

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ „ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Сабат Мирослав Богданович

УДК 621.3.013.62

УДК 621.314.21

УДК 621.314.222.8

**МОДЕЛЬ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЇ
ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ МЕРЕЖІ**

Спеціальність: 05.14.02 – електричні станції, мережі та системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Львів 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Електропостачання промислових підприємств, міст і сільського господарства» Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Никонець Леонід Олексійович,

професор кафедри “Електропостачання промислових підприємств, міст і сільського господарства”

Національного університету “Львівська політехніка”

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Тугай Юрій Іванович,

завідувач відділу оптимізації систем

електропостачання Інституту електродинаміки НАН України

кандидат технічних наук, професор

Плешков Петро Григорович,

завідувач кафедри електротехнічних систем та

енергетичного менеджменту Кіровоградського національного технічного університету

Захист відбудеться „23” жовтня 2015 р. о 13 годині 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті “Львівська політехніка”(79013, м. Львів, вул. С.Бандери, 12, ауд.114 головного корпусу)

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка”(79013, м. Львів, вул. Професорська 1).

Автореферат розіслано „10” вересня 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доцент

В.І.Коруд

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вважається, що ізоляція електрообладнання напругою до 110 кВ, яка виконана за чинною нормативною базою, повинна витримувати дію внутрішніх перенапруг. Тому таке електрообладнання захищають тільки від імпульсних перенапруг вентильними розрядниками. Але, як показує досвід експлуатації, в електрообладнанні такого класу напруг у 55,2% випадків пошкоджується поздовжня (виткова) ізоляція, в тому числі 34,4% за дії внутрішніх перенапруг.

Отже, наявна суперечність між нормативною базою та досвідом експлуатації. Підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання в мережах до 110 кВ вимагає поглибленого вивчення умов його роботи та, зокрема, всіх видів впливів на ізоляцію. На сьогодні основним інструментом дослідження електромагнітних процесів в електрообладнанні є математичне моделювання.

Існують моделі вищезгаданого електрообладнання, які дозволяють дослідити вплив внутрішніх перенапруг на окремі його конструкційні елементи, але немає моделей, які б давали змогу дослідити розподіл перенапруг вздовж обмотки, що потрібно для вирішення проблеми запобігання пошкодження виткової ізоляції.

Ще однією проблемою моделей для дослідження електромагнітних процесів є перевірка їх адекватності, адже провести натурний експеримент з вимірювання потрібних параметрів електромагнітних процесів за дії внутрішніх перенапруг практично неможливо. Тому для створення нових моделей потрібно використовувати нові підходи, які для підтвердження адекватності моделі не вимагають натурних експериментальних досліджень електромагнітних процесів у реальному обладнанні за дії перенапруг.

Вагомий внесок у дослідження електромагнітних процесів та розподілу перенапруг в обмотках електрообладнання зробили такі вчені: Б. Густавсен, О. В. Кириленко, М. С. Сегеда, О. Ф. Буткевич, Л. Н. Конторович, О. М. Равлик. Однак попри всі норми і правила захисту електрообладнання з обмотками ВН, воно і надалі виходить з ладу за дії внутрішніх перенапруг. Отже, створення моделей трансформаторів, для одержання достовірних параметрів дії на ізоляцію внутрішніх перенапруг мережі є актуальною задачею

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає напряму наукових досліджень „Ресурсозберігаючі технології та інтелектуальні системи керування в енергозабезпеченні об'єктів економічної діяльності”, а саме розділ „Математичне моделювання, автоматизоване проектування та розробка електромеханічних перетворювачів та систем керування ними. Розробка методів і засобів неруйнівного контролю та технічної діагностики електричних машин, трансформаторів і апаратів”. Результати були отримані в ході виконання науково-дослідних робіт „Режими роботи ізоляції електроустаткування з обмотками високої напруги”, номер державної реєстрації 0108U004265 – 2008-2011 рр. та „Дослідження розподілу перенапруг

вздовж обмотки високої напруги трансформаторів”, номер державної реєстрації 0111U010221 – 2011-2012рр.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розроблення моделей, які адекватно відтворюють електромагнітні процеси в обмотках трифазних трансформаторів за дії на них внутрішніх перенапруг мережі.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати можливість адекватного відтворення існуючими моделями електромагнітних процесів в обмотках трансформаторів за дії на нього внутрішніх перенапруг мережі;
- обґрунтувати структурну схему трифазних трансформаторів для дослідження електромагнітних процесів в обмотках, множина двополюсників якої адекватно відтворює властивості всіх конструкційних елементів трансформаторів;
- розробити методи експериментального визначення параметрів двополюсників структурної схеми трансформаторів (ССТ);
- синтезувати двополюсники ССТ за їх частотними характеристиками;
- відтворити на моделі втрати потужності в трансформаторах за дії внутрішніх перенапруг мережі;
- з використанням цифрового комплексу RE¹ підтвердити адекватність моделі трифазних трансформаторів шляхом порівняння частотних характеристик отриманих на моделі та об'єкті-оригіналі.

Об'єкт дослідження. Електромагнітні процеси в обмотках трифазних трансформаторів за дії внутрішніх перенапруг мережі.

Предмет дослідження. Модель трифазних трансформаторів для дослідження електромагнітних процесів за дії внутрішніх перенапруг мережі.

Методи досліджень. Методи математичного і комп'ютерного моделювання процесів у трансформаторах і електромережах, методи синтезу лінійних електричних кіл, частотні методи аналізу електричних кіл, методи планування та проведення натурних експериментів, теорія електричних кіл.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- вперше запропонована та обґрунтована структурна схема трансформаторів, яка, на відміну від відомих, складається з двополюсників, що відтворюють властивості ізоляції, обмоток та їх частин і дозволяє дослідити вплив елементів конструкції на характеристики і кількісні значення параметрів електромагнітних процесів у вибраних точках обмоток за дії внутрішніх перенапруг мережі.

- вперше розроблено метод експериментального одержання частотних характеристик частин ізоляції трансформатора, який полягає у примусовому обмеженні впливу струмів інших елементів конструкції введенням додаткових резисторів, що дозволило спростити синтез двополюсників структурної схеми трансформаторів, які відтворюють властивості ізоляції.

- вперше для відтворення властивостей частин обмотки трансформатора розроблено метод експериментального визначення їх параметрів за значеннями електрорушійних сил від основного магнітного потоку на частинах обмотки

¹ Цифровий комплекс розроблений працівниками НУ «Львівська політехніка» д.т.н. Равликом О. М. та к.т.н. Гречином Т. М.

високої напруги і напруг на цих частинах, що дозволило врахувати взаємоіндукцію між ними.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Розроблені методи дозволяють створювати моделі трансформаторів для дослідження електромагнітних процесів за дії внутрішніх перенапруг.

2. Синтезовані моделі трифазних трансформаторів рекомендовано використовувати під час проектування та експлуатації трансформаторів для оцінки впливу конструкції на характер електромагнітних процесів в обмотках.

3. Матеріали дисертації використані і впроваджені у навчальний процес напряму «Електротехніка та електротехнології» з дисципліни «Експлуатація та діагностика обладнання електропостачальних систем».

Апробація основних результатів дослідження. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на міжнародній науково-практичній конференції EPECS-2010 (м. Львів), на міжнародній науково-практичній інтернет-конференції SWorld «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте» (грудень 2013р.), на міжнародній науково-практичній інтернет-конференції SWorld «Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень» (березень 2014р.), на науковому семінарі Інституту електродинаміки НАН України «Моделі та методи комп'ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем» (м. Львів, 2012р.) та на наукових семінарах кафедри електропостачання промислових підприємств, міст і сільського господарства НУ «Львівська політехніка» (Львів, 2009-2014 роки).

Публікації. За результатами виконаних у дисертаційній роботі досліджень опубліковано 20 праць, з них 14 у фахових виданнях України, 4 у закордонних виданнях, одна в українському виданні, яке входить до міжнародних наукометричних баз та одна монографія.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 113 найменувань. Повний обсяг роботи – 137 сторінок, у тому числі 109 сторінок основного тексту, 64 рисунки, 12 таблиць, список використаних джерел (на 12 сторінках).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі, наукову новизну та практичне значення роботи. Наведено структуру та обсяг роботи.

