#### 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)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

спеціальності

на тему:

#### магістр (назва освітнього ступеня) ДОСЛІДЖЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРІВ ТЕСТУВАННЯМ НИЗЬКОВОЛЬТНИМИ ІМПУЛЬСАМИ

Виконав(ла): студент 6 курсу, групи ЕТм

141

«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності) Завіша І.С. (підпис) (прізвище та ініціали) Керівник Зінь М.М. (підпис) (прізвище та ініціали) Нормоконтроль Коваль В.П. (прізвище та ініціали) (підпис) Завідувач кафедри Коваль В.П. (підпис) (прізвище та ініціали) Рецензент (прізвище та ініціали) (підпис)

Міністерство освіти і науки України	
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулі	юя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

Кафедра Електричної інженерії

(повна назва факультету)

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис) (прізвище та ініціали) «14» жовтня 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

#### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освіт	гнього ступеня	магістр	
			(НАЗВА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ)
за спеціальністю	<u> 141 – Електроен</u>	ергетика, еле	ктротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)			
студенту	Завіші Ігорові Степановичу		
		(Прізві	ище, Ім'я, По Батькові)
1. Тема роботи Дослідження цілісності обмоток трансформаторів тестуванням			
низьковольтними імпульсами			

Керівник роботи Зінь Мирослав Михайлович к.т.н.

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

Затверджені наказом ректора від «<u>11</u>» <u>жовтня</u> <u>2024</u> року №<u>4/7-988</u>

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень 2024 року

3. Вихідні дані до роботи Розробити модель трансформатора для дослідження

ефективності контролю стану обмоток за різних параметрів зондувального імпульсу. Розробити методику оцінки результатів контролю стану обмоток і програму для аналізу результатів дефектографування обмоток зондувальними імпульсами наносекундної тривалості. Розробити діагностичний комплекс для контролю стану обмоток трансформаторів на основі результатів проведених досліджень.

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

1. Аналітичний розділ

2. Розрахунково-дослідницький розділ

3. Проектно-конструкторський розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

#### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ		Підпис, дата		
	прізвище, ініціали та посада	завдання	завдання	
	консультанта	видав	прийняв	
Охорона праці.	Гурик О. Я. к.т.н., доцент			
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В.М., старший викладач			
Нормоконтроль	Коваль В.П. к.т.н., зав. кафедри EI			

#### 7. Дата видачі завдання <u>14 жовтня 2024 року</u>

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

No		Термін		Прим
л <u>∘</u>	Назва етапів роботи	виконання	ittea	
3/11		етапів роботи	пка	
1	Вступ	20.10.2024		
2	Аналітичний розділ	1.11.2024		
3	Розрахунково-дослідницький розділ	10.11.2024		
4	Проектно-конструкторський розділ	25.11.2024		
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	29.11.2024		
6	Висновки	01.12.2024		
7	Оформлення пояснювальної записки	06.12.2024		
8	Оформлення графічної частини	12.12.2024		

Студент

(підпис)

Завіша І.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Зінь М.М. (прізвище та ініціали)

#### РЕФЕРАТ

Завіша І.С. Дослідження цілісності обмоток трансформаторів тестуванням низьковольтними імпульсами.

Стор.73; рис.40; табл.2; креслень - ; джерел -12; додатків - 0.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження шляхів підвищення ефективності контролю стану обмоток трансформаторного устаткування на основі імпульсного дефектографування.

У першому розділі дається огляд літератури та теоретичної бази теми. Це також пояснює деякі концепції розуміння проблеми та деякі очікувані результати.

В другому розділі представлено розроблений діагностичний комплекс для контролю стану обмоток трансформаторів, реалізований на основі генератора зондувальних імпульсів, який дає змогу формувати імпульс тривалістю в діапазоні 60 - 500 нс із фронтом 25 нс на навантаженні з довільним імпедансом. Удосконалено імітаційну математичну модель обмоток трансформатора, що дає змогу моделювати перехідні процеси в обмотках.

У третьому розділі представлено експерименти із дослідження процесу контролю стану обмоток методом низьковольтних імпульсів Показано, що за імпульсного методу дефектографування стану обмоток трансформатора для виявлення зміщення витків обмотки та короткого замикання витків висока чутливість досягається за тривалості імпульсу 60 - 500 нс із фронтом 15 - 20 нс.

Ключові слова: трансформатор, генератор імпульсів, математична модель.

#### **3MICT**

Реферат 3

3MICT 4

ВСТУП 6

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ 9

1.1 Аналіз застосовуваних технологій контролю стану обмоток високовольтних трансформаторів 9

1.1.1 Вимірювання втрат холостого ходу 9

1.1.2Вимірювання опору ізоляції обмоток трансформатора 10

1.1.3 Вимірювання коефіцієнта трансформації 11

1.1.4 Вимірювання опору обмоток на постійному струмі 11

1.1.5 Вібраційний контроль 13

1.1.6 Метод низьковольтних імпульсів 15

1.2. Висновок до розділу 20

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ 21

2.1 Розроблення та створення фізичної моделі силового трансформатора21

2.2 Розробка принципової схеми та макетного зразка генератора зондувальних імпульсів 22

2.3 Розробка і створення математичної моделі силового трансформатора34

2.4 Висновки до розділу 43

3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ 45

3.1. Дослідження на фізичній моделі силового трансформатора. Виявлення міжвиткових коротких замикань 45

3.1.1 Проходження зондувального імпульсу низьковольтною обмоткою трансформатора 48

3.1.2 Проходження зондувального імпульсу високовольтною обмоткою трансформатора 51

3.2 Експерименти з виявлення радіального й аксіального зміщення витків обмотки 54

3.3 Закономірності зміни форм відгуків за різних способів з'єднання обмоток 55

3.4 Експерименти, що підтверджують високу чутливість методу наносекундних імпульсів 58

3.4.1 Вплив форми зондувального імпульсу на чутливість діагностичної процедури 59

3.4.2 Вплив тривалості зондувального імпульсу на чутливість діагностичної процедури 60

3.3.3 Вплив тривалості фронту зондувального імпульсу на чутливість діагностичної процедури 62

3.5 Висновки до розділу 63

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 65

4.1 Охорона праці 65

4.1.1. Техніка безпеки при експлуатації електромереж 65

4.2. БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 67

4.2.1 Дослідження стійкості роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі 67

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 71 ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 72

#### ВСТУП

Актуальність теми роботи. Нині в енергетиці відчувається надлишок застарілого обладнання. парку високовольтного силового У багатьох електроенергетичних організаціях знос силового обладнання доходить до 80-90 %. Проте більшість одиниць обладнання, що потребує заміни, залишається в експлуатації. Це пов'язано, насамперед, з економічними причинами відсутність необхідних коштів на заміну морально і фізично застарілого силового обладнання. Одним із пріоритетних напрямів підтримання цього обладнання в надійному робочому вигляді в електроенергетиці нині вважається експлуатація та ремонт електрообладнання за станом. Звідси зростають витрати на їхнє утримання, тому що в процесі експлуатації зношеного обладнання потрібне обстеження діагностика. неминуче його комплексне та Трансформатори, що виробили призначений технічними умовами термін служби, також залишаються в експлуатації, тому що коштів на їх заміну теж недостатньо. Силові трансформатори належать до розряду основного електроенергетичного обладнання, і від їх надійності значною мірою залежить надійність роботи всієї енергосистеми загалом. Забезпечення надійної експлуатації силових трансформаторів спирається на відомі технології контролю їхнього стану. Багато з цих технологій спираються на складні й дорогі прилади та обладнання, вимагають висококваліфікованого персоналу і вимагають, як правило, вимкнення трансформатора від мережі, що є трудомістким і забирає чималі витрати коштів і часу. У зв'язку з цим удосконалення відомих методів, а також пошук і розробка нових, що задовольняють сучасним вимогам, засобів і методів контролю стану силових трансформаторів є складним, але актуальним завданням. Серед широкого спектра можливих дефектів трансформаторів можна виокремити такі, що проявляються не одразу, а протягом кількох місяців і навіть років. До них можна віднести зсув витків обмотки в осьовому, радіальному і діагональному напрямках, розпресування обмоток, випучування окремих витків. Такі дефекти, змінюючи геометрію обмотки, практично не впливають на основні параметри

трансформатора, такі як струми, втрати, індуктивності обмоток. Проте через зміну відстані між витками, наприклад, під час їхнього зсуву, змінюються локальні електричні між деякими витками напруженість поля: поля збільшується, а між деякими - зменшується. У місцях збільшення електричного поля щодо штатного починають прискорено розвиватися процеси деструкції целюлозовмісної ізоляції, виникають локальні перегріви масла, з'являються часткові розряди. Усі ці процеси в сукупності ведуть до деградації ізоляції, що призводить до непередбачуваного міжвиткового замикання або, у разі замикань за трансформатором, до протікання через обмотки трансформатора струмів короткого замикання (КЗ), які погіршують ситуацію з відхиленням витків від штатного взаємного розташування та подальшого прискорення деградації ізоляції.

Мета і завдання роботи: є дослідження шляхів підвищення ефективності контролю стану обмоток трансформаторного устаткування на основі імпульсного дефектографування.

Досягнення мети визначається вирішенням наступних завдань:

1. розробити модель обмотки трансформатора для дослідження ефективності контролю стану обмоток за різних параметрів зондувального імпульсу;

2. дослідити вплив параметрів зондувального імпульсу на ефективність контролю стану обмоток на реальному високовольтному трансформаторному обладнанні;

3. розробити методику оцінки результатів контролю стану обмоток і програму для аналізу результатів дефектографування обмоток зондувальними імпульсами наносекундної тривалості;

4. розробити діагностичний комплекс для контролю стану обмоток трансформаторів на основі результатів проведених досліджень.

**Об'єкт дослідження:** Процеси оцінки стану обмоток силових трансформаторів та перевірки їхньої цілісності за допомогою низьковольтного імпульсного тестування

**Предмет дослідження:** Техніко-енергетичні характеристики основних показників обмоток високовольтних трансформаторів.

#### Наукова новизна отриманих результатів:

Удосконалено імітаційну модель обмоток трансформатора, яка дає змогу моделювати перехідні процеси в обмотках із врахуванням ємностей між витками обмотки, між витками та корпусом трансформатора, між витками обмоток сусідніх фаз, що дає змогу розрахунковим шляхом, порівнюючи експериментальну дефектограму з розрахунковою, виявляти характер дефектів в обмотці.

#### Практична цінність результатів дослідження

Розроблено діагностичний комплекс для контролю стану обмоток високовольтних трансформаторів, який можна застосовувати в електроенергетичних системах; діагностичний комплекс містить імпульсний генератор зі ступінчастим регулюванням тривалості зондувального імпульсу.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і її результати доповідалися на XIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2024 р.)

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 розділів, висновків та переліку посилань.

#### 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

# 1.1 Аналіз застосовуваних технологій контролю стану обмоток високовольтних трансформаторів

1.1.1 Вимірювання втрат холостого ходу

Для визначення втрат XX у трифазних трансформаторів вимірювання проводять шляхом однофазного збудження. Перед проведенням випробування необхідно перевірити надійність заземлення трансформатора.

