

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Удосконалення режимів роботи та захисту трансформаторів струму за умов
обриву вторинних кіл
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ДЕА-Е23мг
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Олександр ВИННИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Костянтин БРОВКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Ганна ГРІНЧЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

К.Т.Н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу вищої освіти Олександр ВИННИКУ

1. Тема «Удосконалення режимів роботи та захисту трансформаторів струму за умов обриву вторинних кіл»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Характеристика намагнічування магнітного матеріалу осердя; Усереднені характеристики намагнічування стрічкових осердь; Розрахункова схема двообмоткового трансформатора струму; Електрична принципова та розрахункова схема каскадного двоступеневого трансформатора струму

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДАВАЧІВ СТРУМУ ПРИЄДНАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПРОМИСЛОВОЇ ЧАСТОТИ; РОЗДІЛ 2. МЕТОД ОЦІНКИ МАКСИМАЛЬНОЇ АМПЛІТУДИ УСТАЛЕНОЇ НАПРУГИ НА РОЗІМКНЕНИХ ВИВОДАХ ВТОРИННОЇ ОБМОТКИ ОДНОСТУПЕНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ; ВИСНОВКИ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024р

Керівник

(підпис)

Костянтин БРОВКО

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Олександр ВИННИК

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Олександр ВИННИК

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – ____ ; рисунків – ____ ; таблиць – ____ ;

літературних джерел – ____ .

Робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі аналізу режимів роботи трансформаторів струму за аварійного розмикання їх вторинних кіл та розробки системи захисту трансформаторів струму від таких режимів, що сприятиме надійності функціонування електричних систем.

Розглянуто конструкції, технічні характеристики трансформаторів струму з замкнутим магнітопроводом, особливості режимів роботи цих трансформаторів у сучасних мережах 6 – 750 кВ промислової частоти за розімкнутих кіл їх вторинних обмоток.

У роботі вдосконалено математичну модель для дослідження перехідних процесів під час обриву вторинних кіл трансформаторів струму шляхом застосування керованого активного опору в модельованому контурі комутації, що дало змогу дослідити вплив швидкості зміни струму у вторинному колі трансформатора струму на величини перенапруг.

Запропоновано систему захисту від перенапруг за обриву вторинних кіл трансформаторів струму, розглянуто основні вимоги до цієї системи та проведені натурними експериментами і комп'ютерним моделюванням режимів роботи системи захисту на прикладі ТС типу ТЛМ-10 (з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 в якості обмежувача перенапруг) підтверджено ефективність її роботи та обмеження вторинних перенапруг до допустимих значень.

Проведеними дослідженнями показана доцільність використання додаткового швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки трансформаторів струму за обриву їх вторинних кіл.

Встановлена адекватність відтворення цифровими комплексами режимів роботи системи захисту та підготовлено технічне завдання на виготовлення промислового дослідного взірця пристрою захисту, визначено підстанцію, на якій він буде встановлений у дослідно-промислову експлуатацію.

Ключові слова: трансформатор струму, аварійний режим, обрив вторинного кола, розрахункові схеми, високовольтний імпульс напруги, перенапруга, система захисту, пробивний запобіжник.

ABSTRACT

Pages of text – ____ ; pictures – ____ ; tables – ____ ;

literary sources – ____ .

The thesis is devoted to solving of the scientific and technical problem, which is concerned with an analysis of operation modes of current transformers after the emergency disconnection of their secondary circuits and a designing of a protection system of current transformers against such modes, that will promote the reliability of the operation of electrical systems.

The designs, technical characteristics of current transformers with a closed magnetic core, features of operation modes of these transformers in modern electrical networks 6 – 750 kV of industrial frequency after disconnection of their secondary circuits are considered.

The mathematical model for the investigation of transients after disconnection of secondary circuits of current transformers was improved by applying a controlled resistance in the simulated secondary circuit, which made it possible to investigate the impact of the velocity of current change in the secondary circuit of current transformer on the values of overvoltages.

The protection system against overvoltages after disconnection of secondary circuits of current transformers is proposed, the basic requirements for this system are considered. The efficiency of protection system operation and a limitation of overvoltages to values no more than 1000 V is confirmed by using experiments and computer simulation of operation modes of protection system for example with the current transformer type TLM-10 (by using the fuse type PP-A/3 as a surge protector).

The expediency of using additional fast shunting of secondary winding of current transformers by contacts of an electromechanical relay after disconnection of their secondary circuits is shown by research.

