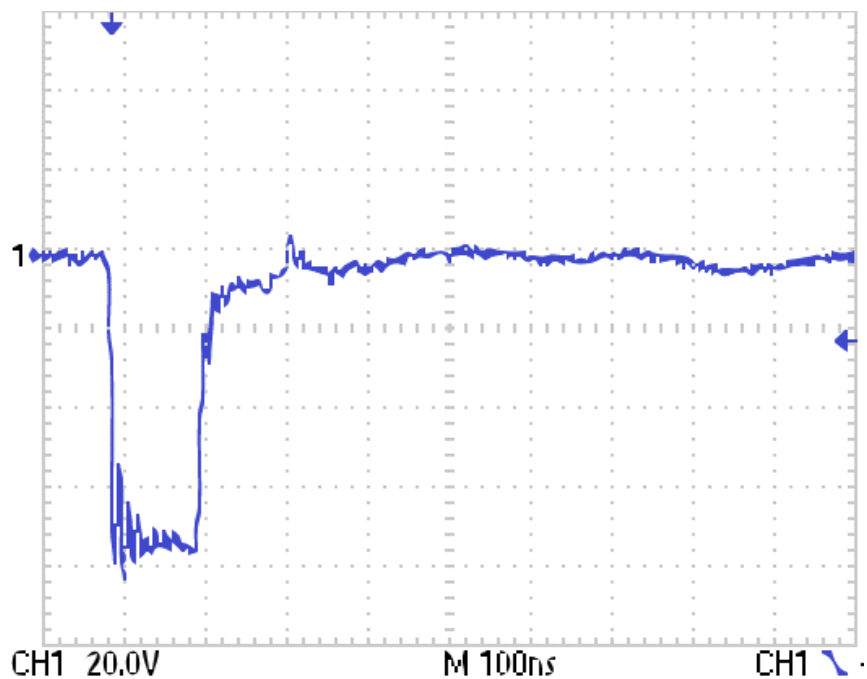


Рисунок 3.17 – Осцилограма імпульсу для реальної обмотки з дефектом «аксіальне зміщення», отримана при обстеженні реального трансформатора