У першому розділі наведено критичний огляд літератури з аналізу умов роботи трансформаторів в електричних мережах, стану їх математичного моделювання. Розглянуто класифікацію методів моделювання, а також проаналізовано існуючі моделі трифазних трансформаторів. Встановлено, що існуючі моделі не спроможні відтворити електромагнітні процеси всередині обмоток ВН електрообладнання.

Аналіз досвіду експлуатації силових трансформаторів в електричних мережах показав, що визначальна частка відмов трансформаторів пов'язана з пошкодженням внутрішньої ізоляції.

Більшість існуючих моделей відтворюють властивості тільки обмотки та магнітної системи, нехтуючи таким важливим елементом для дослідження електромагнітних процесів, як ізоляція.

За допомогою існуючих моделей неможливо відтворити та дослідити експериментально встановлене фізичне явище внутрішнього резонансу.

З врахуванням вищевикладених проблем Молнар М. М. була створена модель, яка базувалася на нових підходах та дозволила відтворити вплив усіх трьох основних елементів конструкції трансформатора (обмотки, ізоляції, магнітопроводу) та баку.

Створена модель дала нові можливості моделювання електрообладнання, дозволила досліджувати електромагнітні процеси та розподіл перенапруг на елементах конструкції обладнання. Разом з тим отримані результати дослідження на цій моделі поставили багато нових запитань, а саме: як розподіляються перенапруги вздовж обмотки, які процеси відбуваються в обмотках за дії внутрішніх перенапруг та інші.

Щоб дати відповіді на ці питання, згадану модель необхідно деталізувати та вдосконалити. Для експериментального дослідження процесів в обмотці трансформатора потрібно зробити додаткові виводи з місць обмотки, процеси в яких нас цікавлять, та створити уточнену модель.

Це непроста задача, оскільки один додатковий вивід означає поділ обмотки ВН трансформатора на дві частини відносно точки виводу. А визначення характеристик кожної з частин обмотки само по собі є складною задачею через наявність магнітних зв'язків між ними та магнітного потоку розсіяння кожної частини. Необхідно також відтворити струми спливу через ізоляцію з врахуванням поділу обмотки. Така модель буде містити на порядок більше невідомих і буде на порядок складнішою. Для її створення потрібно на основі системного підходу розробити нові методи визначення параметрів елементів моделі та їх синтезу.

Методи синтезу таких моделей, а також синтезовані моделі силового трансформатора, які адекватно відтворюють процеси всередині обмотки ВН за дії внутрішніх перенапруг мережі, розроблені в наступних розділах.

У другому розділі обґрунтована та синтезована структурна схема трифазних трансформаторів (ССТ), множина двополюсників якої дозволяє відтворити властивості всіх елементів конструкції та дослідити розподіл перенапруг вздовж обмотки ВН, та обґрунтована методика вимірювання, наведено характеристики використаного для експериментальних досліджень обладнання та приладів.

У розділі сформульовані уявлення про фізичне явище внутрішнього резонансу в електрообладнанні з обмотками високої напруги, з врахуванням якого була створена ССТ. А також на основі досліджень встановлено, що явище внутрішнього резонансу в трансформаторі може виникати в декількох діапазонах частот, а кратності перенапруг на різних частинах обмотки є неоднаковими.

Структурну схему трансформатора створювали у два етапи. На першому етапі створена структурна схема нульової послідовності, у якій обмотку ВН трансформатора розділено на дві частини і представлено двома

двополюсниками. Але таке представлення обмотки не дає змоги відтворити та дослідити розподіл перенапруг вздовж обмотки ВН трансформатора. Для цього необхідно врахувати магнітний зв'язок не тільки обмотки ВН та НН, але й магнітний зв'язок (взаємоіндукцію) між частинами обмотки ВН (рис.1). Також потрібно врахувати й поперечні параметри в точці поділу, що здійснюється за допомогою додаткових двополюсників Z_5 та Z_6 . в ССТ (рис.1).

У ССТ (рис 1) обмотка ВН кожної фази представлена двома двополюсниками Z_7 та Z_8 , а обмотка НН двополюсником Z_9 . Кожен двополюсник, який представляє обмотку чи її частину, має магнітний зв'язок з іншими двополюсниками. Опір ізоляції обмоток відносно землі представлений двополюсниками $Z_1, Z_2, Z_5, Z_{10}, Z_{11}$. Опір ізоляції між обмотками ВН та НН представлений двополюсниками Z_3, Z_4, Z_6 (літерні індекси у позначенні двополюсників Z_n вказують на фазу обмотки).

Двополюсники міжфазної ізоляції (рис. 1) позначені, як $Z_{нн}$. Індекс біля Z вказує, яку частину ізоляції представляє двополюсник (між якими точками та якими фазами). А,В,С – фазні виводи обмоток ВН, А',В',С' – виводи точки поділу обмоток ВН, X,Y,Z – нейтральні виводи обмоток ВН, a,b,c – фазні виводи обмоток НН, о – нейтральний вивід обмотки НН. Кожен двополюсник ССТ – це набір послідовних ланок з паралельно з'єднаних R,L,C-елементів.

Така структурна схема трифазного трансформатора може бути й структурною схемою автотрансформатора.

На рис. 1 наведена також модель магнітної система трифазного трансформатора. На схемі використані такі позначення: F_A, F_B, F_C – магніторушійні сили в стрижнях трансформатора; $\Phi_A, \Phi_B, \Phi_C, \Phi_{ЯР1}, \Phi_{ЯР2}, \Phi_{ЯР3}, \Phi_{ЯР4}, \Phi_{МП1}, \Phi_{МП2}, \Phi_{МП3}, \Phi_{МП4}, \Phi_{МП5}, \Phi_{МП6}$ – магнітні потоки у вітках магнітної системи трансформатора; R_{M1}, R_{M2} – нелінійні магнітні резистанси осердь та половин ярем магнітопроводу трансформатора; R_{M3} – лінійний магнітний резистанс схеми заміщення оливного проміжку та бака трансформатора.

Для подальшого синтезу моделі трансформатора потрібно визначити числові значення параметрів кожного двополюсника ССТ.

У третьому розділі розроблені методи визначення параметрів двополюсників структурної схеми моделі трансформаторів та викладені основні принципи проведення дослідів на об'єкті – оригіналі.

ССТ містить декілька десятків двополюсників (рис.1), які відтворюють параметри обмоток й ізоляції, а також існуючих між ними електричних та магнітних зв'язків.

Завданням дослідження є визначення параметрів кожного з n двополюсників за їх частотною характеристикою.

Формально за значеннями вхідних опорів, одержаних з n незалежних дослідів на об'єкті-оригіналі, можна скласти систему n рівнянь з n невідомими.

Розв'язавши цю систему рівнянь, можна одержати n параметрів лінійних двополюсників моделі.