The adequacy of the digital system simulation of operation modes of the protection system has been determined and a technical specification for the production of an industrial prototype of the protection device has been prepared, a substation has been defined, where it will be installed for experimental and industrial operation.

Keywords: current transformer, emergency mode, disconnection of the secondary circuit, calculation schemes, high-voltage pulse, overvoltage, protection system, fuse.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	
ВСТУП	
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТА ЗАХИСТУ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ.....	
1.1 Вимірювальні трансформатори струму: призначення, типи, принцип роботи.....	
1.2 Моделювання перехідних процесів в трансформаторах струму...	
1.3 Модель кидка струму намагнічування однофазного трансформатора	
1.4 Моделювання кидка струму намагнічування трифазних силових трансформаторів.....	
1.5 Моделювання зовнішніх і внутрішніх коротких замикань.....	
1.6 Модель групи трансформаторів струму.....	
1.7 Оцінка адекватності моделі трансформатора.....	
Висновки до розділу 1.....	
РОЗДІЛ 2. КОНТРОЛЬ ЦІЛОСТІ ВТОРИННИХ КІЛ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ У МЕРЕЖАХ 0,4 ... 10 КВ	
2.1 Розробка методу контролю цілості вторинних кіл трансформаторів струму у мережах 0,4 ... 10 кВ.....	
2.2 Розробка схеми контролю цілості вторинних ланцюгів трансформаторів струму.....	
Висновки до розділу 2.....	
РОЗДІЛ 3. МЕТОД ОЦІНКИ МАКСИМАЛЬНОЇ АМПЛІТУДИ УСТАЛЕНОЇ НАПРУГИ НА РОЗІМКНЕНИХ ВИВОДАХ ВТОРИННОЇ ОБМОТКИ ОДНОСТУПЕНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ.....	
3.1 Спрощена розрахункова схема одноступеневого трансформатора струму за розімкнутого вторинного кола.....	
3.2 Потокозчеплення обмоток трансформатора струму та напруга	

	на розімкнених виводах його вторинної обмотки за протікання синуsoїдного первинного струму.....
3.3	Метод оцінки максимальної амплітуди напруги на розімкнених затискачах вторинної обмотки трансформатора струму за протікання синуsoїдного первинного струму.....
	Висновки до розділу 3.....
	ВИСНОВКИ.....
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ТС – трансформатор струму;

РЗА - релейний захист та автоматика;

ЕРС – електрорушійна сила;

КРЗ – комплектна розподільна злагода;

МРС – магніторушійна сила;

ТСНП – трансформатор струму нульової послідовності;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ПХН – прямокутна характеристика намагнічування;

КЗ – коротке замикання

ОП – обмежувач перенапруг;

ОТС – оптико-електронний трансформатор струму;

ЕЕС – електроенергетична система;

ВБАХ – вебер-амперна характеристика;

КАО – керований активний опір;

ВН – висока напруга;

НН – низька напруга;

СЗ – система захисту;

ПШС – пристрій шунтування-сигналізації;

РПН – регулювання під навантаженням;

ЕБ – електронний блок;

БЕР – блок електромеханічних реле.

ВСТУП

Сучасна електроенергетична система (ЕЕС) України містить широко розгалужені електричні мережі номінальних класів напруг 0,4 – 750 кВ систем генерації, пересилання, розподілу та споживання електричної енергії. Керування технологічними режимами таких систем забезпечується застосуванням ефективних та надійних автоматизованих систем управління і неперервного контролю параметрів режимів роботи електричних мереж, використанням пристроїв релейного захисту й автоматики (РЗА), зокрема, широко розповсюджених мікропроцесорних систем, які поєднують у собі функції керування, моніторингу стану та захисту електроустановок енергосистеми.

Електроустановки повинні виконувати задані функції у всіх нормальних (неаварійних) режимах роботи та забезпечувати неперервне живлення споживачів електричною енергією з визначеними параметрами її якості і безпечну експлуатацію електрообладнання обслуговуючим персоналом.

Трансформатори струму (ТС) у складі систем генерації, розподілу та споживання електричної енергії є важливою ланкою їх кіл вимірювання, РЗА, керування тощо, оскільки забезпечують дані пристрої відповідною вхідною інформацією. Їм доводиться працювати як за усталених, так і перехідних режимів роботи електричних мереж, що характеризуються відповідними особливостями протікання електромагнітних процесів. Також ТС виконують важливі функції відокремлення високовольтних первинних кіл від низьковольтних вторинних.