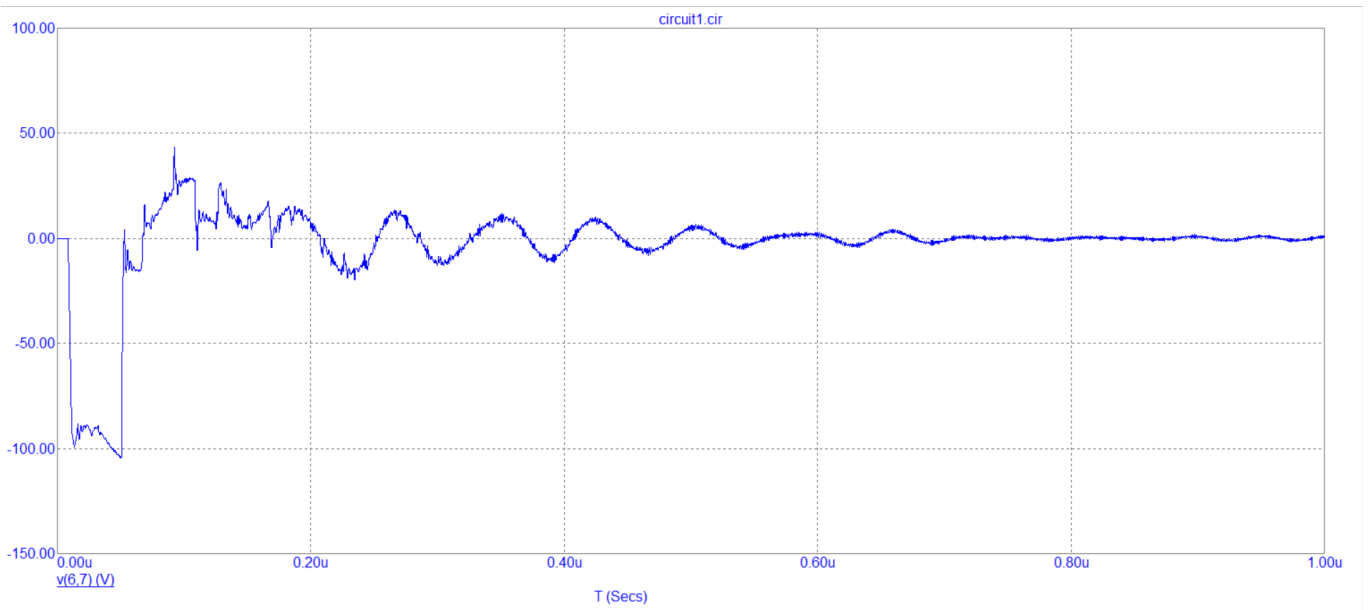


Рисунок 3.18 – Форма хвилі при дефекті «аксіальне зміщення» двох витків, визначена за допомогою одноступеневого методу