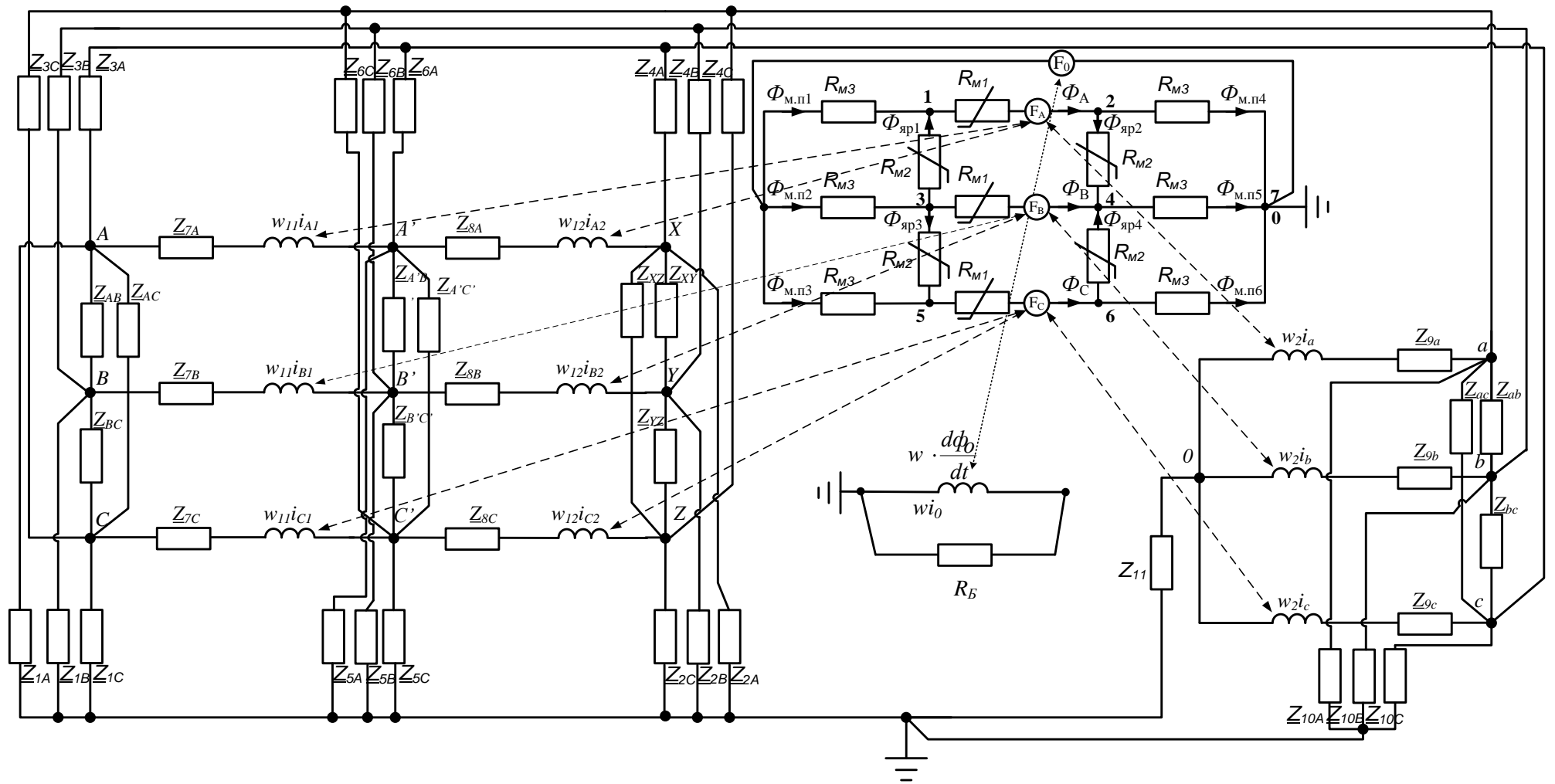


Рис. 1. Структурна схема моделі трифазних трансформаторів

Попередній досвід формування моделей електроустаткування показав, що одержана таким чином система рівнянь містить невідомі з надзвичайно широким діапазоном значень. Так, значення модулів опорів різних двополюсників для однакової частоти можуть відрізнятись в $10^7 - 10^8$ разів. Крім того, дослідні дані дають лише значення модулів вхідних опорів відносно певних виводів обмоток. За таких умов стандартне математичне забезпечення персонального комп'ютера не дає можливості розв'язати систему рівнянь.

Актуальним стає завдання поділу моделі на ряд підмоделей і, відповідно, проведення дослідів на об'єкті-оригіналі таким чином, щоб конкретні вимірювання охоплювали мінімальну кількість елементів об'єкту з відтворенням їх характеристик на моделі відповідною кількістю двополюсників. Ідеальним було б вимірювання в кожному досліді характеристики одного двополюсника ССТ, що дозволить з n незалежних рівнянь одержати параметри n двополюсників моделі.

Під час визначення частотної характеристики k -го (рис.2) двополюсника безпосередньо виміряти струм, що протікає крізь нього, неможливо. Є можливість вимірювання струму лише із сторони джерела живлення, за значенням якого та значенням напруги джерела можна визначити вхідний опір схеми, що відповідає результуючому опору множини двополюсників моделі.

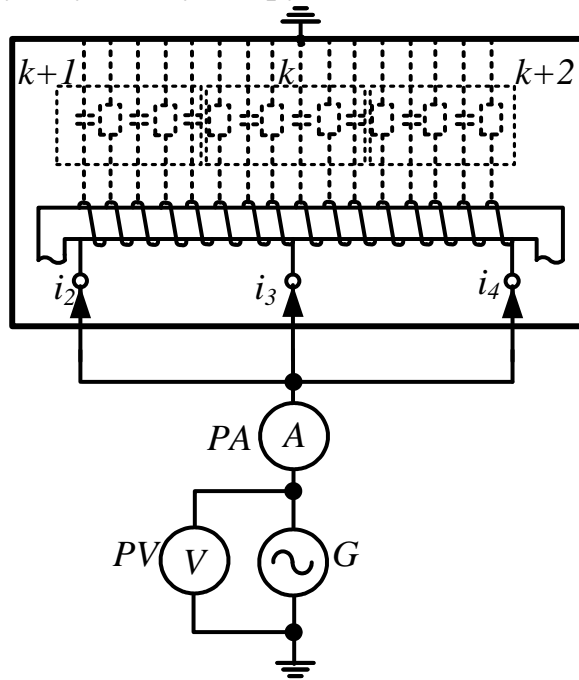


Рис.2. Схема для визначення спільної частотної характеристики k -го, $(k+1)$ -го та $(k+2)$ -го двополюсників

Нами запропоновано метод визначення характеристик k -го, $(k+1)$ -го та $(k+2)$ -го двополюсників, що відтворюють на моделі властивості конкретних частин ізоляції з використанням схеми рис.3. На схемі вивід $j+1$ відповідає точці з'єднання початків усіх фаз обмотки ВН, вивід j – точці з'єднання додаткових виводів $k\%$ від довжини фазних обмоток, вивід $j+2$ – точці з'єднання кінців фазних обмоток. Двополюсники k , $k+1$, $k+2$ відтворюють характеристики ізоляції між j -тим, $(j+1)$ -шим та $(j+2)$ -гим виводами і «землею» відповідно. Струми, що вимірюються міліамперметрами, приєднаними до виводів, будуть рівними струмам k -го, $(k+1)$ -го, $(k+2)$ -го двополюсників за

відсутності струмів у двополюсниках з індексами i та $i+1$ (у частинах обмоток). Для виконання цієї умови на виводи згаданих двополюсників слід подати напругу джерела живлення дослідної схеми. Крім того, для усунення струмів спливу між j -тим виводом та виводами інших обмоток (на рисунку не показані), на ці виводи також слід подати напругу джерела живлення. Оскільки струми через ізоляцію мають однаковий активно-ємнісний характер то тестом, що підтверджує правильність вимірювання струму може бути рівність суми показів міліамперметрів, приєднаних до виводів $j, j+1, j+2$, показу міліамперметра в колі джерела живлення.