Обрив вторинних кіл ТС є аварійним режимом роботи ТС. За такого режиму на розімкнених виводах вторинних обмоток ТС виникають високовольтні імпульси напруги, небезпечні для обладнання вторинних кіл і, насамперед, для обслуговуючого персоналу електроустановок. Також зростають втрати активної потужності у магнітопроводі ТС, що призводить

до перегрівання його осердя і у кінцевому випадку – пошкодження ізоляції осердя та ізоляції обмоток трансформатора.

Актуальність. Враховуючи відсутність у відомих публікаціях ґрунтовних досліджень режимів роботи ТС за обриву кіл, під'єднаних до вторинних обмоток цих трансформаторів, а також практичну відсутність пристроїв захисту від перенапруг, що виникають за таких режимів, досліджувана проблема є актуальною. Як вказують доступні джерела інформації, пошкодження ТС та обладнання їх вторинних кіл, а також ураження персоналу в діючих електроустановках від дії перенапруг, що виникають під час обриву вторинних кіл ТС, на жаль, продовжуються.

Метою роботи є дослідження режимів роботи та створення захисту ТС електричних мереж від перенапруг за обривів вторинних кіл ТС.

Виконання поставленого завдання передбачає розв'язання наступних задач:

1. Аналіз публікацій щодо досліджень режимів ТС та захисту їх від перенапруг під час обривів вторинних кіл ТС.
2. Отримання аналітичних виразів для розрахунку параметрів координат усталеного режиму роботи ТС за обриву його вторинного кола під час протікання у первинній обмотці ТС синусоїдного струму.
3. Розробка методологічних основ побудови структурних схем захисту ТС та їх вторинних кіл від перенапруг.
4. Розробка системи захисту (СЗ) від перенапруг ТС за обриву вторинних кіл та проведення досліджень з метою обґрунтування необхідності додаткового швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки ТС під час розмикання вторинного кола ТС.
5. Підтвердження проведеними дослідженнями ефективності запропонованої СЗ і обмеження перенапруг до рівня спрацювання обмежувача перенапруг (ОПН) – пробивного запобіжника типу ПП-А/3 (не більше 1000 В).

Об'єктом дослідження є процеси в електричних мережах з вимірювальними трансформаторами струму.

Предметом дослідження є усталені та перехідні режими роботи трансформаторів струму за обривів їх вторинних кіл, способи та методи їх захисту.

Методи дослідження. В основу досліджень покладено методи теорії лінійних і нелінійних кіл, чисельні методи інтегрування диференціальних рівнянь з використанням методів комп'ютерного симулювання, натурного експерименту та дослідження процесів у діючих електроустановках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТА ЗАХИСТУ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

1.1 Вимірювальні трансформатори струму: призначення, типи, принцип роботи

Вимірювальний трансформатор струму – це спеціальний прилад вузького спрямування, який призначений для вимірювання змінного струму і його контролю. Найчастіше застосовується в системах релейного захисту (автоматики) і вимірювальних приладів. Його використання необхідно тоді, коли безпосереднє приєднання приладу для виміру, до електричної мережі зі змінною напругою неможливо або небезпечно для персоналу обслуговуючого його. А також для організації гальванічної розв'язки первинних силових ланцюгів від вимірювальних. Розрахунок і вибір вимірювального трансформатора струму виконується таким чином, щоб зміни форми сигналу були зведені до нуля, а вплив на силове контрольоване коло був мінімальним.

Головна функція цього вимірювального приладу – це відображення змін струму, максимально пропорційно. Трансформатори струму гарантують повну безпеку вимірювань, відокремлюючи вимірювальні ланцюги від первинних з небезпечною високим напругою, яка найчастіше складає тисячі вольт. Вимоги, що пред'являються до їх класу точності дуже великі, так як від цього залежить робота дорогого потужного обладнання.

Трансформатори вимірювальні випускають з двома і більше групами вторинних обмоток. Перша застосовується для включення пристроїв релейного захисту та сигналізації. А інша, з великим класом точності, для підключення пристроїв точного вимірювання та обліку. Вони поміщені на спеціально виготовлений феромагнітний сердечник, який набраний з листів спеціальної електротехнічної сталі досить тонкої товщини. Первинну обмотку безпосередньо включають послідовно в вимірювану мережу, а до

вторинної обмотки підключають котушки різних вимірювальних приладів, найчастіше амперметрів і лічильників електроенергії.