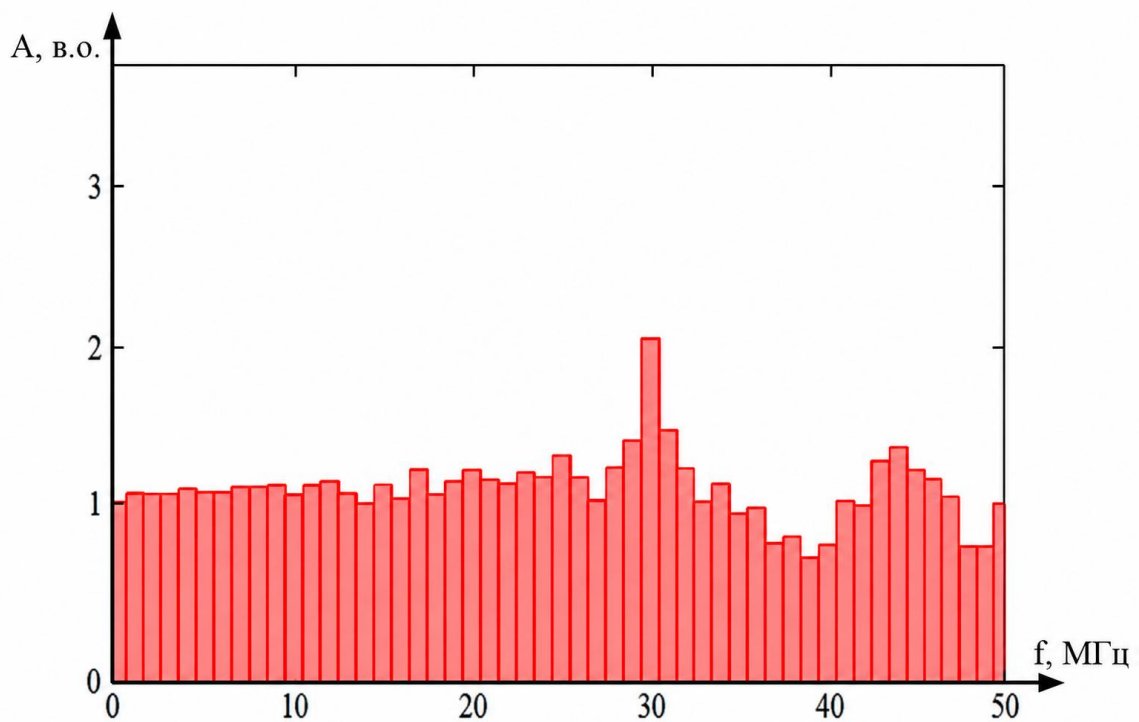


Рисунок 3.19 – Відношення АЧХ при дефекті «аксіальне зміщення» двох витків

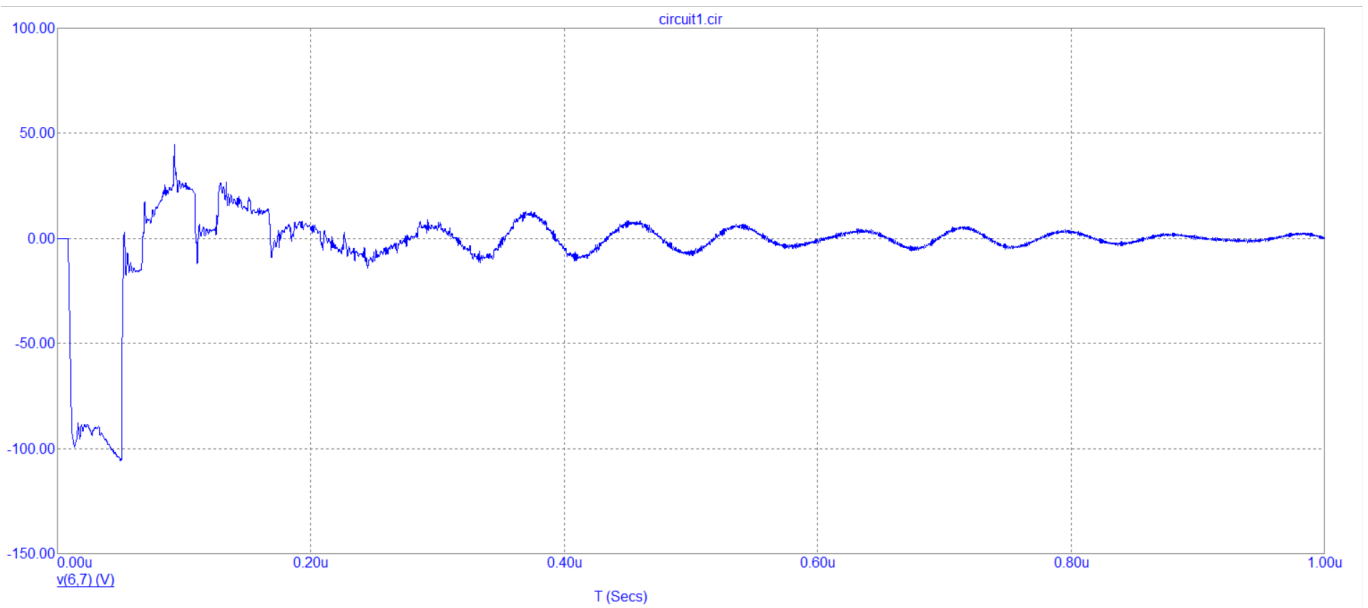


Рисунок 3.20 – Форма хвилі при дефекті «аксіальне зміщення» восьми витків, визначена за допомогою одноступінчастого методу