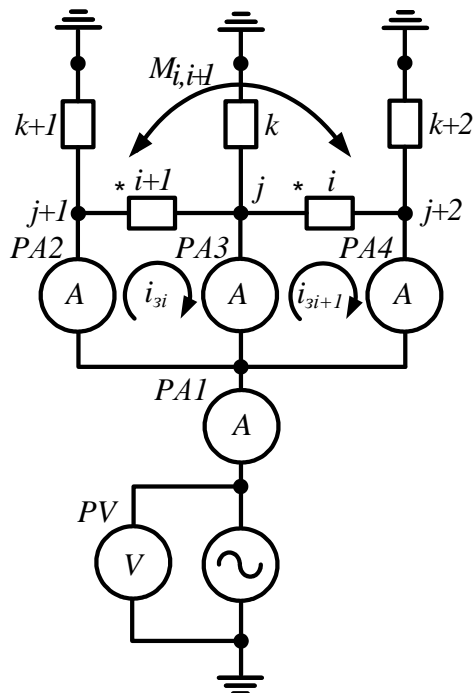


Рис.3. Схема безпосереднього вимірювання струмів в k -му, $(k+1)$ -му, $(k+2)$ -му двополюсниках

Однак, в дослідах на реальному об'єкті необхідно врахувати, що струми спливу крізь ізоляцію проходять по усіх витках обмоток, утворюючи магніторушійні сили. В дослідній схемі рис.3 обмотка ВН і її частини замкнені через незначний опір міліамперметрів, що утворює шляхи для проходження в обмотці ВН і її частинах зрівноважувальних струмів i_{zi} та i_{zi+1} , які зумовлюють відмінність вимірюваних міліамперметрами значень струмів від значень реальних струмів крізь двополюсники $k, k+1, k+2$. Для усунення впливу зрівноважувальних струмів i_{zi} та i_{zi+1} запропоновано послідовно з міліамперметрами в схемі за рис. 3 (крім міліамперметра в колі джерела живлення) увімкнути резистори з опором 100 Ом. Внесення таких додаткових резисторів не вплине на значення вимірюваних опорів, які лежать в межах від 20кОм до 1 МОм.

Зупинимось окремо на методі визначення частотних характеристик двополюсників, що відтворюють властивості міжфазної ізоляції. Для цього потрібно усунути електричний зв'язок між фазними обмотками, тобто роз'єднати їх нейтральні виводи. Для вимірювання опору ізоляції між фазами А та В необхідно подати напругу джерела живлення відносно «землі» на початок, кінець і проміжний вивід обмотки фази А, відповідні виводи обмотки фази В заземлити через міліамперметри і додаткові послідовні резистори з опором

100 Ом. Виводи обмотки фази С заземлюємо безпосередньо для усунення струмів спливу між обмотками фаз В і С. Дослідна схема наведена на рис. 4.

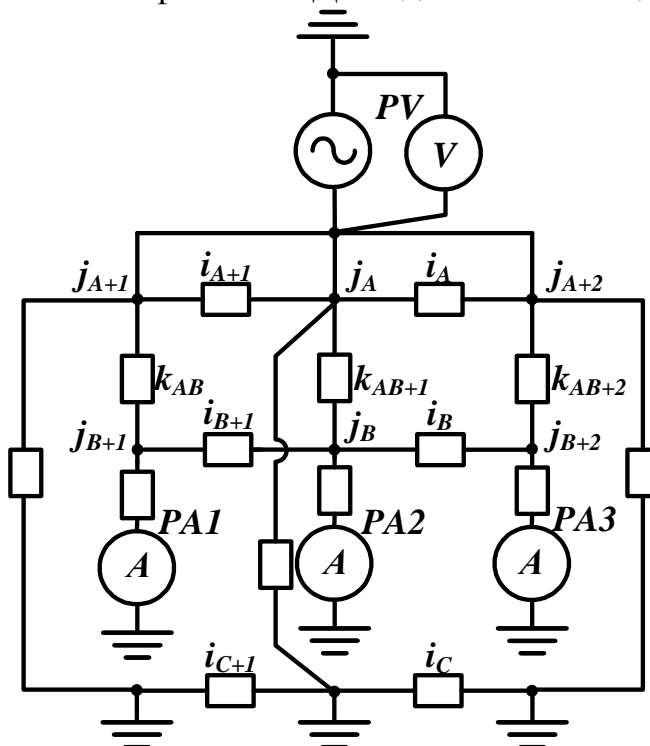


Рис.4. Схема безпосереднього вимірювання струмів в k_{AB} , k_{AB+1} , k_{AB+2} двополюсниках

Для визначення опорів частин обмотки потрібно провести ряд дослідів. Схема досліду для визначення значень модулів опорів двополюсників частин обмотки \dot{Z}_1 і \dot{Z}_2 (Z_7 і Z_8 на рис.1) частин обмотки ВН трансформатора представлена на рис. 5.

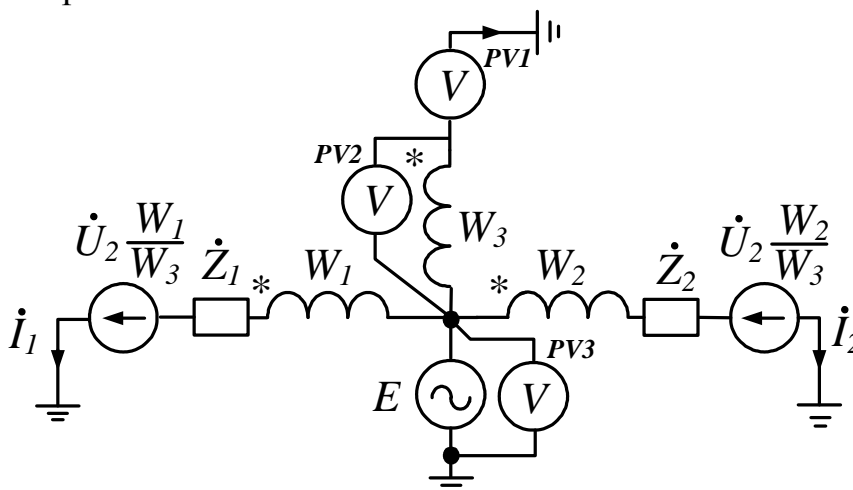


Рис. 5. Схема експериментального визначення параметрів двополюсників Z_1 і Z_2

На рис 5 позначено:

W_1 і W_2 – кількість витків частин обмотки ВН;

W_3 – кількість витків обмотки НН;

$U_2, U_2 \frac{W_1}{W_3} \cdot U_2 \frac{W_2}{W_3}$ – модулі напруг, наведених відповідно в обмотці НН та

частинах обмотки ВН основним магнітним потоком;

E – зовнішня електрорушійної сили, прикладеної до досліджуваного додаткового виводу обмотки ВН, відносно землі;

I_1 і I_2 – струми в закорочених виводах обмотки.

Згідно рис. 5. за другим законом Кіргофа запишемо:

$$Z_1 = \frac{\left| \dot{E} + \dot{U}_2 \frac{W_1}{W_3} \right|}{\dot{I}_1} = \frac{\left| \dot{E} + \dot{U}_2 \frac{W_1}{W_3} \right|}{I_1} \quad (1)$$

$$Z_2 = \frac{\left| \dot{E} - \dot{U}_2 \frac{W_2}{W_3} \right|}{\dot{I}_2} = \frac{\left| \dot{E} - \dot{U}_2 \frac{W_2}{W_3} \right|}{I_2} \quad (2)$$

Як видно з (1) і (2) для визначення модулів Z_1 і Z_2 потрібно знати кут між векторами \dot{E} і \dot{U}_2 . Для його визначення використана схема досліду, у якій нейтральний вивід обмотки НН був електрично з'єднаний з виводом обмотки ВН, відносно якого визначалися модулі опорів Z_1 і Z_2 . До другого виводу обмотки НН під'єднаний вольтметр PV1, який вимірює модуль U_1 суми векторів $\dot{E} + \dot{U}_2$. Використовуючи таку схему вимірювання, отримано модулі U_1 , U_2 і E , за допомогою яких з використанням теореми косинусів визначався кут зсуву вектора \dot{U}_2 відносно вектора електрорушійної сили \dot{E} .

З урахуванням одержаних за наведеною методикою кутів зсуву між \dot{E} і \dot{U}_2 були визначені модулі сумарної ЕРС, які діють у частинах обмотки ВН E_{92} та E_8 , E_{47} та E_{53} (для різних варіантів ділення обмотки). За значеннями ЕРС та струмів у частинах обмотки ВН під дією цих ЕРС визначено значення опору частин обмотки (рис. 6).