Випробування проводять у такій послідовності: будь-яку обмотку замикають накоротко, до іншої обмотки підводять напругу. Схема проведення випробування наведена на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 - Схеми з'єднання обмоток

Вимірювання за схемою, наведеною на рисунку 1.1, зазвичай проводять шляхом підведення напруги до двох фаз при закороченій обмотці третьої фази, щоб спричинити найбільше намагнічування сердечника трансформатора. Зазвичай напругу підводять до обмотки низької напруги, це спрощує вимірювання. Недоліком цього методу є обмеженість у точності та достовірності виявлення дефектів обмотки. 1.1.2Вимірювання опору ізоляції обмоток трансформатора

Вимірювання опору ізоляції відносно корпусу і відносно один одного за допомогою мегаомметра широко використовується в експлуатації. Метод простий, не вимагає високої кваліфікації виконавців і дає однозначні результати.

Під час введення в експлуатацію та під час профілактичних випробувань вимірювання опору ізоляції проводять відповідно до схем, що застосовуються заводом-виробником, і також додатково за зонами ізоляції. Під час профілактичних випробувань дозволяється проведення вимірювань тільки за зонами ізоляції.

Температура вимірюваної ізоляції під час вимірювань її опору має бути не нижчою:

10 °С - для трансформаторів напругою до 150 кВ включно;

20 °С - для трансформаторів напругою 220-750 кВ.

Опір ізоляції обмоток трансформаторів має відповідати нормованим, наведеним у таблиці 1.1.

Температура обмотки, t Со	10	20	30	40	50
Опір ізоляції 35 кВ, МОм, більше	450	300	200	130	90
Опір ізоляції 110 кВ, МОм, більше	900	600	400	260	180
tg ізоляції обмоток, %	1,8	2,5	3,5	5,0	7,0

Таблиця 1.1 - Опір ізоляції обмоток трансформаторів

До недоліків цього методу можна віднести обмеження за діапазоном температур, за яких вимірюють опір ізоляції, а виявлення дефектів відбувається на стадії близькій до критичної.

1.1.3 Вимірювання коефіцієнта трансформації

Перевірку правильності приєднання регулювальних відводів обмотки до перемикача, а також виявлення помилок у складанні схеми перемикального пристрою під час ремонту виявляють вимірювання коефіцієнта трансформації.

Визначення коефіцієнта трансформації трансформаторів струму проводиться за алгоритмом:

- дроти в первинному колі підбираються за номінальним струмом первинного ланцюга;

- заміри на амперметрах проводять при показаннях у другій половині шкали (для підвищення точності вимірювання);

- коефіцієнт трансформації підраховують за формулою:

$$K = \frac{I_1}{I_2} \tag{1.1}$$

де К - коефіцієнт трансформації; I<sub>1</sub> - струм первинного кола, I<sub>2</sub> - струм вторинного кола.

Основні недоліки методу - обмежена кількість визначуваних дефектів, при цьому вони вже мають високий ступінь розвиненості.

1.1.4 Вимірювання опору обмоток на постійному струмі

Вимірювання опору обмоток необхідне для виявлення стану контактних з'єднань і відсутності обривів в обмотках трансформатора. Дефекти, які можна виявити цим вимірюванням:

1) обрив хоча б одного елементарного провідника в паралельних гілках;

2) неякісне паяння провідників і відводів;

3) поганий контакт у ПБВ і РПН;

4) неправильне положення контактів приводу ПБВ.

Згідно з нормативами омічний опір вимірюють методом амперметра і вольтметра. Можливі дві схеми вимірювання методом амперметра і вольтметра. Як показано на рисунку 1.2, а, проводять вимірювання значень опорів від часток ом до кількох ом. Вимірювання великих значень опорів проводять за схемою, як показано на рисунку 1.2, б.



Рисунок 1.2 - Схеми вимірювання омічного опору обмотки трансформатора постійному струму

Схема вимірювань омічного опору, наведена на рисунку 1.2, а, найбільш популярна на практиці. Напругу вимірюють за приєднанням струмопідводів від джерела постійного струму до обмотки трансформатора, щоб виключити вплив перехідного опору місця приєднання. Напруга джерела живлення не більше 24 В, струм - не більше 10 А.

Нормативи обмежують відхилення значень опорів від зазначених у паспорті на трансформатор у межах 2 % з урахуванням температури обмотки. Якщо вимірювання опору проводять за температури обмотки, що відрізняється від паспортної, то вона визначається за формулою (1.2). Вимірювання проводити за методикою, описаною в [1-10].

$$R_x = \frac{R_0(235 + t_x)}{235 + t_0} \tag{1.2}$$

де  $R_x$  - виміряне значення опору за  $t_x$ ; Ом;  $R_0$  - значення опору за паспортної температури  $t_0$ , Ом;  $t_0$  - температура обмотки під час вимірювання, °C;  $t_x$  - паспортна температура, °C.

Цей метод має такі недоліки:

- вимірювання мають проводитися за температури не нижче 10 °C;
- використовувані прилади мають бути високого класу точності;
- виявляються тільки сильно розвинені дефекти.

1.1.5 Вібраційний контроль

Ослаблення ступеня пресування обмоток можна розглядати як початкову стадію дефектного стану, що веде до розвитку більш серйозних і небезпечних дефектів обмотки. Для контролю ступеня пресування обмоток застосовується вібраційного [88, технологія контролю 89]. Вібраційну діагностику оцінювання трансформатора проводять стану для активних частин трансформатора: зовнішніх пристроїв, як-от трубопроводи, підшипники насосів охолодження і вентиляції, і стану внутрішніх елементів, як-от пресування обмоток, пресування магнітопроводів, [90].

У силовому трансформаторі вібрації: два джерела основних магнітопровід і система охолодження. Магнітопровід є джерелом гармонійних коливань із частотою кратною 100 Гц, спричиненою магнітострикцією заліза сердечника. Вібрація від системи охолодження пов'язана з роботою насосів і трансформаторів вентиляторів. Для потужних вібрація віл системи охолодження, як правило, менша, ніж від магнітопроводу. Усі джерела вібрацій передають коливання на різні вузли трансформатора, але найбільш сприйнятливий до них бак трансформатора. Зазвичай із нього і починають вимірювання вібрацій під час обстеження силового трансформатора. Під час обстеження визначають:

вібраційну швидкість, яка є характеристикою енергії вібрації. За вібраційною швидкістю можна оцінити стан бака трансформатора і вплив на фундамент;

вібраційним прискоренням називають прискорення, яке виникає від вібрації внутрішніх елементів і передається на бак трансформатора;

вібраційним переміщенням називають переміщення від вібрації, що впливають на бак трансформатора, зварні шви та інші елементи.

Якщо побудувати графік залежності вібраційної швидкості від частоти вібрації трансформатора, то це дасть змогу порівнювати один трансформатор з іншим або визначити, чи відбуваються зміни в досліджуваному трансформаторі чи ні в процесі експлуатації. Рекомендується проводити вимірювання в

діапазоні частот від 100 Гц до 1000 Гц. У цьому діапазоні частот, як правило, зосереджено понад 90 % всієї енергії від коливань елементів трансформатора.

У разі оцінки стану трансформатора за допомогою вібраційних характеристик слід пам'ятати, що додатковий аналіз трансформатора необхідний у разі, якщо:

вібраційне прискорення - понад 10 м/с<sup>2</sup>;

вібраційна швидкість - понад 20 мм/с;

вібраційне переміщення - понад 100 мкм.

Оцінка стану охолоджувальної системи трансформатора (маслонасосів і вентиляторів) вимагає зняття їхніх вібраційних характеристик і порівняння з контрольними:

вібраційна швидкість на підшипниках вища за 7,1 мм/с;

вібраційна швидкість маслонасоса вища за 4,5 мм/с.

На підставі аналізу спектрального складу бака трансформатора можна обмоток і магнітопроводу. пресування Вібраційні судити про стан характеристики знімають у двох режимах: у режимі холостого ходу трансформатора і під навантаженням. У режимі холостого ходу вібрації виникають переважно через магнітострикцію в осерді. Під навантаженням у трансформаторі виникають вібрації внаслідок електромагнітних сил В обмотках. Експериментально встановлено, що в разі недостатнього стиснення листів сталі магнітопроводу виникають коливання частотою 300-500-700 Гц. Недостатнє пресування обмотки спричиняє зниження частоти коливань до 200 Гц.

Відомий інший спосіб визначення стану пресування обмоток вібраційним методом, що полягає у вимірюванні частот електричних коливань обмотки на виводах розшинованого трансформатора під час впливу на обмотку механічними ударами. Збуджена в обмотці електрорушійна сила має вигляд затухаючої коливальної кривої, спектр якої за різних ступенів пресування обмотки різний. Приклад такого спектра, отриманий у роботі [8], наведено на рисунку 1.4.

Недоліками цього методу є:

підвищені вимоги до конструкції кріплення вібродатчика;

спектр одержуваних індукованих електрорушійних сил залежить від безлічі конструктивних параметрів обмотки трансформатора.

Зі спектра важко виділити частоту, пов'язану з несправністю обмотки. Потрібне складне математичне опрацювання частотного спектра із застосуванням методів регресійного та кореляційного методів аналізу, тому цей метод поки що не набув широкого поширення.



Рисунок 1.4 - Спектр індукованих ЕРС, наведеної в обмотці трансформатора ТЦ-630000/500 під час імпульсного механічного впливу на обмотку трансформатора за різних ступенів пресування обмотки

1.1.6 Метод низьковольтних імпульсів

Метод низьковольтних імпульсів (метод HBI) здобув визнання на початку 70-х років минулого століття. Було розроблено установки, якими оснащували установки для випробування трансформаторів на стійкість до струмів КЗ. Удосконалення установок дало змогу впровадити їх в експлуатацію в низці електричних мереж і на великих трансформаторних заводах.

Суть методу НВІ полягає в застосуванні до однієї з обмоток трансформатора зондувального імпульсу, який формує імпульсний генератор. Амплітуда імпульсу 100-500 В, що безпечно для ізоляції будь-якої обмотки силового трансформатора. Сигнал-відгук з іншої обмотки осцилографується, так як показано на рисунку 1.5. Для судження про наявність змін геометрії обмотки потрібне зняття нормограми зі свідомо справного трансформатора, наприклад, на заводівиробнику трансформатора або перед уведенням трансформатора в експлуатувальну організацію. Після закінчення деякого терміну роботи трансформатора проводиться повторне зняття осцилограм із дотриманням схеми діагностики під час зняття нормограм. Порівняння нормограми з дефектограмою дає змогу судити про зміну, що відбулася в геометрії обмотки за минулий період. За відсутності нормограм, дефектографування можна провести шляхом порівняння осцилограм- відгуків з різних обмоток трифазного трансформатора [2,8].



Рисунок 1.5 - Схема вимірювань за методом HBI: 1 - генератор імпульсів; 2 - осцилограф; R – резистор

Результати діагностики трансформаторів методом НВІ показують високу ефективність виявлення змін геометрії обмоток, його високу чутливість навіть до незначних змін відхилення геометрії від штатної. Це пояснюється суттєвою зміною міжвиткових або між котушкових ємностей обмотки під час переміщення витків один відносно одного. Випучування витків призводять до змін індуктивності цих витків у сукупності зі змінами ємностей відносно сусідніх витків і відносно витків зі зміненою геометрією. Усі ці локальні зміни ємностей та індуктивностей змінюють частоти коливань пов'язаних із ними елементів обмоток. Ці частотні зміни проявляються на осцилограмах-відгуках у вигляді змін їхньої форми порівняно з нормограмами. На рисунку 1.6 наведено схему імпульсного дефектографування трансформатора, а на рисунку 1.7 - схему заміщення однієї з його обмоток.