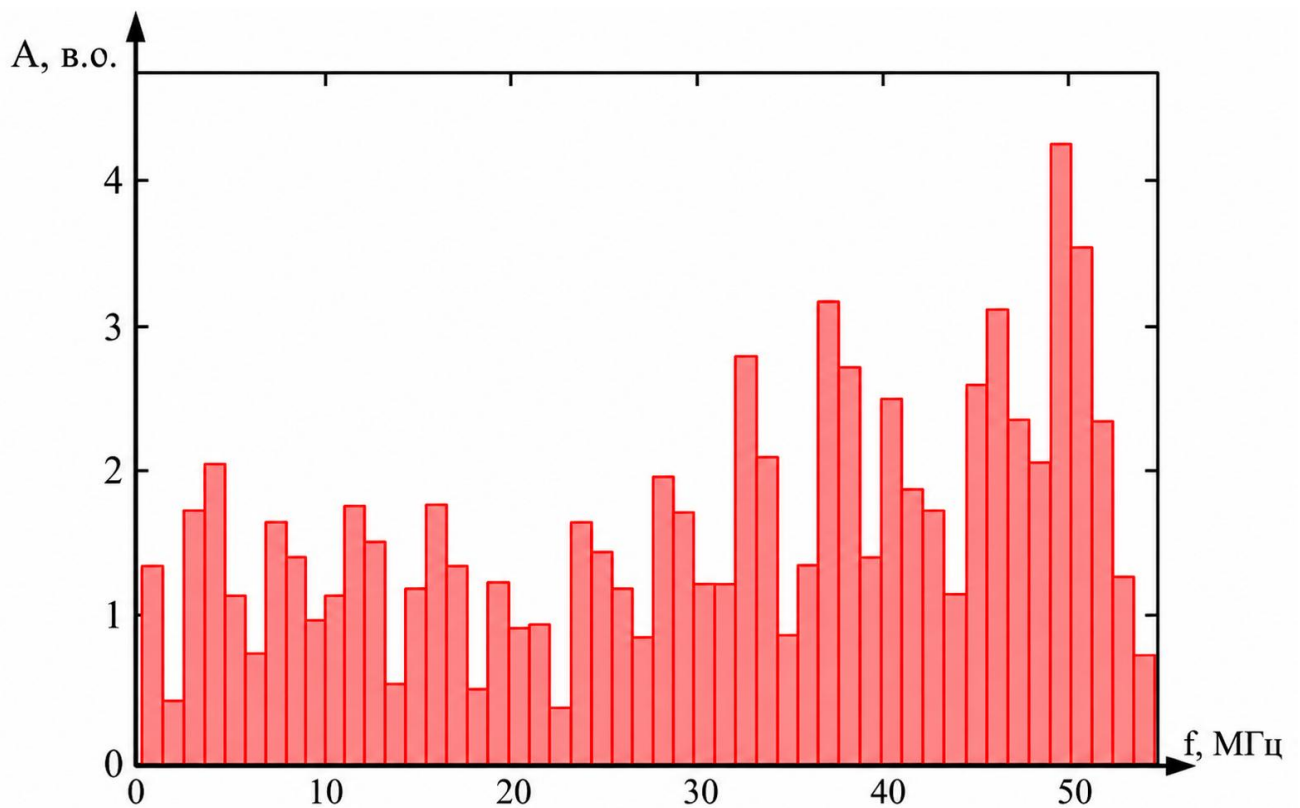


Рисунок 3.21 – Відношення АЧХ при дефекті «аксіальне зміщення» восьми витків

Аналіз результатів моделювання показує, що як радіальні, так і аксіальні деформації обмоток суттєво впливають на форму імпульсного сигналу та його

спектральний склад. При збільшенні ступеня розвитку дефекту відхилення амплітудно-частотних характеристик від еталонних значень стають більш вираженими, що дозволяє не лише виявляти наявність пошкодження, а й оцінювати ступінь його розвитку. Отримані результати підтверджують високу ефективність імпульсного дефектографування для діагностування механічних дефектів обмоток силових трансформаторів та можливість його практичного застосування в системах контролю їх технічного стану.

3.3 Висновки до розділу

У третьому розділі розроблено імітаційну модель обмоток силового трансформатора, яка дозволяє моделювати різні види механічних дефектів та досліджувати їх вплив на характеристики імпульсних сигналів. Для реалізації моделі використано програмне середовище **Micro-Cap**, а для обробки отриманих результатів застосовано метод спектрального аналізу на основі дискретного перетворення Фур'є.

У ході моделювання досліджено особливості двоступеневого та одноступеневого методів імпульсного дефектографування. Встановлено, що одноступеневий метод забезпечує більш просте проведення вимірювань і дозволяє ефективно використовувати спектральний аналіз для оцінювання технічного стану обмоток силового трансформатора. Отримані результати моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними, отриманими на реальних обмотках.

Проведено дослідження дефектів типу «радіальне зміщення» та «аксіальне зміщення» обмоток різного ступеня розвитку. Аналіз осцилограм і амплітудно-частотних характеристик показав, що зі збільшенням величини деформації відбуваються характерні зміни форми імпульсних сигналів і їх спектрального складу, які можуть бути використані як інформативні діагностичні ознаки. При цьому відхилення АЧХ від еталонних значень зростають пропорційно ступеню пошкодження обмоток, що дає можливість не лише виявляти дефекти, а й оцінювати рівень їх розвитку.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Охорона праці та електробезпека при експлуатації електроустановок

До виконання робіт з обслуговування електроустановок допускаються працівники, які досягли 18-річного віку, не мають медичних протипоказань, пройшли вступний та первинний інструктажі з охорони праці, відповідне виробниче навчання, стажування і перевірку знань нормативних документів з електробезпеки.

Персонал, який обслуговує електрообладнання, повинен добре знати схеми електропостачання об'єкта, володіти практичними навичками технічного обслуговування та ремонту електроустановок. Працівники забезпечуються необхідним спецодягом, спецвзуттям і засобами індивідуального захисту. Усі захисні засоби та робочий інструмент повинні проходити встановлені випробування, бути справними та використовуватися виключно за призначенням.