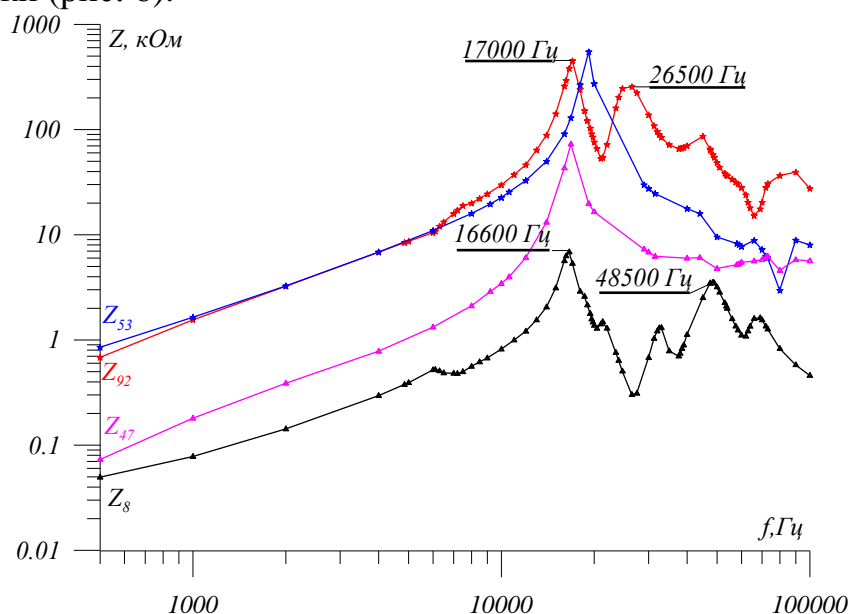


Рис.6. Значення опорів двополіусників частин обмотки ВН Z_1 і Z_2 , для випадку ділення обмотки ВН на частини 92%, 8% і 47%, 53% її довжини.

Запропонований метод дозволяє за даними одного досліду визначити частотні характеристики частин обмотки за рівняннями (1, 2) з врахуванням взаємоіндукції між ними.

Використання запропонованого методу для різних частот прикладеної напруги дозволяє отримати залежність модулів опорів від частоти, що достатньо для подальшого синтезу опорів частин обмотки ВН моделі трансформатора.

У четвертому розділі запропонована методика визначення параметрів лінійних двополюсників за дослідними частотними характеристиками та втрат у трансформаторі за дії внутрішніх перенапруг мережі живлення,

Опори двополюсників, які відтворюють властивості ізоляції трансформатора, мають активно-ємнісний характер. Для синтезу таких двополюсників використана n -ланкова ланцюгова схема, кожна j ланка якої складається з паралельно з'єднаних резистора r_j і конденсатора c_j (рис.7.), що дозволяє врахувати явища електропровідності і поляризації в окремих ділянках ізоляції.

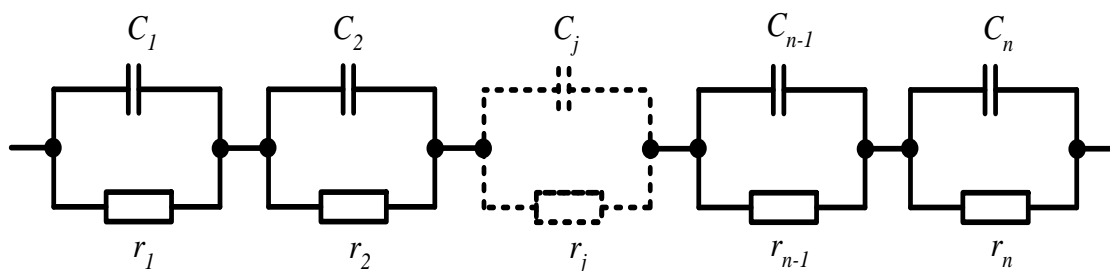


Рис. 7. Схема двополюсників, які відтворюють властивості ізоляції трансформатора

Параметри елементів двополюсника з n ланок визначалися за допомогою оптимізації цільової функції з $2n$ невідомими. Була сформована функція у вигляді суми квадратів відхилених від одиниці відношень модулів опорів моделі до експериментально визначених модулів опору двополюсника для m врахованих точок частотної характеристики двополюсника.

У подальшому синтезовано двополюсники, які відтворювали властивості частин обмотки ВН. Частотні характеристики цих двополюсників мають декілька резонансних частот, на яких вони досягають максимальних чи мінімальних значень. Такі частотні характеристики є складними за формою і апроксимувати їх дуже складно. А синтез за методом послідовного виділення найпростіших складових теж ускладнюється тим, що частотна характеристика має в заданому діапазоні частот широкий діапазон значень опору. Основним і визначальним фактором, який потрібно врахувати під час моделювання, є те, що частини обмотки мають між собою магнітні зв'язки. Моделюючи кожен двополюсник потрібно врахувати його взаємодію з іншими двополюсниками.

На рис.8 представлено схему двополюсника, на базі якої, визначивши її параметри, синтезовані частотні характеристики частин обмотки.

Основна складність під час моделювання частотних характеристик частин обмотки ВН традиційними методами була зумовлена наявністю взаємоіндукції між ними.

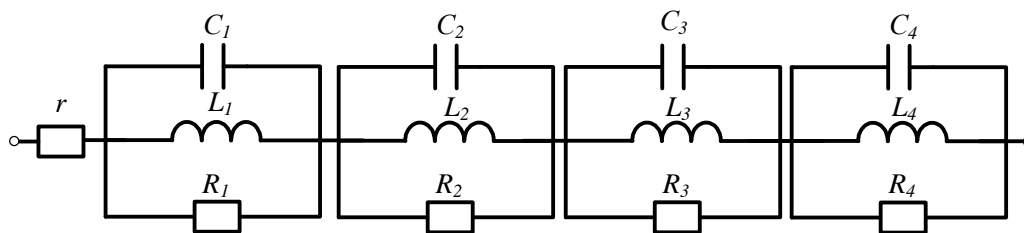


Рис 8 Схема двополюсника для відтворення властивостей частин обмотки ВН

Триобмоткові трансформатори та автотрансформатори, як правило, моделюють трипроменевою заступною схемою. Еквівалентні індуктивності й активні опори обмоток у трипроменевої заступній схемі можуть бути додатними, рівними нулю або від'ємними. Загальноприйняті рекомендації зводяться до того, що замість параметра з від'ємним значенням приймають значення рівне нулю. Такі рекомендації в нашому випадку неприйнятні, оскільки їх дотримання не дозволяє відтворити на моделі реальні процеси в обмотках трансформатора. Єдиним ефективним способом врахувати взаємодію між частинами обмотки, у результаті впливу якої складові загального струму в різних частинах обмотки знаходяться у протифазі, а, відповідно, і складові спадів напруг на частинах обмотки, зумовлені цим струмом, також відрізняються по фазі, є моделювання реактивних опорів однієї частини обмотки з протилежними знаками.

Втрати активної потужності відтворюються резистивні елементами двополюсників, які представляють обмотки трансформатора.

У ході моделювання потрібно також відтворити залежність втрат активної потужності в магнітопроводі від значення напруги.

Обчислення з врахуванням геометричних розмірів магнітопроводу показали, що втрати неробочого режиму трансформатора можна відтворити на моделі увімкненням паралельно до моделі обмоток низької напруги лінійних резисторів.

Зі збільшенням частоти f , прикладеної напруги сталої величини, втрати на гістерезис зменшуються, оскільки обернено пропорційно до частоти зменшується значення амплітуди індукції, а втрати від вихрових струмів залишаються незмінними. Однак відомо, що повні втрати в магнітопроводі, визначені дослідним шляхом, більші від суми втрат на гістерезис та втрат від вихрових струмів на 10 – 50%. Зазвичай, цей надлишок відносять на збільшення втрат від вихрових струмів.

Під час дослідження одночасної дії на трансформатор напруги промислової частоти та внутрішніх перенапруг з мережі живлення, враховано, що напруга промислової частоти, як вимушена складова перенапруг має в розподільних мережах практично незмінне значення. Зазначимо також, що короткочасна дія перенапруг мережі живлення з високою частотою вільних коливань практично не змінює значення параметрів вимушеного режиму. Це означає, що дія внутрішніх перенапруг не збільшує втрати потужності в магнітопроводі, хоч максимальне значення напруги короткочасно зростає в декілька разів. На моделі це можна відтворити за допомогою резисторів з вольт-амперною характеристикою, показаною на рис.9.