Рисунок 1.6 - Схема імпульсного дефектографування трансформатора



Рисунок 1.7 - Спрощена схема заміщення обмотки трансформатора

Не дивлячись на високу (порівняно з іншими методами) чутливість методу НВІ та його тривале вдосконалення (у період 19661988 р.р.), його похибка залишалася в низці випадків незадовільною для практичного застосування. Це пояснювалося неточністю і суб'єктивізмом при аналізі результатів дефектографування. На рисунку 1.9 наведено осцилограми дефектографування, з яких видно, що ідентифікація виду ушкодження має суб'єктивний характер і потребує фахівців високої кваліфікації [1, 2, 10].



Рисунок 1.9 - Типовий вигляд осцилограм під час діагностики трансформаторів різної потужності методом HBI: а) - трансформатор без ушкоджень; б) - пресування обмоток порушене; в) порушене пресування обмоток, переміщення обмоток відносно одна одної; г) Зміщення обмотки в осьовому напрямку; д), е) внутрішня обмотка змістилася в радіальному напрямку; ж), з) замикання витків.

Дослідження, щодо порівняння чутливостей діагностики механічних пошкоджень обмоток методом НВІ та вимірюванням Z<sub>K3</sub> показали меншу чутливість останнього, що відображено в [2]. Ілюстрацію результатів одного з проведених досліджень наведено на рисунку 1.9.



Рисунок 1.9 - Результати імпульсного дефектографування трансформатора ТМ-630/35 до та після випробування на динамічну стійкість: приклад відсутності змін; а) - накладені осцилограми нормограма та дефектограма; б) результат віднімання напруги дефектограми від напруги нормограми; в) спектр частот за швидким перетворенням Фур'є нормограми та дефектограми; г) результат визначення кореляції між спектрами частот нормограми та дефектограми; *K*<sub>r</sub> - коефіцієнт парної кореляції частот нормограми та дефектограми.

Переваги методу HBI: дуже висока чутливість до великої кількості пошкоджень; можливість визначати початок зміни геометрії обмоток у конкретній фазі.

Висока чутливість методу НВІ до зміни геометрії обмоток порівняно з іншими відомими методами, використовуваними для цієї самої мети, можна сказати, є і недоліком цього методу, тому що вимагає від випробувача, який проводить діагностику, високої кваліфікації під час формування схеми вимірювань. Можуть минути роки між зняттям нормограми і дефектограми, але під час зняття дефектограми необхідно обов'язково повторити схему вимірювань під час зняття нормограми: точки під'єднання генератора і точки реєстрації, довжини кабелів, розгортки, точки під'єднання заземлень. До іншого зарахувати недоліку методу HBI можна необхідність розшиновки трансформатора, це не дає змоги вести моніторинг стану обмоток у процесі експлуатації, хоча бажано після кожного наскрізного через трансформатор струму КЗ знати, чи відбулися зміни геометрії обмоток під час динамічного впливу струмів короткого замикання, чи ні [10].

Відомо з практики, що протікання через трансформатор наскрізних струмів КЗ може призвести до деформації обмоток. Це закладає локальний дефект, який, розвиваючись, призводить до відстрочених на невизначений час міжвиткових замикань і непрогнозованого виведення в ремонт трансформатора. Своєчасне виявлення деформацій дає можливість вивести трансформатор у ремонт із заміною пошкоджених вузлів і максимально використовувати неушкоджені [10].

#### 1.2. Висновок до розділу

Виконаний аналіз дає змогу зробити висновок про відсутність надійного, достовірного та ефективного методу контролю стану обмоток трансформаторів, незважаючи на різноманіття наявних методів. Для створення нової технології контролю механічного стану обмоток зусилля розробників мають бути зосереджені на підвищенні чутливості, точності та надійності методу виявлення дефектів обмотки на ранніх стадіях розвитку.

### 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

## 2.1 Розроблення та створення фізичної моделі силового трансформатора

Одним із методів дослідження фізичних об'єктів є моделювання, яке широко використовується в різних галузях сучасної науки і техніки. Моделі можуть бути реалізовані у вигляді фізичних моделей або сформульовані математично. Відомо, що під час фізичного моделювання здійснюється відтворення у фізичній моделі тих самих принципів роботи, що реалізуються в натуральному об'єкті, лише змінених за своїми абсолютними значеннями відповідно до масштабу моделювання. Однією з головних переваг фізичного моделювання £ можливість здійснювати прямі спостереження за модельованими процесами і явищами. У зв'язку з цим для розроблення та дослідження нового методу контролю стану обмоток трансформаторів, було розроблено та створено фізичну модель високовольтного силового трифазного Зовнішній двообмоткового трансформатора. трифазного вигляд моделі наведено на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 Зовнішній вигляд фізичної моделі силового трансформатора Обмотка низької напруги (НН) виконана мідною шиною 2x8 мм, намотаної на циліндр із вініпласту і містить 20 витків. Геометричні розміри обмотки -

зовнішній діаметр 102 мм, внутрішній діаметр 86 мм, довжина 370 мм. Обмотка НН є внутрішньою. Обмотка високої напруги (ВН) виконана з мідного дроту діаметром 2 мм, намотаного на циліндр з полівінілхлориду з кроком 4 мм, і містить 120 витків. Геометричні розміри обмотки - зовнішній діаметр 160 мм, внутрішній діаметр 140 мм, довжина 37 см. Обмотка ВН є зовнішньою щодо обмотки НН.

Кожна котушка містить відпайки та виводи для моделювання різних дефектів і підключення вимірювальних приладів. Трифазна двообмоточна структура монтується на металеві стрижні, які моделюють сердечник трансформатора. Під час проведення експериментів до фізичної моделі під'єднується спеціально розроблений генератор зондувальних імпульсів і вимірювальні пристрої - електронні осцилографи.

Генератор зондувальних імпульсів давав змогу формувати імпульси тривалістю близько 450 нс із фронтом 15...20 нс регульованої амплітуди від 50 до 500 В.

## 2.2 Розробка принципової схеми та макетного зразка генератора зондувальних імпульсів

Генератор зондувальних імпульсів (далі генератор) є основним технічним вузлом діагностичного комплексу. Він має відповідати таким вимогам: формування імпульсів амплітудою понад 200 В з фронтом не більше 20...25 нс, тривалістю близько 500 нс; це дасть змогу отримати ширший спектр генерованих частот, ніж за допомогою генераторів, які застосовувалися дотепер, що підвищить чутливість діагностики до дрібних дефектів, як-от зсув витків, незначне випинання витків, розпресування обмотки та ін.; відсутність відбитої хвилі від внутрішніх елементів генератора, що повинно підвищити точність одержуваної інформації, істотно спростити діагностичну процедуру такої складної структури, як силовий трансформатор з різними обмотками, суміщеними з сердечником з електротехнічної сталі.

Основні технічні вимоги, що висуваються до генератора:

Амплітуда зондувального імпульсу, до 300 В

Тривалість імпульсу, 50...500 нс

Тривалість фронту імпульсу, 10...15 нс

Період повторення імпульсів, 20...30 с

Застосуванняи в умовах помірного клімату в діапазоні температур від мінус 40°С до плюс 45°С

Із серійно випущених промисловістю генератори деякі типи відповідають вимогам тільки за кількома параметрами. Однак нам не вдалося знайти серед них генератора, що повністю відповідає сформульованим вище вимогам.

Запропоновано схему генератора, що дає змогу на будь-якому навантаженні формувати одноразові імпульси. Схема генератора наведена на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 - Електрична схема генератора: U - зарядна напруга, R1 - зарядний опір, R2 - опір для узгодження радіочастотного кабелю PK1, R3 - навантаження, К - ключ, PK1 - коаксіальний радіочастотний кабель, що формує, завдовжки 1, PK2 - з'єднувальний коаксіальний радіочастотний кабель, який розміщують усередині генератора, PK3 - передавальний коаксіальний радіочастотний кабель, що з'єднує генератор із навантаженням завдовжки 5...7 м.

Робота генератора: постійна напруга заряджає формуючий коаксіальний радіочастотний кабель РК через опір R<sub>1</sub>. Особливістю схеми є те, що потенційною є обплетення кабелю. При досягненні зарядною напругою встановленого значення спрацьовує ключ К, який може бути некерованим, який спрацьовує при фіксованому значенні напруги для даного ключа, або керованим, що спрацьовує за різних напруг під час подання на нього пускового імпульсу від окремого генератора. Після увімкнення ключа К в обидва боки від нього починають поширюватися хвилі. Від опору R2 поширюється хвиля, що дорівнює половині U, яка, дійшовши до R<sub>3</sub>, відбивається з амплітудою, яка визначається опором навантаження генератора, і повертається назад до R<sub>2</sub>, поглинаючись у ньому. Інша хвиля поширюється від "Виходу" генератора і, дійшовши до R<sub>2</sub>, поглинається в ньому без відбиття. Таким чином, на "Виході" генератора формується імпульс із полярністю, зворотною до полярності зарядної напруги U, і тривалістю, що дорівнює часу пробігу хвилі кабелем РК. Його амплітуда залежить від співвідношення хвильового опору кабелю РК і опору навантаження. Типові форми імпульсів, одержуваних від генератора на різних навантаженнях, наведено на рисунку 2.3. Імпульси отримано під час моделювання перехідних процесів у середовищі МісгоСАР.

З рисунків видно, що при всіх видах навантаження тривалість і форма імпульсу на навантаженні однакова - імпульс поодинокий без відображень. У цьому полягає перевага такої схеми генератора перед іншими для діагностики складних електричних схем. Змінюється тільки амплітуда імпульсу залежно від співвідношення навантаження і внутрішнього опору генератора.

Для зміни тривалості імпульсу на виході генератора достатньо змінювати довжину зарядного кабелю РК<sub>1</sub> (рисунок 2.2).

Найважливішим елементом генератора є комутатор К, параметри якого суттєво впливають на фронт вихідного імпульсу. Під час розроблення комутатора К випробувано: ртутне реле, механічний повзунковий перемикач, кнопковий перемикач, геркон газовий типу і геркон вакуумний типу, розрядники низької напруги.



Рисунок 2.3 - Форми імпульсів за різних навантажень генератора: а) R=75 Ом (узгоджений режим), б) R=25 Ом, в) R=125 Ом, г) R=250 Ом, д) L=1 мГн, е) L=10 мГн, ж) C=100 пФ, з) C=10 пФ, і) паралельне з'єднання C=10 пФ, L=1 мГн, к) паралельне з'єднання C=100 пФ, L=1 мГн.

Імпульси, що формуються генератором імпульсів напруги (ГІН) з випробуваними комутаторами, відрізняються формою фронту і формою вершини, як наведено на рисунку 2.4, на якому напругу наведено у відносних одиницях, а час t - у наносекундах.