Під час експлуатації електроустановок застосовуються різноманітні електрозахисні засоби та допоміжні пристрої. Операції з ручного ввімкнення або вимкнення обладнання напругою понад 1000 В необхідно виконувати з використанням діелектричних рукавичок, калош або стоячи на ізолювальному килимку. Процедура відключення передбачає послідовне роз'єднання комутаційних апаратів, вилучення плавких вставок запобіжників та від'єднання приводів. Після цього встановлюються заборонні плакати, перевіряється відсутність напруги на відключеній ділянці та виконується відповідний запис в оперативному журналі. Повторне ввімкнення дозволяється лише після завершення робіт і внесення відповідної відмітки відповідальною особою.

Безпечна експлуатація електроустановок забезпечується не тільки технічними, а й організаційними заходами. До них належать оформлення нарядів-допусків, допуск персоналу до виконання робіт, постійний контроль та нагляд за дотриманням вимог безпеки.

Наряд-допуск є офіційним документом, який визначає місце виконання робіт, терміни їх проведення, умови безпечного виконання, склад бригади та

відповідальних осіб. Окремі нескладні роботи можуть виконуватися за розпорядженням без оформлення наряду, однак з обов'язковим записом в оперативному журналі. До таких робіт належать прибирання приміщень, очищення кожухів обладнання, доливання мастила до підшипників, обслуговування колекторів і контактних кілець, а також заміна запобіжників.

Під час виконання робіт в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги необхідно вживати додаткових заходів безпеки. Слід ізолювати або огородити сусідні струмовідні частини, використовувати діелектричне взуття чи ізолювальні підставки, а також застосовувати інструмент з ізольованими рукоятками. За відсутності такого інструменту необхідно користуватися діелектричними рукавичками.

Під час роботи із застосуванням ізолювальних засобів захисту необхідно тримати їх за спеціально передбачені рукоятки до обмежувального кільця. Ізолювальні елементи повинні розташовуватися таким чином, щоб виключити можливість перекриття ізоляції між фазами або замикання на землю. До використання допускаються лише сухі, чисті та механічно неушкоджені засоби захисту з непорушеним ізоляційним покриттям. У разі виявлення тріщин, пошкоджень або порушення лакового шару їх експлуатацію необхідно негайно припинити.

Щозмінний контроль технічного стану електрообладнання та електромереж здійснюється черговим електриком. Під час огляду перевіряються справність обладнання, відсутність ознак перегріву, стан антикорозійного покриття, надійність кріплень, цілісність кабельних вводів, справність систем заземлення, наявність попереджувальних написів і маркування. Також контролюється відсутність пилу, вологи та механічних пошкоджень на поверхнях електрообладнання.

У випадку виявлення аварійних режимів роботи силового трансформатора черговий персонал зобов'язаний негайно вивести його з експлуатації з дотриманням усіх вимог електробезпеки. Причинами аварійного відключення можуть бути сильний нерівномірний шум або тріск усередині трансформатора, надмірне нагрівання при номінальному навантаженні, викид масла через розширювач,

пошкодження захисної мембрани, а також витік масла зі зниженням його рівня нижче допустимого значення.

Про всі випадки аварійного відключення робиться запис в оперативному журналі та повідомляється особа, відповідальна за електрогосподарство підприємства.

Відповідно до вимог нормативних документів з технічної експлуатації електроустановок споживачів, необхідно регулярно проводити профілактичні огляди, планово-попереджувальні ремонти електричних мереж та електрообладнання, а також виконувати вимірювання опору ізоляції та параметрів заземлювальних пристроїв для забезпечення безпечної та надійної роботи електроустановок.

4.2. Проведення планування заходів цивільного захисту на підприємстві у випадку надзвичайних ситуацій

Екологічна обстановка у світі останніми роками погіршилась і вважається несприятливою. Засоби масової інформації майже щодня повідомляють про надзвичайні ситуації, що відбуваються у світі: лісові пожежі, повені, цунамі, землетруси, обвали, зсуви, селеві потоки, виверження вулканів, урагани, смерчі, снігові й пилові бурі та інші стихійні лиха, аварії і катастрофи на підприємствах і транспорті, що супроводжуються загибеллю людей, руйнуванням населених пунктів і об'єктів господарювання, у тому числі й у сільському господарстві, а часто забрудненням і зараженням довкілля.