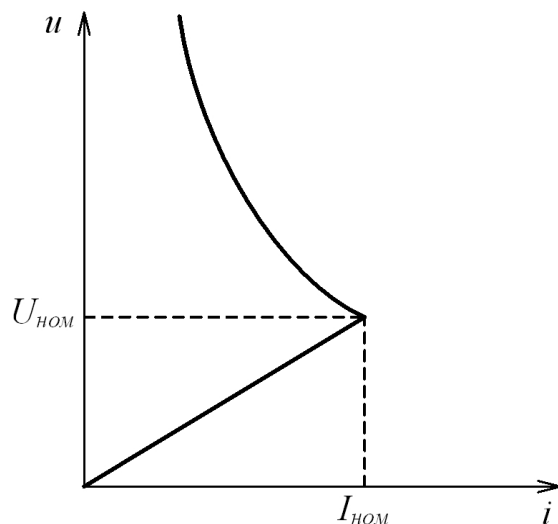


Рис.9. Вольт-амперна характеристика нелінійного резистора, що моделює втрати в магнітопроводі трансформатора.

У п'ятому розділі синтезована модель трансформатора та підтверджена її адекватність за допомогою відтворення на моделі амплітудно-частотних характеристик та відтворення процесів в трансформаторі за дії вільної складової внутрішніх перенапруг мережі.

Для створення моделі пропонується використати підхід «від простого до складного». Процес синтезу моделі відбувається поетапно.

1. Створюється структурна схема моделі електричного обладнання.

2. За стандартною методикою синтезується трифазна нелінійна модель магнітної системи трансформатора для частоти 50 Гц та визначаються кількісні значення параметрів елементів. Ці параметри на подальших етапах синтезу залишаються незмінними.

3. Визначаються параметри лінійних елементів структурної схеми за методами, наведеними в розділі 3.

4. Моделюються частотні характеристики елементів структурної схеми та втрати в трансформаторі за методикою, представленою в розділі 4.

5. Перевіряється адекватність змодельованих двополюсників структурної схеми трансформатора за частотними характеристиками.

6. Перевіряється адекватність моделі за амплітудно-частотними та за енергетичними характеристиками.

Реалізація наведеного алгоритму забезпечує фізичну прозорість моделі та можливість за параметрами дії на окремих елементах моделі прогнозувати реальні дії на відповідні елементи оригіналу.

Адекватність моделі підтверджується шляхом порівняння частотних характеристик оригіналу і моделі.

Для представлення результатів моделювання параметрів та адекватності моделі двополюсників структурної схеми рис.1, для варіанту ділення обмотки ВН на частини 92% і 8% на рис.11 наведені їх частотні характеристики, отримані на моделі та експериментально на оригіналі.

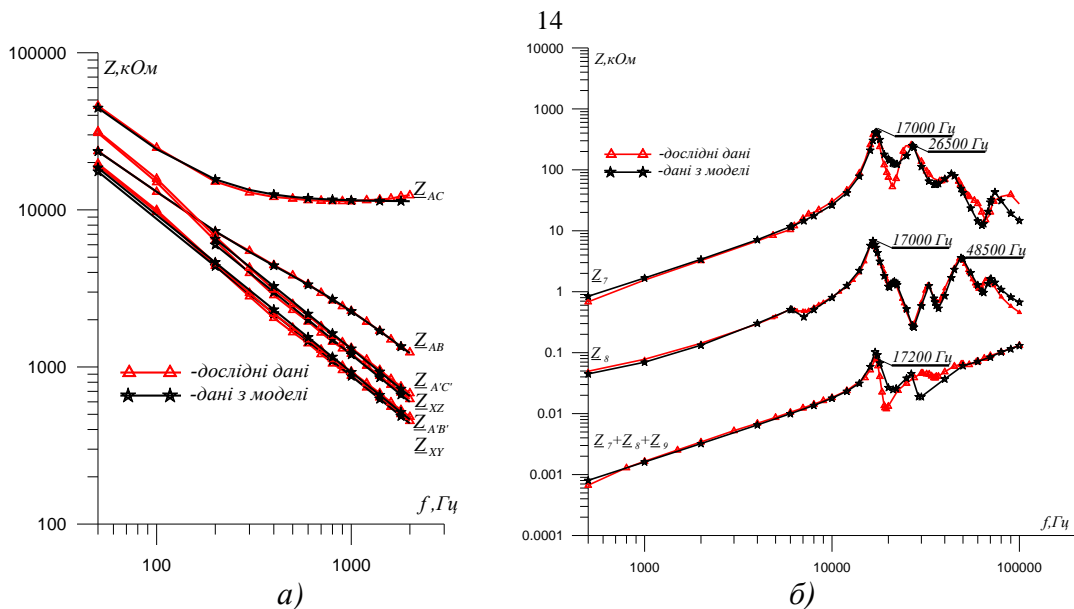


Рис.10. Порівняння частотних характеристик двополіусників ССТ
а) поперечних; б) повздовжніх.

Як видно з рис.10 двополіусники моделі відтворюють характеристики оригіналу з достатньою точністю.

Аналогічно створена модель для варіанту ділення обмотки ВН на частини 47% та 53% довжини обмотки.

Як приклад підтвердження адекватності моделі на рис. 11 наведено порівняння амплітудно-частотних характеристик (U_{nn}^* , U_{92}^* - відношення між значенням напруги на вільних виводах трансформатора по відношення до приведеної напруги, що прикладена до однієї з частин обмотки ВН), отриманих на моделі та об'єкті оригіналі.

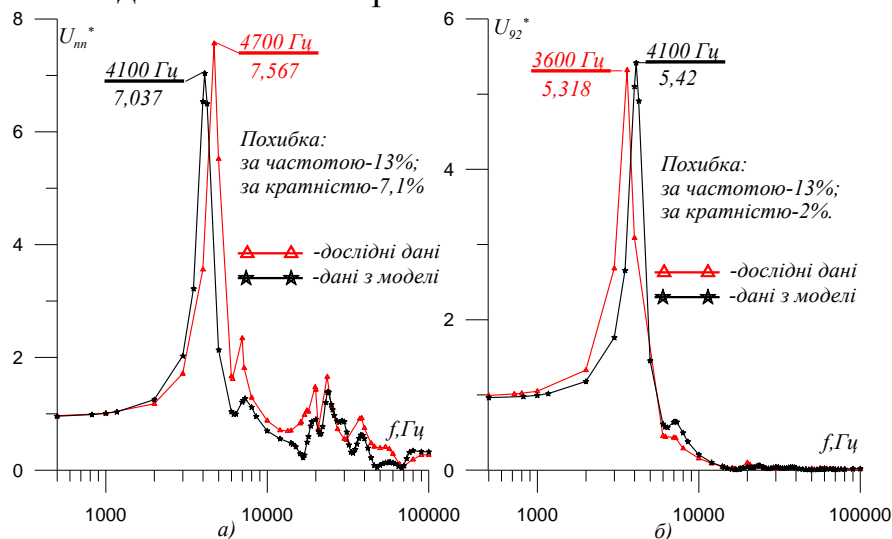


Рис.11 Порівняння амплітудно-частотних характеристик для варіанту ділення обмотки ВН та частини 92% і 8%: а) на виводах обмотки НН; б) на виводах 92% частини обмотки ВН.

Під час порівняння амплітудно-частотних характеристик (відношення значень напруги в нейтралі обмотки ВН до значень напруги, що прикладена до фазних виводів А,В,С ВН у режимі короткого замикання обмотки НН), встановлено, що похибка за частотою становить – 10%, за кратністю – 9% (кратність – відношення значень напруги в нейтралі обмотки ВН до значень

напруги, що прикладена до фазних виводів А,В,С ВН у режимі короткого замикання обмотки НН).

Похибка відтворення амплітудно-частотних характеристик (відношення значень напруги на відпайці 92% обмотки ВН до значень напруги, що прикладена до фазних виводів ВН А,В,С.) становить 8-17% за частотою та 0,4-29,5% - за кратністю.