Рисунок 2.4 - Імпульси напруги на виході ГІН за різних комутаторів: а) ртутне реле; б) механічний повзунковий перемикач; в) кнопковий перемикач; г) геркон газовий; д) геркон вакуумний; е) газовий розрядник

З осцилограм видно, що відмінність фронту та вершини імпульсу залежить від комутатора. Щоб отримати об'єктивну чисельну оцінку параметрів імпульсів під час використання різних комутаторів, було використано метод швидкого дискретного Фур'є-аналізу, за допомогою якого можна отримувати спектральний склад імпульсу (див. рисунок 2.5) швидко і з достатньою для практики точністю.

Процедуру розкладання імпульсу на гармоніки виконували в програмі MathCAD.

У результаті розкладання імпульсів у ряд Фур'є було отримано спектр частот (АЧХ) і фазочастотну (ФЧХ) характеристики. Щоб результати перетворення Фур'є були порівнянними, було зроблено спроби вихідні імпульси привести до одного вигляду: тривалість імпульсів на напіввисоті дорівнювала 675 нс (у всіх випадках кабель генератора, був один і той самий), тривалість паузи між імпульсами становила 675 нс, амплітуду імпульсів нормували, її приймали такою, що дорівнювала умовній одиниці.

Кількість гармонік, які отримуємо під час розкладання в ряд Фур'є, впливає на точність відтворення вихідного імпульсу. Кількість гармонік ми визначили шляхом підбору: спочатку розклали імпульс на 150 гармонік, потім, використовуючи зворотне перетворення Фур'є, відтворювали вихідний імпульс, використовуючи різну кількість гармонік, як показано на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 - Зіставлення вихідного і відтвореного імпульсів за різної кількості гармонік під час роботи з комутатором типу газовий розрядник NENSHI-230-07: а) N=5; б) N=10; в) N=30; г) N=50 (N - кількість гармонік, використаних під час зворотного перетворення Фур'є)

Із зображень відтворених осцилограм, наведених на рисунку 2.5, було ухвалено рішення, що достатня кількість гармонік має бути не менше 30, як показано на рисунку 2.5, в.

Прийнятність прийнятої методики наочно показано під час зіставлення АЧХ, як показано на рисунку 2.6, і ФЧХ, як показано на рисунку 2.7, різних типів комутаторів.



Рисунок 2.6 - АЧХ комутатора типу геркон вакуумний



Рисунок 2.7 - ФЧХ комутатора типу геркон вакуумний

АЧХ для різних типів комутаторів можна визначити, як гармонійні складові Х<sub>і</sub> подвоєного модуля дискретної функції Фур'є (F) [7, 8]:

$$X_{j} = \left| F_{j} \right| \cdot 2 \tag{2.1}$$

де j=0...50 - порядковий номер гармоніки, X0/2 - амплітуда постійної складової.

АЧХ, отримані для різних комутаторів візуально мало відрізняються одна від одної, тому знадобилася додатково розробити метод, що дає змогу знаходити області, в яких АЧХ значуще відрізняються одна від одної для різних типів комутаторів. Нами запропоновано порівнювати АЧХ для двох комутаторів у відносних одиницях, прийнявши за базу АЧХ одного з комутаторів. Відносне відхилення спектрів амплітуд імпульсів  $\Delta X_j$  у відносних одиницях (в. о.):

$$\Delta X_{j} = \frac{X_{j}}{X_{1j}} \tag{2.2}$$

де X<sub>j</sub> і X<sub>1j</sub> - спектри амплітуд комутаторів двох типів, відповідно.

ФЧХ для різних типів комутаторів була знайдена з використанням функції аргументу дискретної функції Фур'є (F) [7, 8]:

$$\phi_j = \frac{\arg\left(F_j\right)}{\deg} \tag{2.3}$$

де deg - функція, що дає змогу отримувати ФЧХ у градусах.

ФЧХ, отримані для різних типів комутаторів візуально відрізняються одна від одної, тому ми порівнювали ФЧХ комутаторів у відносних одиницях, що дало змогу виділити частоти, на яких спостерігаються викиди гармонійних складових за амплітудою.

Для отримання повторюваних результатів під час імпульсної діагностики необхідно, щоб зондувальні імпульси від генератора мали трапецеїдальну форму, не мали викидів на фронті та мали б плоску вершину. Таким умовам відповідають імпульси, у яких найбільша наповнюваність високочастотними гармоніками порівняно з основною частотою.

Для прикладу наведемо порівняння двох комутаторів із розглянутих. Під час візуального порівняння АЧХ і ФЧХ комутатора типу ртутне реле і газовий розрядник між ними не помітно принципової відмінності. Порівняння АЧХ і ФЧХ цих комутаторів у відносних одиницях, як наведено на рисунку 2.8, показує, що ці комутатори мають різну наповнюваність гармонійними складовими. Наповнюваність високочастотними гармоніками, згідно з АЧХ у відносних одиницях, у вакуумного реле вища, ніж у газового розрядника. Тому рейтинг застосовності ртутного реле виявляється вищим, ніж у газового розрядника.

Було виконано порівняння всіх випробуваних комутаторів за обраним критерієм відбору. З'ясувалося, що найбільшу наповнюваність гармоніками високої частоти має імпульс, який формувався комутатором типу вакуумний геркон. Результати порівняння всіх випробуваних комутаторів наведено в таблиці 2.1.



Рисунок 2.8 - Результати порівняння комутаторів типу ртутне реле і газовий розрядник: а) відносне відхилення фаз ФЧХ; б) відносне відхилення амплітуд АЧХ;

	Умовне місце комутатора за			
Тип комутатора	наповнюваністю високочастотними			
	гармоніками порівняно з з розрядником			
Геркон вакуумний	1			
Геркон газовий	2			
Ртутне реле	3			
Механічний повзунковий перемикач	4			
Кнопковий перемикач типу	5			
Розрядник	6			

Таблиця. 2.1 - Порівняння випробуваних комутаторів

Таким чином, розроблено методику порівняння комутаторів за якістю комутації на основі аналізу параметрів вихідного імпульсу генератора для зондування обмоток трансформаторів. Очевидно, запропонований метод ранжування комутаторів прийнятний для інших типів генераторів у разі, якщо від генераторів вимагається формування імпульсів зі стабільними вихідними параметрами.

Під час експериментів з різними комутаторами було помічено, що найкраща повторюваність формованих імпульсів за формою була також у комутатора типу геркон вакуумний. Інші комутатори з різною періодичністю формували імпульси з різним фронтом і плоскою частиною вершини імпульсу. Це можна пояснити нестабільністю процесів у комутувальному середовищі та явищами ерозії на поверхні електродів цих комутаторів. Вакуумне середовище і відповідний контактів геркона вакуумного склад дає істотно кращу повторюваність комутаційної характеристики за досліджених умов комутації: напруга і струм.

Для подальшої роботи зі створення генератора зондувальних імпульсів було обрано як основний комутатор на основі геркона вакуумного. Дублюючим був геркон газовий. У зв'язку з цим було розроблено спеціальну конструкцію плати комутації, на якій був роз'єм типу BNC. До цього роз'єму в спеціальному корпусі можна оперативно під'єднувати будь-який із названих комутаторів:

геркон вакуумний або геркон газовий. Для оперативної роботи паралельно основному комутатору К під'єднано механічний повзунковий перемикач з виведенням кнопки керування ним на передню панель розроблюваного імпульсного генератора.

Для керування спрацьовуванням герконів передбачено окреме джерело живлення від низьковольтного трансформатора. Увімкнення геркона здійснюється кнопкою, розміщеною на передній панелі генератора.



Загальну схему генератора наведено на рисунку 2.9.

Рисунок 2.9 - Електрична схема генератора

Живлення генератора здійснюється від мережі 220 В, увімкненням у розетку шнура, який приєднано до генератора за допомогою стандартного роз'єму з кнопкою увімкнення SB1. У разі ввімкнення SB1 і наявності в мережі ~220 В напруги - загоряється сигнальна лампа "Індикатор мережевої напруги". Для захисту від коротких замикань усередині генератора передбачено запобіжник F1 на струм спрацьовування 0,5 А. За справного запобіжника F1 горить "Індикатор стану запобіжника" LED1.

Напруга від мережі ~220 В подається на первинні обмотки трансформаторів Т1 і Т2. Трансформатор Т1 служить для отримання напруги

для заряду формувальних коаксіальних кабелів РК1. Трансформатор Т2 заряджає конденсатор С2 до напруги U=24 В через діод VD1 і захисний резистор R3. Під час натискання на кнопку запуску геркона SB2 заряд, накопичений у конденсаторі C2, протікає через котушку геркона L, що спричиняє замикання контактів геркона K1 під впливом магнітного поля котушки геркона L.

Напруга для заряду коаксіального формувального кабелю регулюється ступінчасто за допомогою галетного перемикача S2. За рахунок різних комбінацій з'єднання вторинних обмоток трансформатора T2 на випрямний міст VD4-7 можна поступово подати різні значення змінної напруги: 40, 130, 180, 210, 230, 400 В.

Для заряду коаксіального формувального кабелю застосовано звичайну двопівперіодну схему заряду VD4-7. Випрямлена напруга через резистор R1 заряджає конденсатор C1 до відповідної напруги приблизно за 10 с. Вимірювання зарядної напруги проводилося електронним вольтметром типу, встановленим на передній панелі генератора. Живлення вольтметра здійснюється від окремого автономного джерела - батарея живлення вольтметра AA на 9 В.

Резистори R2, R8, R7 підібрані таким чином, щоб показання вольтметра відповідали зарядній напрузі у вольтах. Резистор R5 затримує підзарядку формувального коаксіального кабелю РК1 під час формування генератором зондувального імпульсу.

Формування зондувального імпульсу відбувається після заряду коаксіального формувального кабелю до відповідної напруги, контрольованої за вольтметром V, і натискання кнопки запуску геркона SB2 або кнопка "Ручний запуск" SB3.

Усі елементи генератора розміщуються в металевому корпусі, усередині якого розташована друкована плата з розпаяними елементами. На шасі закріплено відрізки формувальних радіочастотних кабелів РК1.

У разі діагностики механічного стану обмоток трансформатора методом подачі зондувального імпульсу на обмотку і реєстрації відгуку з однієї з обмоток трансформатора виникає питання: яким чином порівнювати результати відгуків за одного і того ж виду зондувального імпульсу? Ми запропонували і використовували інтегральний метод порівняння площ імпульсів відгуку один з одним. Суть методу полягає в тому, що знаходиться інтеграл різниці відгуків, отриманих у різні періоди діагностики трансформатора. У разі значної відмінності (у нашому випадку це більше 5...6 %) від інтеграла базового відгуку (нормограми) і подальшої діагностики (дефектограми) можна робити об'єктивний висновок про механічний стан діагностованої пари обмоток трансформатора.

Оброблення отриманого експериментального матеріалу під час діагностики трансформатора здійснювали спеціально розробленою програмою.

## 2.3 Розробка і створення математичної моделі силового трансформатора

Математичне моделювання на відміну від фізичного передбачає заміну фізичних елементів моделі на математичні аналоги або еквіваленти. Виходячи з цього, методи математичного моделювання зазвичай відносять до теоретичних методів дослідження. Математичне моделювання в електротехніці набуло широкого застосування і в низці випадків є чи не єдиним способом дослідження складних електротехнічних конструкцій, до яких, безумовно, належить сучасний силовий високовольтний трансформатор.