Щорічно в нашій країні виникають надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру, що призводить до загибелі багатьох людей і значних матеріальних збитків.

Масштаби, характер руйнувань і кількість постраждалих людей залежать від типу, масштабу і місця аварії, катастрофи або стихійного лиха, від швидкості розвитку надзвичайної ситуації, особливостей регіону, об'єктів господарювання і населених пунктів, що опинилися в районі надзвичайної ситуації. Таку ситуацію

можна порівнювати з воєнними діями. Для проведення рятувальних робіт потрібне залучення великої кількості людей і матеріальних ресурсів, а несподіваний розвиток подій скорочує час на підготовку і проведення таких заходів.

Зниження масштабів людських втрат та матеріальних збитків, запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного і природного характеру, ліквідація їх наслідків є важливою загальнодержавною проблемою і одним з найважливіших завдань органів виконавчої влади, всіх органів керування цивільної оборони, керування всіх рівнів, спеціалістів і населення. Кардинальне вирішення проблем захисту населення і територій України від НС, зменшення їх соціально-економічних і екологічних наслідків можливе лише шляхом проведення цілого комплексу заходів.

У значній мірі досягнення цієї мети залежить від уміння керівників усіх рівнів (від об'єктового до урядового), спрогнозувати усі можливі наслідки НС, чітко спланувати заходи щодо їх запобігання та ліквідації, організувати керування під час їх виконання, високого стану готовності до дій у НС органів керування, сил і населення. Виконання всіх умінь, завдань, перш за все, буде залежати від якості планування та повноти виконання запланованих заходів на об'єктовому рівні .

Суть планування заходів ЦЗ, на випадок НС полягає в аналізі стану ЦЗ;

- оцінка обстановки, яка може скластися при виникненні аварій, катастроф і стихійних лих та застосування противником сучасних засобів ураження;
- розробка заходів, спрямованих на захист населення та підвищення стійкості функціонування в мирний час та в особливий період;
- установлення послідовності, строків, способів здійснення намічених заходів і виконавців та визначенні необхідних ресурсів для їх проведення.

Головною метою планування заходів ЦЗ є створення умов для:

- організованого і своєчасного проведення заходів захисту робітників, службовців, їх сімей і населення, яке мешкає в зоні можливого ураження;
- забезпечення успішного проведення рятувальних і невідкладних робіт (РіНР) при ліквідації наслідків НС техногенного та природного характеру;

– участі в територіальній обороні та антитерористичній діяльності в особливий період.

Планування має бути також спрямоване на те, щоб запобігти або максимально знизити людські та матеріальні втрати, а також забезпечити життєдіяльність галузі, регіону підпорядкованих їм об'єктів і населення у разі виникнення вищезазначених ситуацій.

При плануванні заходів ЦЗ на особливий період повинно забезпечуватися взаємне узгодження і ув'язка їх із заходами мобілізаційного розгортання народного господарства та заходами, які проводять військове командування та органи керування ЦЗ.

Планування повинно бути реальним, цілеспрямованим, конкретним, точним, гнучким, перспективним, базуватися на глибоко продуманих рішеннях, обґрунтованих розрахунках та враховувати специфіку і особливості діяльності. Воно повинно здійснюватися завчасно та забезпечувати своєчасний ввід планів ЦЗ в дію, особливо під час раптового виникнення НС техногенного та природного характеру і в особливий період.

Документами для планування є укази Президента України, законодавчі акти ВРУ, постанови та розпорядження КМУ, «План реагування на НС державного рівня», витяги з рішення начальника ЦЗ області, району по організації та веденню ЦЗ на території області або району, витяг з «Плану організації евакозаходів та визначення місць розміщення евакуйованого населення».

На об'єктах господарювання повинні бути розроблені два плани, а саме:

- дій з попередження та ліквідування НС (на мирний час);
- цивільного захисту (на военний час).