Адекватність відтворення амплітудно-частотних характеристик моделлю є необхідною, але недостатньою умовою для остаточного висновку. Важливо, на підставі проведення фізичних або математичних дослідів отримати уяву щодо фізичних енергетичних процесів, які відбуваються в трансформаторі за дії на нього внутрішніх перенапруг мережі.

Як приклад реалізації цього на рис.12. показані залежності активної (P_{Σ}) та реактивної (Q_{Σ}) потужності джерела живлення, отримані за фізичними дослідями на трансформаторі (суцільні лінії) та дані P_{Σ} та Q_{Σ} (значками) моделі.

Таким чином отримана модель якісно відтворює електромагнітні процеси, які відбуваються в обмотках трансформатора. Що стосується кількісної сторони процесу, то отримані за допомогою моделі кількісні показники можуть бути використані, як перше наближення для обґрунтування розрахункових параметрів на стадіях проектування, випробування нового обладнання та експлуатації існуючого.

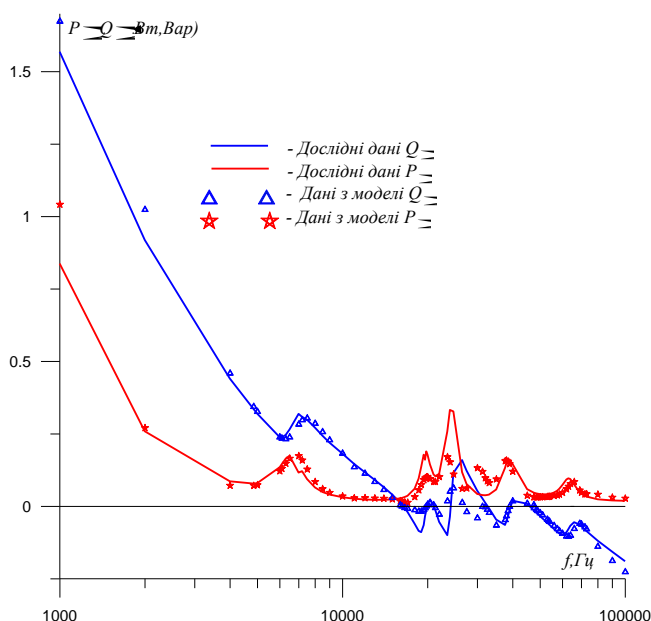


Рис. 12. Складові потужностей джерела живлення для дослідів рис.5.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, що є завершеною науковою працею, на основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена науково-прикладна задача, що полягає в синтезі моделей трифазних трансформаторів, які дозволяють дослідити вплив елементів конструкції на параметри електромагнітних процесів в обмотках ВН за дії внутрішніх перенапруг мережі для оцінки їх впливу на ізоляцію.

1. На основі проведеного аналізу сучасних методів моделювання та існуючих моделей трансформаторів встановлено, що вони не дають змоги дослідити електромагнітні процеси в обмотках трансформаторів за дії внутрішніх перенапруг з врахуванням впливу на них елементів конструкції.

2. На основі проведених досліджень встановлено, що явище внутрішнього резонансу в трансформаторі може виникати в декількох діапазонах частот, а кратності перенапруг на різних частинах обмотки є неоднаковими.

3. Обґрунтована та синтезована структурна схема трифазних трансформаторів, що дозволяє одержати параметри електромагнітних процесів для вибраних точок обмотки високої напруги.

4. Запропоновано метод одержання частотних характеристик окремих частин ізоляції трансформатора, який дозволяє обмежити вплив струмів інших елементів конструкції та спростити синтез двополюсників структурної схеми трансформатора, які відтворюють властивості ізоляції.

5. Розроблено метод експериментального визначення параметрів двополюсників, що відтворюють властивості частин обмотки високої напруги, використовуючи значення електрорушійної сили від основного магнітного потоку і напруг на частинах обмотки високої напруги, що дозволило врахувати взаємодію між частинами обмотки.

6. Синтезовані моделі трифазних трансформаторів дозволяють оцінити кількісні показники електромагнітних процесів в обмотках ВН трансформаторів за дії на них внутрішніх перенапруг мережі.

7. Результати досліджень електромагнітних процесів в обмотках трансформаторів за дії внутрішніх перенапруг з використанням синтезованих моделей дозволять розробити обґрунтовані рекомендації з підвищення надійності роботи трифазних трансформаторів.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Распределение свободной составляющей нулевой последовательности внутренних перенапряжений вдоль обмотки 6-35 кВ соединенной в «звезду» трансформатора распределительной сети при внутреннем резонансе в системе «обмотка –изоляция» / [Никонец Л. А., Бучковский Р. В., Сабат М. Б., Бучковский И. Р.]; // Научно-технический аналитический журнал «Новини енергетики». — К., 7 2010 р. — №7. — С. 38-43.

2. Распределение свободной составляющей нулевой последовательности внутренних перенапряжений вдоль обмотки соединенной в «треугольник» трансформатора или автотрансформатора распределительной сети при внутреннем резонансе в системе «обмотка –изоляция» [Никонец Л. А., Бучковский Р. В., Сабат М. Б., Бучковский И. Р.]; // Научно-технический аналитический журнал «Новини енергетики». — К., 2010 р. — №11. — С. 41-46.

3. Характеристики холостого хода трансформатора для частот свободной составляющей внутренних перенапряжений сети / [Никонец Л. А., Бучковский Р.В., Сабат М.Б., Бучковский И.Р., Венгер Владимир П., Венгер Виктор П.]; // Научно-технический аналитический журнал «Новини енергетики». — К., 2012 р. — №2. — С. 43-48.

4. Частотные характеристики обмотки трансформатора. / [Никонець Л.А., Бучковський Р.В., Бучковський І.Р., Сабат М.Б.]; // Науково-технічний аналітичний журнал «Новини енергетики». — К., 2011 р. — №1. — С. 41-46.

5. Сабат М.Б. Структурна схема моделі трифазного трансформатора для дослідження дії внутрішніх перенапруг мережі // Международное научное издание "Сборник научных трудов SWorld". — Иваново, 2014 р. — Т. 9 "Технические науки". — С. 54-57.

6. Методи визначення параметрів елементів математичної моделі електроустаткування з обмотками високої напруги за дослідними частотними характеристиками. / [Маліновський А. А., Сабат М. Б., Бучковський І. Р., Никонець О. Л., Гуцин Є. Ю.]; // Науково-технічний аналітичний журнал «Новини енергетики». — К., 2011 р. — №5. — С. 34-39.

7. Методи моделювання втрат в трансформаторах за дії внутрішніх перенапруг мережі живлення / [Маліновський А. А., Сабат М. Б., Бучковський І. Р., Никонець О. Л., Гуцин Є. Ю.]; // Науково-технічний аналітичний журнал «Новини енергетики». — К., 2011 р. — №11. — С. 36-43.

8. Метод експериментального определения сопротивлений рассеивания частей обмотки высокого напряжения трансформатора / [Никонець Л.А., Бучковський Р.В., Сабат М.Б., Бучковський І.Р.]; // Науково-технічний аналітичний журнал «Новини енергетики». — К., 2012 р. — №3. — С. 44-48.

9. Никонець Л. А. Распределение воздействующих на трансформатор напряжений вдоль обмотки ВН // [Никонець Л. А., Бучковський І. Р., Бучковський Р.В, Венгер В. П., Венгер В. П., Никонець А. Л., Сабат М. Б.] // Электрические станции. — Москва, 2014 р. — №2. — С. 51-56.

10. Бучковський І.Р., Вплив режиму роботи трансформатора на частотні характеристики обмоток та їх частин./ Бучковський І. Р., Сабат М. Б., Никонець О.Л.; // Вісник НУ «Львівська політехніка» “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. — Львів, 2011 р. — №707. — С. 15-21.