Математична силового трансформатора необхідна модель ДЛЯ моделювання діагностичної процедури та дослідження відповідності закономірностей сигналів відгуку і механічного стану витків обмоток трансформатора під час подання на одну з обмоток зондувального імпульсу. Для створення ефективного діагностичного комплексу необхідно дослідити особливості перехідного процесу і форму сигналу відгуку залежно від параметрів зондувального імпульсу і ступеня "дефектності" обмотки. Своєю чергою, рівень дефектності охоплює кількість дефектів обмотки, їхній різновид,

ступінь розвитку, місце розташування вздовж обмотки. Різноманіття комбінацій дефектів різного виду і ступеня їхнього розвитку призводять до широкого спектра сигналів відгуку. Дослідження на фізичній моделі необхідних основних комбінацій діагностичної процедури - досить трудомістке і складне завдання. Оптимізувати діагностичну процедуру і структуру діагностичного комплексу можна застосуванням математичної моделі процесу діагностики обмоток трансформатора.

Першим і найважливішим кроком при побудові математичної моделі силового трансформатора є вибір його схеми заміщення. Застосування для ліагностики імпульсів наносекундних тривалостей ставить завлання представлення обмоток трансформатора у вигляді схеми з розподіленими параметрами, що мають між собою ємнісний і електромагнітний зв'язок. В основу описуваної математичної моделі було покладено фізичну модель силового трифазного двообмоткового трансформатора напруги стрижневого типу. Під час побудови математичної моделі використовували геометричні параметри обмоток (довжину і діаметр котушок, геометричні розміри дроту), що точно відповідають тотожним параметрам фізичної моделі. Такий підхід дозволив підвищити ступінь відповідності результатів моделювання на математичній моделі експериментальним даним, отриманим на фізичній моделі.

Наведемо етапи формування моделі трифазного двообмоткового трансформатора. (Детальний опис усіх параметрів котушок (геометричні розміри як котушок, так і дроту для намотування, тип дроту і матеріалу котушок) наведено в розділі 2.1). На рисунку 2.10 наведено зовнішній вигляд як внутрішньої (низьковольтної), так і зовнішньої (високовольтної) обмоток трансформатора та геометричні розміри (поперечні перерізи) проводів обмоток.

Один виток обмотки замінюється електротехнічною ланкою, що складається з елементів, наведених на рисунку 2.11.

Усі наведені величини є погонними, тобто значення величин віднесені до одиниці довжини. Таким чином, обмотку трансформатора можна замінити послідовно з'єднаними ланками, як показано на рисунку 2.12.


Рисунок 2.10 - Зовнішній вигляд обмоток силового трансформатора



Рисунок 2.11 - Електротехнічна схема заміщення одного витка обмотки:  $C_1(\omega)$  - міжвиткова ємність,  $C_2(\omega)$  - ємність між витком і заземленими частинами трансформатора, L - індуктивність витка обмотки з урахуванням взаємної індуктивності між сусідніми елементами обмотки, R - активний опір дроту витка.



Рисунок 2.12 - Схема заміщення обмотки трансформатора

Спектральний склад зондувального імпульсу впливає на параметри елементів схеми заміщення обмотки трансформатора. За певних тривалостей зондувального імпульсу починає проявлятися скін-ефект, тобто в міру зростання частоти струму в поперечному перерізі провідника, зменшується частка струму, що тече у внутрішній ділянці, і, відповідно, збільшується частка струму, що протікає в поверхневому шарі провідника.

Цей процес багаторазово підсилює залежність індуктивності та опору провідника зі струмом від частоти.

Для визначення величин елементів, що входять до схеми заміщення, необхідно визначити частотний спектр, частотний діапазон зондувального імпульсу і розрахувати індуктивності та опори витків обмотки трансформатора як круглого, так і прямокутного перерізу. Для цього, перш за все, необхідно виконати частотне розкладання зондувального імпульсу.

На рисунку 2.13 наведено форму зондувального імпульсу, який було взято за основу під час розрахунків.



Рисунок 2.13 - Зондувальний імпульс

Виток обмотки замінюється ланкою, що складається з елементів, наведених на рисунку 2.11.

Для визначення частотного спектра імпульсу розкладемо зондувальний імпульс у ряд Фур'є, визначивши коефіцієнти розкладання k, k=0, 1,...N. Для їх визначення використовувалася стандартна програма швидкого перетворення Фур'є (FFT) програмно- інтегрованого середовища MathCAD. Далі функція подається у виглядіряду:

$$U(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N} |A_k| \sin\left(\omega kt + \arg(A_k) + \frac{\pi}{2}\right)$$
  

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2.53 \cdot 10^6 \ pa\partial / c$$
  

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \cos(\omega kt) dt$$
  

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \sin(\omega kt) dt$$
  

$$A_k = a_k + jb_k$$
  
(2.4)

Спектр і результат відновлення форми зондувального імпульсу за коефіцієнтами подано нижче. Кількість коефіцієнтів розкладання (N) узято такою, що дорівнює 50 (за цієї кількості N відновлена форма імпульсу збігається з вихідною за формою й амплітудою). Спектральний склад імпульсу і результат відновлення його форми показано на рисунках 2.14 і 2.15.

Зі спектра імпульсу видно, що починаючи з 10 гармоніки, відносний внесок вищих гармонік в імпульсі не перевищує 5 %. Відновлений і вихідний імпульси збігаються з прийнятним для практики ступенем точності (див. рисунок 2.15, де пунктирною лінією 2 зображено вихідний імпульс, а суцільною 1 - відновлений).



б)

Рисунок 2.14 Спектральний склад імпульсу: a) - амплітудно- частотний спектр, б) - фазо-частотний спектр



Рисунок 2.15 Форма зондувального імпульсу, відновленого за спектральним складом (взято 30 гармонік); 1 - відновлений імпульс, 2 - вихідний імпульс

Наступним етапом моделювання є розрахунок індуктивності та опору витків круглого та прямокутного поперечного перерізу з урахуванням скінефекту.

Проведемо розрахунок густини розподілу струму в поперечному перерізі провідника. Система рівнянь Максвелла дає змогу отримати рівняння для векторного потенціалу  $A_{\phi}$ , що дає можливість визначити густину розподілу струму по перерізу провідника

$$(j\omega\sigma - \omega^{2}\varepsilon)A_{\phi} + \nabla \cdot (\mu^{-1}\nabla \cdot A_{\phi}) = \frac{\sigma V}{2\pi r}$$
(2.5)

де:  $A_{\phi}$  - векторний магнітний потенціал, V - напруга, ε - діелектрична проникність, ω - частота, μ - магнітна проникність, σ - провідність, ј - уявна одиниця.

Щільність струму і струм визначаються виразами:

$$J_{\phi} = \nabla \cdot (\mu^{-1} \nabla \cdot A_{\phi}) = \frac{\sigma V}{2\pi r}$$

$$I = \pi \int_{0}^{R} J_{\phi} r^{2} dr$$
(2.6)

Магнітна енергія визначається виразом:

$$W = 2\pi \int A_{\phi} r dr \tag{2.7}$$

з якого за відомого струму визначається індуктивність за допомогою співвідношення:

$$L = \frac{2W}{\left|I\right|^2} \tag{2.8}$$

За відомої напруги та струму визначаємо опір провідника, використовуючи формулу:

$$R = \operatorname{Re}\left(\frac{V}{I}\right) \tag{2.9}$$

Для розрахунку за представленими рівняннями використовували математичний пакет, заснований на методі скінченних елементів (Finite Element Method -FEM) - COMSOL Multihpysics. Результати розрахунків наведено на рисунку 2.16, 2.17.



Рисунок 2.16 - Частотні залежності індуктивності *L*(*f*) та опору *R*(*f*) дроти з круглим поперечним перерізом



Рисунок 2.17 - Частотні залежності індуктивності L(f) та опору R(f) дроти з прямокутним поперечним перерізом

За відомих залежностей індуктивності та опору від частоти можна визначити перехідні процеси, що відбуваються в обмотках трансформатора. Оскільки вхідний імпульс представлений у вигляді суми гармонік, розрахунок проводили з використанням методу накладення, тобто розраховували напруги і струми для кожної гармоніки. Потім результати розрахунків струмів і напруг кожної гармоніки складали й одержували результуючі струми та напруги під час впливу зондувального імпульсу. Наведені значення елементів ланки обмотки в схемі заміщення (рисунок 2.12) використовували для знаходження напруг на елементах обмотки під час застосування зондувального імпульсу. Результати моделювання дали задовільний збіг з експериментальними даними. Схему експерименту наведено на рисунку 2.18.



Рисунок 2.18 - Схема експерименту з визначення імпульсів-відгуків (осцилограф №2) під час зондування наносекундними імпульсами від генератора імпульсів (осцилографом №1 реєструвалася форма зондувального імпульсу на обмотці)

Як приклад задовільного збігу запропонованого методу моделювання та експериментальних результатів на рисунку 2.19 зіставлено результати моделювання та експерименту.



Рисунок 2.19 - Порівняльний результат розрахунку й експерименту; а) фізичний експеримент, б) моделювання імпульсу з генератора (крива 0) і його відгуку (крива 1) у схемі без дефектів

Як випливає з осцилограм рисунка 2.19, осцилограми відгуку, отримані на фізичній моделі та на розрахунковій моделі, задовільно збігаються. Це свідчить про адекватність моделей і дає змогу розрахунковим шляхом прогнозувати вид осцилограм-відгуків у разі різних підключень зондувального генератора та місця отримання відгуку в разі різних дефектів обмотки. Таким чином, провівши фізичний експеримент і розрахункове моделювання, можна оцінити місце і вид пошкодження обмотки трансформатора за зіставленням осцилограми експерименту і розрахунку.

#### 2.4 Висновки до розділу

Удосконалена імітаційна математична модель обмоток трансформатора дає змогу моделювати перехідні процеси в обмотках із врахуванням ємностей між витками обмотки, між витками і корпусом трансформатора, між витками обмотки і витками обмоток сусідніх фаз, що, своєю чергою, дає змогу розрахунковим шляхом виявляти характер зародження в обмотці дефектів. Для цього необхідно експериментальну дефектограму порівнювати з розрахунковою.

43

Виготовлено діагностичний комплекс для контролю стану обмоток трансформаторів, реалізований на основі генератора зондувальних імпульсів, що дає змогу формувати імпульс тривалістю в діапазоні 60 - 500 нс із фронтом 25 нс на навантаженні з довільним імпедансом.

Удосконалено методику порівняння комутаторів за якістю комутації на основі аналізу параметрів вихідного імпульсу генератора для зондування обмоток трансформаторів.

Під час експериментів з різними комутаторами було помічено, що найкраща повторюваність формованих імпульсів за формою була також у комутатора типу геркон вакуумний. Інші комутатори з різною періодичністю формували імпульси з різним фронтом і плоскою частиною вершини імпульсу.