Головна мета цих планів – максимальне зниження людських та матеріальних втрат у будь-яких умовах обстановки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано дослідження технічного стану обмоток силових трансформаторів та розглянуто можливості застосування методу імпульсного дефектографування для виявлення їх механічних пошкоджень.

Досліджено сучасні методи діагностування силових трансформаторів та визначено, що найбільш ефективними для контролю стану обмоток є неруйнівні методи випробувань. Серед них метод імпульсного дефектографування характеризується високою інформативністю, можливістю локалізації пошкоджень та відносною простотою реалізації.

Розроблено імітаційну модель обмоток силового трансформатора, яка дозволяє моделювати різні види дефектів та досліджувати їх вплив на характеристики імпульсних сигналів. Створена модель забезпечує можливість відтворення радіальних та аксіальних зміщень обмоток, міжвиткових коротких замикань та інших локальних пошкоджень різного ступеня розвитку. Для проведення моделювання використано програмне середовище Micro-Cap, а для аналізу отриманих результатів застосовано методи цифрової обробки сигналів.

Проведено дослідження двоступеневого та одноступеневого методів імпульсного дефектографування. Встановлено, що використання одноступеневого методу у поєднанні зі спектральним аналізом дозволяє спростити процес проведення вимірювань та підвищити інформативність отриманих результатів. Використання дискретного перетворення Фур'є забезпечує можливість переходу від часового представлення імпульсного сигналу до його спектральних характеристик, що значно полегшує виявлення дефектів та оцінювання їх розвитку.

За результатами моделювання встановлено, що виникнення радіальних та аксіальних зміщень обмоток супроводжується характерними змінами форми імпульсних сигналів та їх амплітудно-частотних характеристик. При збільшенні ступеня розвитку механічних пошкоджень відхилення спектральних характеристик від еталонних значень стають більш вираженими, що дозволяє не лише виявляти дефекти, а й оцінювати ступінь їх розвитку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. J. M. Vilanueva-Ramirez, "Implementation of transformers models for highfrequency electromagnetic analysis," National Polytechnic Institute, Mexico city, 2013.
2. M. Mahvi and V. Behjat, "Localising low-level short-circuit faults on the windings of power transformers based on low-frequency response measurement of the transformer windings," *Electric Power Applications, IET*, vol. 9, no. 8, pp. 553-539, 2015.
3. I. A. Metwally, "Failures, Monitoring and New Trends of Power Transformers,," *IEEE Potentials*, vol. 30, no. 3, pp. 36-43, May 2011.
4. Буняк О. А. Електричні машини : Навчальний посібник /. — Тернопіль : ФОП Паляниця В.А. , 2023 — 324 с.
5. G. Liang, H. Sun, X. Zhang and X. Cui, "Modeling of Transformer Windings Under Very Fast Transient Overvoltages," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions*, vol. 48, no. 4, pp. 621 - 627, 2006.
6. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М.Куценко, В.Ф.Яковлев та ін.—К.: Аграрна освіта, 2013. —449 с..
7. АНДРІЙЧУК, В., НАКОНЕЧНИЙ, М., ФІЛЮК, Я., КОСТИК, Л., & КОЗАК, І. (2023). Електропривід рухомої опромінювальної установки. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 329(6), 44-48.
8. J. M. Villanueva-Ramírez, . P. Gómez, F. . P. Espino-Cortés and . G. Nájera, "Implementation of time domain transformer winding models for fast transient analysis using Simulink," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 61, p. 118–126, October 2014.
9. Y. Li, J. Du, X. Li and D. Li, "Calculation of capacitance and inductance parameters based on FEM in high-voltage transformer winding," in *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2011 International Conference, Beijing, 2011.

10. M. Eslamian and B. Vahidi, "New Methods for Computation of the Inductance Matrix of Transformer Windings for Very Fast Transients Studies," *Power Delivery, IEEE Transactions*, vol. 27, no. 4, pp. 2326 - 2333, 2012.

11. M. Popov, L. van der Sluis, R. P. Smeets, J. Lopez-Roldan and V. V. Terzija, "Modelling, simulation and measurement of fast transients in transformer windings with consideration of frequency-dependent losses," *IET Electric Power Appl.*, vol. 1, no. 1, pp. 29-35, Jan. 2007.

12. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.

13. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.