11. Никонець Л. О. Моделювання електромагнітних процесів в обмотках трансформатора за дії внутрішніх перенапруг мережі [Никонець Л.О, Молнар М. М., Сабат М. Б., Бучковський І. Р.] // Дніпропетровськ, Науковий вісник НГУ. — 2014 р. — 5. — С. 58-63.

12. Сабат М. Б. Электромагнитные процессы и условия возникновения резонансных перенапряжений в обмотках трансформатора [Сабат М. Б., Никонець А. Л., Венгер В. П., Венгер В. П.] // Известия Томского политехнического университета. — 2014 р. — Т. 325, 4. — С. 91-102.

13. Никонець Л.О., Математична модель трифазного трансформатора для частоти вільної складової внутрішніх перенапруг мережі/ Никонець Л.О. Бучковський І. Р., Сабат М. Б.; // Вісник НУ «Львівська політехніка» “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. — Львів, 2012 р. — №736. — С. 108-116.

14. Сабат М. Б., Оцінка адекватності математичної моделі трифазного трансформатора для вільних складових внутрішніх перенапруг мережі/ Сабат М.Б., Бучковський І. Р., Никонець О.Л.; // Вісник НУ «Львівська політехніка» “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. — Львів, 2012 р. — №736. — С. 117-123.

15. Сабат М. Б., Перенапруги на поздовжній ізоляції трансформатора за дії струмів короткого замикання/ Сабат М. Б., Бучковський І. Р., Никонець О. Л.; // Науково-технічний аналітичний журнал «Новини енергетики». — К., 2012 р. — №5. — С. 41-48.

16. Електромагнітні процеси в трансформаторах за виткових коротких замикань / [Маліновський А.А., Сабат М. Б., Бучковський І. Р., Никонець О. Л.]; // Науково-технічний аналітичний журнал «Новини енергетики». — К., 2012 р. — №7. — С. 35-42.

17. Никонец Л.А. Электромагнитные процессы при включении трансформатора распределительной сети/ Никонец Л.А., Бучковский И.Р., Сабат М.Б.; // Науково-технічний аналітичний журнал «Новини енергетики». — К., 2012 р. — №8. — С. 41-47.

18. Электромагнитные процессы при отключении трансформатора распределительной сети / [Никонец Л.А., Бучковский И.Р., Сабат М.Б., Никонец О.Л.]; // Науково-технічний аналітичний журнал «Новини енергетики». — К., 2012 р. — №9. — С. 38-48.

19. Молнар М. М., Синтез моделей трансформаторів для дослідження електромагнітних процесів в обмотках ВН / [Молнар М. М., Сабат М. Б., Бучковський І. Р.]// Международное научное издание "Сборник научных трудов SWorld". — Иваново, 2013 р. — Т. 7 "Технические науки". — С. 21-30.

20. Физические явления внутреннего резонанса в электрооборудовании с обмотками высокого напряжения/ [Бучковський І. Р., Молнар М.М., Никонец А. Л., Никонец Л.А., Сабат М. Б.] – Монографія под редакцией д.т.н. проф. Никонца Л.А. — Львов: Друк НВФ «Українські технології», 2012 р. — 166 с.

Анотація

Сабат М. Б. Модель трифазних трансформаторів для дослідження дії внутрішніх перенапруг мережі – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції мережі та системи. Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2015.

У дисертаційній роботі розроблена модель трифазних трансформаторів, яка дозволяє дослідити вплив елементів його конструкції на характер і кількісні значення параметрів електромагнітних процесів у вибраних точках обмоток за дії внутрішніх перенапруг мережі.

Розроблено метод експериментального одержання частотних характеристик частин ізоляції трансформатора, який полягає у примусовому обмеженні впливу струмів інших елементів конструкції введенням додаткових резисторів, що дозволило спростити синтез двополюсників структурної схеми трансформатора, а також метод експериментального визначення параметрів частин обмотки за значеннями електрорушійних сил від основного магнітного потоку на частинах обмотки високої напруги і напруг на цих частинах, що дозволило врахувати взаємодію між ними

Змодельовано втрати активної потужності в трансформаторі за дії внутрішніх перенапруг мережі живлення.

За розробленими методами створено моделі трифазних трансформаторів для дослідження дії внутрішніх перенапруг мереж, які адекватно відтворюють електромагнітні процеси вздовж обмотки ВН трансформатора.

Ключові слова : трансформатор, електромагнітні процеси, внутрішній резонанс, внутрішні перенапруги.

Аннотація

Сабат М. Б. Модель трехфазных трансформаторов для исследования действий внутренних перенапряжений сети. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети та системы. Национальный университет “Львовская политехника” Министерства образования и науки Украины, Львов, 2015.

В диссертационной работе решена научно-практическая проблема создания моделей трехфазных трансформаторов или автотрансформаторов, которые адекватно отображают электромагнитные процессы вдоль обмотки трансформатора.

На основе анализа современных методов моделирования и существующих моделей трансформаторов установлено, что они не дают возможности исследовать электромагнитные процессы в обмотках трансформаторов при действии внутренних перенапряжений сети с учетом влияния на них элементов конструкции. Это не позволяет исследовать явления внутреннего резонанса, которое было установлено экспериментально на нескольких частотах с разной кратностью перенапряжений.

Разработан подход к созданию новых моделей с учетом существующих проблем, которые дадут возможность получить качественные и количественные показатели электромагнитных процессов в обмотках трансформатора при действии на них внутренних перенапряжений сети для разработки обоснованных рекомендаций по повышению надежности работы трехфазных трансформаторов.

Создана структурная схема трехфазных трансформаторов, которая состоит из двухполюсников и позволяет исследовать влияние элементов конструкции на характер и количественные значения параметров электромагнитных процессов в избранных точках обмотки при действии внутренних перенапряжений сети.

Разработан метод экспериментального определения частотных характеристик двухполюсников, которые отображают свойства частей изоляции трансформатора. Метод состоит в принудительном ограничении влияния токов других элементов конструкции введением дополнительных резисторов, что позволило упростить синтез двухполюсников структурной схемы трансформатора.

Предложен метод экспериментального определения параметров двухполюсников, которые отображают свойства частей обмотки высокого напряжения за значениями напряжений на этих частях и электродвижущих сил в них от основного магнитного потока, что позволило учесть взаимную индукцию между частями обмотки.

По полученной на объекте–оригинале зависимости потерь мощности холостого хода и по частотным характеристикам воспроизведены потери активной мощности в магнитопроводе и частях обмотки при действии внутренних перенапряжений сети.

Подтверждена адекватность созданных моделей сравнением экспериментально полученных частотных характеристик каждого двухполюсника модели с полученными в математическом эксперименте, а также сравнением амплитудно-частотных характеристик оригинала и модели.

Ключевые слова: трансформатор, электромагнитные процессы, внутренний резонанс, внутренние перенапряжения.

Abstract

Sabat M. Three-phase transformers model for network internal overvoltage impact studying.–Manuscript

Dissertation for the degree of Ph.D. in Electric power stations, electrical systems and networks (specialty 05.14.02). Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2015.

Creation features of three-phase transformers and autotransformers models, which adequately represent electromagnetic processes along transformer windings are considered in the dissertation.

A model of three-phase transformer as a structure diagram is created. The model consists of single-port networks and allows studying the influence of the construction elements on the character and magnitude of the parameters of electromagnetic processes in certain points of a winding, which is influenced by network internal overvoltages.

A method of experimental determination of frequency characteristics of transformer insulation parts is developed. The method provides a simplified synthesis of single-port networks of the structure diagram by constraining the influence of the current of other construction elements by introducing additional resistors.

A method of experimental determination of winding parts parameters by values of electromotive forces from the main magnetic flux on the high voltage winding parts and determination of voltages on these parts is suggested. The method allows to take mutual inductance between winding parts into consideration.

The losses in the transformer, which is influenced by network internal overvoltages are modelled.

Basing on the justified principles and methods, the models of three-phase transformers, which qualitatively and quantitatively, with high enough for practice level, reproduce the electromagnetic processes in windings and insulation when the transformer is under the influence of overvoltages are synthesized.

Keywords: transformer, electromagnetic processes, internal resonance, internal overvoltage.