Осцилограми відгуку, отримані на фізичній та розрахунковій моделях, показують задовільний збіг. Це свідчить про адекватність моделей і дає змогу розрахунковим шляхом прогнозувати вид осцилограм-відгуків у разі різних підключень зондувального генератора та місця отримання відгуку в разі різних дефектів обмотки. Таким чином, провівши фізичний експеримент і розрахункове моделювання, можна оцінити місце і вид пошкодження обмотки трансформатора за зіставленням осцилограми експерименту і розрахунку

### З НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

# 3.1. Дослідження на фізичній моделі силового трансформатора. Виявлення міжвиткових коротких замикань

Фізична модель трифазного двообмоткового силового трансформатора призначена для проведення експериментів, метою яких є вдосконалення діагностичної процедури. Нижче наводиться опис експериментів з оптимізації та вдосконалення діагностичної процедури, схеми та результати вимірювань сигналів відгуку за різних комбінацій "місце подачі зондувального імпульсу місце реєстрації сигналу відгуку", експериментальне дослідження чутливості діагностичної процедури від форми, тривалості імпульсу та крутизни його фронту, а також низки інших експериментів. Міжвиткові КЗ становлять значну частку дефектів, подальший розвиток яких приводить трансформатор в аварійний стан. Нижче наводяться результати експериментів, під час яких в обмотці НН створювалося КЗ двох сусідніх витків. Перший етап експериментів було виконано на однофазній фізичній моделі, схему якої наведено на рисунку 3.1. Зондувальний імпульс амплітудою 200 В і тривалістю 400 нс, осцилограму якого наведено на рисунку 3.2, подавали на обмотку ВН, сигнал знімали з обмотки НН. Осцилограми-відгуки за відсутності вілгуку міжвиткового замикання двох сусідніх витків a1 і a2 (рисунок 3.1) наведено на рисунку 3.3, а). Осцилограми-відгуки під час міжвиткового замикання двох сусідніх витків a1 і a2 (рисунок 3.1) наведено на рисунку 3.3, б).



Рисунок 3.1 - Схема однофазної моделі трансформатора: ГЗІ - генератор зондувальних імпульсів; Трансформатор - фізична модель трансформатора, створена на основі магнітного пускача типу ПМА- 6100; А0, А1 - виводи з котушки ПМА-6100, a0, a1,...a12 - виводи з додаткової котушки; Осцилограф 1 і Осцилограф 2.



Осцилограма Рисунок 3.2 зондувального імпульсу Суміщені \_ i a2 осцилограми відсутності міжвиткового замикання витків a1 за (нормограма) і при замиканні цих витків (дефектограма) наведені на рисунку 2.16, в).



Рисунок 3.3 - Осцилограми-відгуки: а) вігук за відсутності дефекту, б) відгук у разі замикання двох сусідніх витків a1 та a2 (див. рисунок 3.1), в) суміщені відгуки за відсутності дефекту та в разі замикання двох сусідніх витків a1 та a2

З наведених осцилограм чітко видно, що сигнали-відгуки, отримані за наявності та відсутності дефектного стану, демонструють можливість досліджуваного методу виявляти міжвиткове КЗ двох сусідніх витків (a1-a2).

3.1.1 Проходження зондувального імпульсу низьковольтною обмоткою трансформатора

Електрична схема обмотки НН наведена на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 - Електрична схема котушки НН: В - потенційний вивід обмотки

На низьковольтну обмотку фізичного макета трансформатора від генератора подавався одиночний імпульс. Для вимірювань сигналів зондувального імпульсу і відгуку використовувався цифровий осцилограф. Зондувальний імпульс з амплітудою близько 200 В і тривалістю 400 нс прикладався до виводів обмотки НН (20 витків); водночас сигнал відгуку реєстрували на відпайках, які відповідають 5, 10, 15 і 20 виткам обмотки НН, рахуючи від нульового потенціалу обмотки N. Відповідні сигнали відгуку наведено на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 - Сигнал-відгук з обмотки НН: а) з 5 витка, б) з 10 витка, в) з 15 витка і г) з 20 витка

Ці осцилограми були отримані як нормограми, щоб під час подальшого моделювання різних дефектів в обмотці НН ці осцилограми слугували еталоном.

Наступну серію вимірювань виконано для випадку, коли в різних частинах обмотки НН моделювали наявність дефекту, а саме КЗ одного або декількох витків у різних частинах обмотки НН. На рисунку 3.6 як приклад наведено суміщені осцилограми з 10-го витка обмотки НН за відсутності КЗ (крива 1) і за КЗ трьох витків на початку обмотки (крива 2).



Рисунок 3.6 - Сигнал відгуку з 10 витка обмотки НН: 1 - немає замкнутих витків обмотки НН, 2 - КЗ трьох витків на початку обмотки

На наведених осцилограмах видно, що за наявності міжвиткового КЗ на початку обмотки (замкнені три перші витки на початку обмотки) зменшуються амплітуда першого піку та відбувається швидше загасання коливань кривої відгуку, порівнюючи з кривою з обмоткою без короткозамкнених витків. У разі витків збільшення кількості замкнутих обмотки сигнал-відгук зазнає подальших змін, які виражаються в тому, що перший пік амплітуди відгуку знижується ще істотніше, водночас кількість коливань і їхня амплітуда помітно зменшуються. Для підтвердження цього на рисунку 3.7 наведено суміщені осцилограми з 15-го витка обмотки НН. Крива 1 - у разі короткого замикання на початку обмотки (замкнені три перші витки на початку обмотки і два витки в середині обмотки - замкнені 10-12 витки). Крива 2 - за короткого замикання на початку обмотки плюс два витки в середині обмотки (10 і 12 витки) і 3 витки в кінці обмотки (витки 18, 19 і 20).



Рисунок 3.7 - Сигнал відгуку з 15 витка обмотки НН: 1 - замкнуті витки 1...3, 10...12; 2 - замкнуті витки 1...3, 10...12, 18...20

Необхідно зазначити, що подібна методика - подання зондувального імпульсу і зняття відгуку на одній і тій самій обмотці - не характерна для класичної діагностичної процедури. Однак важливим наслідком цієї експериментальної серії є факт послідовної зміни форми, параметрів і структури сигналів відгуку, що відповідає послідовному збільшенню ступеня дефектності обмотки.

3.1.2 Проходження зондувального імпульсу високовольтною обмоткою трансформатора

Обмотка ВН складалася зі 120 витків і містила 12 відпайок, що дають змогу організовувати різні комбінації міжвиткових КЗ. Обмотка НН розташовувалася всередині обмотки ВН і розміщувалася на стрижні фази В магнітопроводу. Зондувальний імпульс прикладався до обмотки ВН між крайніми верхнім і нижнім виводами. Нижній вивід заземлений і з'єднаний з нижнім ярмом. Для реєстрації сигналів використовували два осцилографи, за допомогою яких реєстрували два сигнали зондувального імпульсу - імпульс на виході генератора зондувальних імпульсів та імпульс на узгодженому навантаженні. Сигнали відгуку реєструвалися на чотирьох відпайках обмотки НН: на 5 витку, 10 витку, 15 витку і на всій обмотці НН (на 20 витку). Усі сигнали-відгуки з обмотки НН реєструвалися чотириканальним осцилографом. Перший (верхній) промінь відповідає відгуку, виміряному на 5 витку обмотки, четвертий (нижній) відповідає повній довжині обмотки. Другий і третій промені являють собою сигнали відгуку для 10 і 15 витків обмотки, відповідно. На рисунку 3.8 наведено зображення обмотки ВН з відпайками і змодельованим режимом КЗ у верхній частині обмотки. Осцилограму зондувального імпульсу наведено на рисунку 3.9.



Рисунок 3.8 - Обмотка ВН: режим КЗ змодельовано у верхній частині обмотки



Рисунок 3.9 - Осцилограма зондувального імпульсу

На рисунку 3.10 наведено осцилограми сигналів-відгуків під час замикання витків у різних місцях обмотки.



д)

Рисунок 3.10 - Осцилограми сигналів відгуку за різних місць замикання у високовольтній обмотці: а) обмотка без дефектів (немає замкнутих витків), б) замкнені перші 12 витків, в) замкнені 12...24 витки, г) замкнені 60...72 витки, д) замкнені 108...120 витки

З наведених осцилограм випливає, що наявність дефекту змінює вигляд сигналів-відгуків. Це виражається у зміні періоду коливань складових сигнал відгуку, зменшенні амплітуди піків і частоти їх проходження. Цю зміну можна спостерігати без використання спеціальних програм порівняння. Послідовний рух дефекту вздовж обмотки відбивається в характерній зміні форми та структури сигналів відгуку. Зменшення амплітуди піків і характерне їхнє "стиснення" є ознаками дефектного стану обмотки.

# **3.2** Експерименти з виявлення радіального й аксіального зміщення витків обмотки

Радіальне випучування витків обмотки є одним із різновидів механічних дефектів. Для моделювання діагностичної процедури з виявлення цього типу дефекту було виконано такий експеримент.

Радіальне випучування моделювали на обмотці ВН шляхом введення діелектричної вставки між корпусом обмотки і витками. Величина випучування витків становила 3 мм. Зсуву піддавалися витки 12...15. Зовнішній вигляд обмотки ВН зі змодельованим дефектом наведено на рисунок 3.11. Генератор зондувальних імпульсів підключався до входу обмотки ВН. Сигнал-відгук реєструвався на обмотці НН. Осцилограми сигналів-відгуків за відсутності та наявності дефекту наведено на рисунок 3.12.



Рисунок 3.11 - Змодельований дефект "радіальне зміщення витків"



Рисунок 3.12 - Осцилограми сигналів відгуку: 1 - дефект відсутній, 2 випучування витків згідно з рисунком 3.11

Перша частина сигналу-відгукуку практично збігається з нормограмою. Відмінність осцилограм проявляється в другій частині кривої. Зміна форми сигналу на окремій ділянці вказує на зміни в обмотці. Схожі відхилення сигналу відгуку від нормограми спостерігаються під час зсуву витків обмотки ВН в аксіальному напрямку. На рисунку 3.13 наведено суміщені осцилограми бездефектної обмотки (крива 1) і в разі зсуву кількох витків у нижній частині обмотки (крива 2).



Рисунок 3.13 - Осцилограми сигналів відгуку: 1 - дефект відсутній, 2 зсув кількох витків в аксіальному напрямку в нижній частині обмотки ВН

На осцилограмах, наведених на рисунках 3.12 і 3.13, видно, що відхилення нормограми від сигналів-відгуків під час радіального випинання витків або під час їхнього аксіального зсуву незначною мірою відрізняються одне від одного.

# 3.3 Закономірності зміни форм відгуків за різних способів з'єднання обмоток

Експериментально досліджені дві схеми з'єднання обмоток: "зірка-зірка" і "зірка-трикутник".

З'єднання обмоток за схемою "зірка-зірка"

На високовольтне введення однієї з фаз подавався прямокутний імпульс із генератора. Імпульси-відгуки (далі відгук) у низьковольтній обмотці реєструвалися за допомогою осцилографа. Експериментально показано, що в разі з'єднання обмоток за схемою зірка-зірка міжвиткове замикання в низьковольтній обмотці визначається за відгуком у відповідній низьковольтній обмотці. Наприклад, на рисунку 3.14 наведено осцилограму відгуку на обмотці НВ фази "b" за відсутності дефекту (рисунок 3.14, a) та в разі короткого замикання кількох витків низьковольтної обмотки фази "b" (рисунок 3.14, б). Видно, що відгук у НВ обмотці фази "b" змінився. При цьому за наявності декількох короткозамкнених витків у НВ обмотці у фазі "b" і в разі застосування зондувального сигналу, наприклад, до фази ВВ обмотки фази "A" та реєстрації імпульсу в НВ обмотці фази "a", відгук практично не змінюється, порівнюючи з відгуком бездефектної обмотки (рисунок 3.14, в).



Рисунок 3.14 - Відгуки з низьковольтної обмотки (з'єднання обмоток "зірка-зірка"): а) - відгук із фази "b" за відсутності дефектів, б) - відгук із фази "b" при замиканні декількох витків НВ обмотки фази "b", в) - відгук із фази "a" при замиканні декількох витків НВ обмотки фази "b" (масштаб на всіх осцилограмах за віссю часу й віссю амплітуди однаковий)

Представлені на рисунку 3.14 відгуки показують; що при з'єднанні обмоток за типом "зірка-зірка" метод чутливий тільки в разі порівняння відгуків на однойменних фазах.

З'єднання обмоток за схемою "зірка - трикутник"

Методика експерименту аналогічна тій, що застосовувалася для з'єднань обмоток "зірка-зірка". Зондувальний імпульс подавався на одну з обмоток ВН, відгук реєструвався на одній з НВ обмоток. На рисунку 3.15 наведено відгуки на обмотках НВ під час застосування зондувального імпульсу до ВВ обмотки фази "В".



Рисунок 3.15 - Відгуки з низьковольтної обмотки (з'єднання обмоток "зірка-трикутник"): а) відгук із фази "b" за відсутності дефектів, б) відгук із фази "b" у разі замикання кількох витків НВ обмотки фази "b", в) відгук із фази "b" у разі замикання кількох витків НВ обмотки фази

Результат показує, що в разі з'єднання обмоток за схемою "зіркатрикутник" і подачі зондувального імпульсу на одну з обмоток, з'єднану зіркою, відгуки спостерігаються на всіх обмотках, з'єднаних трикутником. Це ускладнює ідентифікацію пошкодженої обмотки, тому що наперед невідомо, яким має бути відгук у пошкодженій і неушкодженій обмотках. У таких випадках доцільно проводити математичне моделювання з метою розуміння як коротке замикання в одній з обмоток впливає на форму відгуку в інших обмотках, з'єднаних у "трикутник".

# 3.4 Експерименти, що підтверджують високу чутливість методу наносекундних імпульсів

Для того щоб перевірити можливості пропонованого методу, було виконано експеримент, що демонструє досить високу чутливість діагностичної процедури за використання коротких зондувальних імпульсів. Експеримент полягав у такому. У ділянці низьковольтної котушки до одного з витків, розташованого в середині обмотки, припаювали провідник завдовжки близько 5 см паралельно обмотці так, як показано на рисунку 3.16.



Рисунок 3.16 - Зовнішній вигляд додаткової ємності в області обмотки НН

Наявність цього провідника вносила додаткову незначну електричну ємність між двома сусідніми витками обмотки НН і щодо навколишнього простору. Зондувальний імпульс прямокутної форми тривалістю 400 нс подавався на вхід обмотки НН. Записувався сигнал відгуку з цієї обмотки НН за відсутності та наявності зазначеного провідника. Вигляд відгуку без додаткової ємності наведено на рисунку 3.17, а, з додатковою ємністю - на рисунку 3.17, б.



Рисунок 3.17 - Відгуки, отримані в експерименті з додатковою ємністю: а) - без додаткової ємності, б) - з додатковою ємністю

Як видно на наведених осцилограмах, різниця у формі сигналів відгуку значна. Період коливань, форма амплітуди і загальний вигляд кривих істотно змінилися. Така різниця у формі сигналів у разі внесення в ділянку обмотки дроту завдовжки 5 см підтверджує високу чутливість досліджуваного методу.

3.4.1 Вплив форми зондувального імпульсу на чутливість діагностичної процедури

Для дослідження впливу форми зондувального імпульсу на чутливість і загальну схему діагностичної процедури було виконано експеримент, у якому використовували імпульси двох типів - імпульс форми "дзвіночок" із різним фронтом і прямокутний імпульс. Форма зондувального імпульсу змінювалася встановлення виході генератора зондувальних імпульсів шляхом на конденсаторів ємністю 2200 і 1600 пФ. Зондувальний імпульс подавався на вхід обмотки ВН. Сигнали відгуку реєструвалися на обмотці НН на відпайках, що відповідають 5, 10, 15 і 20 виткам обмотки НН. Осцилограми сигналів відгуку реєструвалися осцилографом. Ha рисунку 3.18. a) навелено форму зондувального імпульсу, а на рисунку 3.18, б) - відповідний йому відгук.



Рисунок 3.18 - а) - форму зондувального імпульсу, б) – відповідний відгук зондувальному імпульсу

На рисунку 3.19, а) наведено форму прямокутного зондувального імпульсу і відповідний йому відгук на рисунку 3.19, б).



Рисунок 3.19 - a) - форму зондувального імпульсу, б) - відповідний відгук зондувальному імпульсу

Видно, що відгук на прямокутний імпульс містить ширший спектр гармонік, ніж відгук на імпульс із пологим фронтом; це відбилося на чутливості діагностичної процедури, яка істотно вища у випадку прямокутних імпульсів.

3.4.2 Вплив тривалості зондувального імпульсу на чутливість діагностичної процедури

Згідно з результатами теоретичних досліджень і практики застосування імпульсного методу діагностики, тривалість зондувального імпульсу є

важливим параметром [1-3]. Було виконано експерименти з визначення впливу тривалості імпульсу на чутливість діагностичної процедури. Тривалість зондувального імпульсу регулювали шляхом зміни довжини кабелю генератора. Зондувальний імпульс подавався на вхід обмотки ВН. Сигнали відгуку реєструвалися на відпайках обмотки НН, що відповідають 5, 10, 15 і 20 виткам.

Моделювали дві ситуації: випадок бездефектного стану і ситуація КЗ в області нижньої частини обмотки ВН, як показано на рисунку 3.20 для випадку замикання між 96 і 108 витками обмотки.



Рисунок 3.20 - Зовнішній вигляд частини обмотки ВН на осерді з КЗ у кінці обмотки

Проведено вимірювання сигналів відгуку для різних тривалостей зондувального імпульсу 350, 77, 41 і 10 нс. Як приклад на рисунку 3.21 наведено осцилограми для зондувальних імпульсів 350 і 10 нс.





Рисунок 3.21 - Вплив тривалості зондувального імпульсу на відгук: а), б) відгуки за тривалості зондувального імпульсу 350 нс; в), г) - відгуки за тривалості зондувального імпульсу 10 нс; а), в) - обмотка без дефекту; б), г) замикання кількох витків у кінці обмотки ВН (див. рисунок 3.19)

На рисунку 3.21 видно, що зі збільшенням довжини зондувального імпульсу відгук стає менш насиченим гармоніками. Це дає змогу стверджувати, що чутливість діагностичної процедури при збільшенні довжини імпульсу знижується.

3.3.3 Вплив тривалості фронту зондувального імпульсу на чутливість діагностичної процедури

Прямокутний імпульс високовольтну обмотку подавався на трансформатора (рисунок 3.22, осцилограма 1), імпульс-відгук знімали з низьковольтної обмотки трансформатора (рисунок 3.22, осцилограми 2 і 3). Обмотки не мали жодних навантажень (модель розшинованого трансформатора). Використовувалися імпульси з фронтом тривалістю - 400 і 25 нс.

Режим КЗ моделювався шляхом електричного з'єднання між 96 і 108 витками обмотки. Осцилограми відгуків з низьковольтної обмотки трансформатора за відсутності дефектів обмотки і за наявності короткого

62

замикання наприкінці обмотки ВН відрізняються одна від одної тим значніше, чим коротший фронт зондувального імпульсу.



Рисунок 3.22 - Зіставлення імпульсів-відгуків за різних тривалостей фронту зондувального імпульсу: а) 400 нс, б) 25 нс: 1 – форма зондувального імпульсу на високовольтній обмотці, 2 - форма імпульсу відгуку на низьковольтній обмотці, яка не має дефекту, 3 – форма імпульсу відгуку на низьковольтній обмотці під час замикання 96 витка зі 108 витком (див. рисунок 3.20).

Отримані результати можна пояснити тим, що імпульси з коротшим фронтом збуджують контури з більш високою власною частотою. Таким чином, використовуючи для зондування імпульси з крутим фронтом, можна відстежувати навіть незначні зміни в геометрії обмоток трансформатора, що важко під час використання тривалостей імпульсу понад 500 нс.

#### 3.5 Висновки до розділу

Експериментально технологія імпульсного доведено, ЩО дефектографування механічного обмоток трансформаторів стану зондувальними імпульсами наносекундної тривалості володіє вишою чутливістю до виявлення зсувів обмоток трансформаторів у радіальному та аксіальному напрямках порівняно з методом частотного аналізу (методу FRA).

Показано, що за імпульсного методу дефектографування стану обмоток трансформатора для виявлення зміщення витків обмотки та короткого замикання витків висока чутливість досягається за тривалості імпульсу 60 - 500 нс із фронтом 15 - 20 нс.

Під час експериментів із дослідження процесу контролю стану обмоток методом низьковольтних імпульсів (НВІ) встановлено, що чутливість діагностичної процедури істотно підвищується в міру зменшення тривалості зондувального імпульсу і збільшення крутизни його фронту.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1 Охорона праці

4.1.1. Техніка безпеки при експлуатації електромереж

До обслуговування електрообладнання допускаються особи не молодше 18 років, які не мають медичних протипоказань, що заважають виконанню робіт, що отримали вступний і первинний інструктажі на робочому місці, виробниче навчання, перевірку знань.

Електромонтер повинен знати схему електропостачання об'єктів виробництва, повинен мати навички прийомів технічних методів обслуговування електроустановок. Він забезпечується усіма засобами індивідуального захисту та спецодягом. Інструменти і засоби захисту повинні бути випробувані, справні та використовуються за призначенням.

При експлуатації діючих електроустановок застосовують електрозахисті засоби та запобіжні пристосування. Ручне включення і відключення устаткування напругою понад 1000 В необхідно виконувати в діелектричних рукавичках, колошах або на килимку. Відключення виконують таким чином: відключають роз'єднувачі, знімають плавкі вставки запобіжників, від'єднують привод мережі. Після вивішування плаката перевіряють відсутність напруги на відключення. В оперативному журналі роблять запис про відключення. Включення проводять тільки після відмітки в журналі про закінчення робіт із зазначенням відповідальної особи.

Безпека виконання забезпечується також організаційними заходами. До них відноситься оформлення роботи нарядів, оформлення допуску до роботи, нагляд під час виконання роботи.

Наряд є письмовим дозволом на роботу в електроустановках, що визначає місце, час, початок і закінчення робіт; умови безпечного його проведення, склад бригади та осіб, відповідальних за безпеку. Без наряду по усному чи письмовому розпорядження, але з обов'язковим записом в журналі можуть виконуватися такі роботи, як прибирання приміщень до огородження електрообладнання, чистка кожухів, доливка масла в підшипники, догляд за

65

колекторами, контактними кільцями, щітками, заміна запобіжників. При роботі з електроустановками напругою до 1000 В без зняття напруги необхідно: захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмовідні частини, що знаходяться під напругою, до яких можливий випадковий дотик; працювати в діелектричних калошах або стоячи на ізолюючій підставці, або на діелектричному килимі; застосовувати інструмент з ізолюючими рукоятками (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень), за відсутності такого інструменту користуватися діелектричними рукавичками.

При виконанні робіт без зняття напруги на струмовідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукоятки до обмежувального кільця; розташовувати ізолюючі частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмоведучими частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

При виявленні порушення лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними має бути негайно припинене.

Щозмінні огляди електрообладнання та мереж повинен проводити черговий електромонтер. При огляді слід звертати увагу на змін стану електрообладнання наступне: відсутність його при функціонуванні; ступінь корозії, фарбування труб, кріпильних елементів; справність вводів проводів та кабелів в електроустаткування; справність заземлюючих пристроїв; наявність попереджувальних плакатів та знаків на вибухонебезпечному електрообладнанні; наявність всіх маркування передбачених конструкцією болтів, що кріплять елементи оболонки (вони повинні бути добре затягнуті); потрапляння на електрообладнання бризок, крапель і пилу.

При виявленні ненормальної роботи силового трансформатора черговий електромонтер повинен вивести його з роботи з обов'язковим дотриманням усіх заходів особистої безпеки, використовуючи необхідні засоби індивідуального захисту. Таке відключення проводиться при: сильному нерівномірному шумі і потріскування всередині трансформатора; ненормальному і постійно зростаючому нагріванні трансформатора при номінальному навантаженні і роботі пристроїв охолодження; викид масла з розширювача або розриві діафрагми вихлопної труби; течі масла з пониженням його рівня нижче мінімально допустимого.

При цьому робиться запис в оперативному журналі і повідомляється відповідальному за електрогосподарство.

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів і правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів вимагають проводити регулярні огляди та ремонт електромереж, а також вимірювання опору та ізоляції.

## 4.2. БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.2.1 Дослідження стійкості роботи у надзвичайних ситуаціях підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі

Під стійкістю роботи об'єктів електротехнічної і світлотехнічної галузі розуміють його спроможність в умовах надзвичайної ситуації випускати продукцію в запланованому обсязі та номенклатурі, а при отриманні середніх руйнувань або порушенні зв'язків з кооперації та поставок відновлювати виробництво у мінімальні терміни.

Під стійкістю роботи об'єктів, які безпосередньо не виробляють матеріальні цінності розуміють їх спроможність виконувати свої функції в умовах HC.

На стійкість роботи об'єктів електротехнічної та світлотехнічної галузі в умовах НС впливають наступні фактори:

– надійність захисту робітників та службовців;

 – спроможність інженерно-технічного комплексу об'єкта протистояти у визначеному ступеню уражаючих факторів стихійного лиха, аварій, катастроф та сучасних видів зброї;

67

– захищеність об'єкта від вторинних уражаючих факторів (пожеж, вибухів, зараження отруйними речовинами);

 надійність системи забезпечення об'єкта всім необхідним для виробництва (сировиною, паливом, комплектуючими вузлами і деталями, електроенергією, водою, газом та іншим);

– стійкість та безперервність керування виробництвом та ЦО;

– підготовленість об'єкта до ведення РіНР та робіт щодо порушеного виробництва.

Захист робітників та службовців досягається чотирма основними способами:

– укриття людей в захисних спорудах;

– проведення евакозаходів;

– радіаційно-хімічний захист;

– медичний і біологічний захист.

Надійно захистити виробничий персонал об'єкта можливо лише при комплексному використанні усіх основних способів захисту.

Захист виробничих фондів полягає у підвищенні протидії будинків, споруд і конструкції об'єкта до уражаючих факторів та захисті технологічного обладнання, верстатів, систем і комунікацій та інших засобів, що формують основу виробничого процесу.

Створення надійних систем електро-, водо- та теплозабезпечення об'єктів:

а) підвищення стійкості електрозабезпечення:

– розподіл схеми електромереж на незалежно працюючі частини;

– закільцювання електромереж та підключення їх до декількох джерел енергозабезпечення;

- створення резерву дизельних електростанцій;

б) підвищення стійкості систем водопостачання:

- водопостачання від двох незалежних джерел, одне з яких підземне;

– захист вододжерел та резервуарів чистої води;

- створення обвідних (байпасних) ліній навколо водонапірних веж;

68

в) підвищення стійкості систем газо, тепло- та паливо- забезпечення:

 – розподільні газопроводи робити підземними та передбачати їх кільцювання;

– газорозподільні станції та опорні пункти обвідних газопроводів передбачати в підземному варіанті;

– встановлювати в основних вузлових точках систем автоматичні вимикаючі пристрої, які спрацьовують при аваріях.

Підвищення протипожежної стійкості:

– максимальне скорочення запасів палива та вибухонебезпечних речовин;

– проведення профілактичних протипожежних заходів;

– підготовка сил і засобів пожежогасіння.

Створення стійкості системи матеріально-технічного постачання. На об'єктах електротехнічної і світлотехнічної галузі створюють запаси сировини, палива, комплектуючих вузлів і деталей, обладнання, які дозволяють продовжувати роботу на випадок дезорганізації постачання.

Створення стійкості системи керування:

- підготовка ПУ (захищених);

- забезпечення ПУ засобами зв'язку;

– використання автоматизованої системи керування. Підготовка до прискореного (негайного) відновлення порушеного виробництва;

– розробка необхідної технічної та технологічної документації;

- створення запасів матеріальних засобів для встановлення робіт;

– розробка розрахунків сил і засобів для відновлюючих робіт;

– визначення вірогідної черговості робіт по відновленню виробництва з урахуванням наявних ресурсів та місцевих умов.

Крім того, на стійкість роботи підприємств електротехнічної та світлотехнічної галузі буде впливати наявність підготовленої робочої сили.

Підвищення надійності та оперативності керування виробництвом:

- створення на об'єкті стійкої системи зв'язку;

- висока підготовка керівного складу;

 своєчасне прийнятті вірних рішень та постановка завдань підлеглим у відповідності до обстановки, що склалася.

Підвищення стійкості роботи об'єкта електротехнічної та світлотехнічної галузі досягається завчасним проведення комплексу інженерно-технічних, технологічних та організаційних заходів, які спрямовані на максимальне зниження дії уражаючих факторів і створення умов для ліквідації наслідків HC.

Інженерно-технічні заходи — це комплекс робіт, що забезпечують підвищення стійкості виробничих будинків і споруд, обладнання, комунальноенергетичних, систем.

Технологічні заходи забезпечують підвищення стійкості роботи об'єкті шляхом зміни технологічного процесу, що сприяє спрощенню виробництва продукції та усуває можливість виникнення вторинних уражаючих факторів.

Організаційні заходи передбачають розробку і планування дій керівного командно-начальницького складу штабу, служб і формування ЦО при захист робітників і службовців, проведенні РіНР, відновленні виробництва.

#### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Розроблено діагностичний комплекс для контролю стану обмоток трансформаторів, реалізований на основі генератора зондувальних імпульсів дає змогу формувати імпульс тривалістю в діапазоні 60 - 500 нс із фронтом 25 нс на навантаженні з довільним імпедансом.

Під час експериментів з різними комутаторами було помічено, що найкраща повторюваність формованих імпульсів за формою була також у герконового комутатора. Інші комутатори з різною періодичністю формували імпульси з різним фронтом і плоскою частиною вершини імпульсу. Осцилограми відгуку, отримані на фізичній та розрахунковій моделях, показують задовільний збіг. Це свідчить про адекватність моделей і дає змогу розрахунковим шляхом прогнозувати вид осцилограм-відгуків у разі різних підключень зондувального генератора та місця отримання відгуку в разі різних дефектів обмотки.

Удосконалено імітаційну математичну модель обмоток трансформатора, що дає змогу моделювати перехідні процеси в обмотках із врахуванням ємностей між витками обмотки, між витками і корпусом трансформатора, між витками обмотки і витками обмоток сусідніх фаз, що, своєю чергою, дає змогу розрахунковим шляхом виявляти характер зародження в обмотці дефектів.

Під час експериментів із дослідження процесу контролю стану обмоток методом низьковольтних імпульсів (HBI) встановлено, що чутливість діагностичної процедури істотно підвищується в міру зменшення тривалості зондувального імпульсу і збільшення крутизни його фронту. Показано, що за імпульсного методу дефектографування стану обмоток трансформатора для виявлення зміщення витків обмотки та короткого замикання витків висока чутливість досягається за тривалості імпульсу 60 - 500 нс із фронтом 15 - 20 нс.

Експериментально доведено, шо технологія імпульсного дефектографування механічного обмоток трансформаторів стану зондувальними імпульсами наносекундної тривалості володіє вищою чутливістю до виявлення зсувів обмоток трансформаторів у радіальному та аксіальному напрямках порівняно з методом частотного аналізу (методу FRA).

71
## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

 Tenbohlen, S. Diagnostic Measurements for Power Transformers Review / S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Djamali, A. Andreas Muller, M. Samim, M. Siegel // Energies. – 2016. – V. 9.

 Pham, D. A New Method for Purposes of Failure Diagnostics and FRA Interpretation applicable to Power Transformers / D. Pham, T. Pham, H. Borsi, E. Gockenbach // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – V. 20. – N. 6. – P. 2026–2034

3. Senobari, R. Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: A review / R. Senobari, J. Sadeh, H. Borsi // Electric Power Systems Research. – 2018. – V. 155. – P. 172–183

4. heng, Q. Diagnostic of transformer winding deformation fault types using continuous wavelet transform of pulse response / Q. Cheng, Z. Zhao, C. Tang, G. Qian, S. Islam // Measurement. – 2019. – V. 140. – P. 197–206

5. Senobari, R. Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: A review / R. Senobari, J. Sadeh, H. Borsi // Electric Power Systems Research. – 2019. – V. 155. – P. 172–183.

6. Zhaoa, X. High frequency electric circuit modeling for transformer frequency response analysis studies / X. Zhaoa, C. Yao, A. Abu-Siada, R. Liao // Electrical Power and Energy Systems. – 2019. – V. 111. – P. 351–368

7. Mitchell, S. The influence of complex permeability on the broadband frequency response of a power transformer / S.D. Mitchell, J.S. Welsh // IEEE123 Transaction on Power Delivery. -2010. - V.25 - N.2. - P. 803-813.

8. Rahimpour, E. A new method for comparing the transfer function of transformers in order to detect the location and amount of winding faults / E. Rahimpour, D. Gorzin // Electrical Engineering. – 2006. – V. 88. – P. 411–416

9. Kim, J. Fault diagnosis of a power transformer using an improved frequency-response analysis / J. Kim, B. Park, S. Jeong, S. Kim, P. Park // IEEE Transactions on power delivery. -2005. -V. 20. - P. 169–178.

10. Kim, J. Fault diagnosis of a power transformer using an improved frequency-response analysis / J. Kim, B. Park, S. Jeong, S. Kim, P. Park // IEEE Transactions on power delivery. -2005. -V. 20. - P. 169–178.

11. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.

12. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.