У трансформаторах струму, як і в більшій кількості інших таких електромагнітних пристроїв, величина первинного струму більше, ніж вторинного. Первинна обмотка з дроту різного перетину або ж шини, в залежності від номінального значення струму. У трансформаторах струму 500 А і вище, первинна обмотка найчастіше виконана з 1-го єдиного витка. Він може бути у вигляді прямої шини з міді або алюмінію, яка проходить через спеціальне вікно сердечника. Коректність вимірювань будь-якого вимірювального трансформатора характеризується похибкою значення коефіцієнта трансформації. Для того щоб не переплутати кінці, на них обов'язково наноситься маркування.

Аварійна робота, пов'язана з обривом у вторинному ланцюзі ТС при включеній в ланцюг первинної, це призводить до дуже сильного намагнічування сердечника і навіть при обриві вторинної обмотки. Тому при включенні без навантаження вторинні обмотки з'єднуються накоротко. По класу точності все вимірювальні ТС розділені на кілька рівнів. Особливо точні, називаються лабораторні і мають класи точності не більш 0,01-0,05.

Вимірювальні струмові трансформатори випускаються різних типів. Всі вони мають одне і те ж призначення, але відрізняються складовими елементами і принципом дії. Кожний різновид застосовується для досягнення певних цілей, що дозволяє вибирати оптимальний варіант для кожного випадку.

По конструкції і виконання трансформатори струму, які використовуються в вимірювальних ланцюгах діляться на:

Котушкові. Цей вид вимірювальних трансформаторів вважається найбільш простим по конструкції. Свою популярність він придбав ще в радянські часи, коли не було більш якісних та ефективних пристроїв. Такі трансформатори мають невеликі розміри і прийнятну ціну, яка обумовлена можливістю механізації обмотувальних робіт.



Рисунок 1.1 – Котушковий трансформатор струму

Прохідні. Ці пристрої вважаються найбільш часто використовуваними. вони знайшли широке застосування в різних розподільних приладах, розрахованих на напрузі від 6 до 35 кВ. Їх пристрій не відрізняється особливою складністю. Трансформатори цього типу цінуються за те, що дають можливість в закритих розподільчих пристроях заощадити прохідний ізолятор.



Рисунок 1.2 – Прохідний трансформатор струму

Стрижневі. Дані трансформатори часто називають одновитковими. Головна їх особливість – збільшення точності при підвищенні сили струму і зменшення – при зниженні. Вона обумовлена тим, що первинна обмотка тільки один раз проходить через отвір сердечника, що призводить до чисельної рівності кількості ампер-витків і номінального струму.

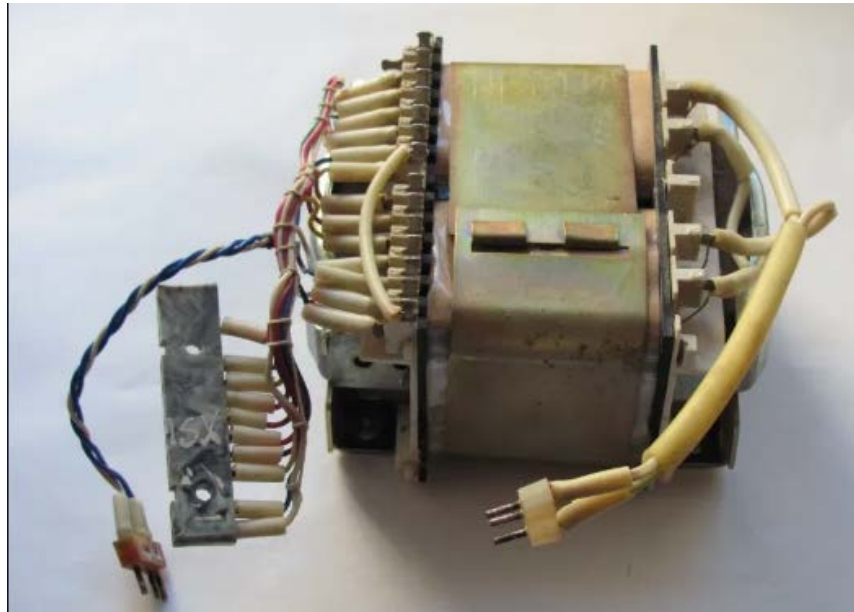


Рисунок 1.3 – Стрижневий трансформатор струму

Шинні трансформатори. Вони являють собою вироби, в конструкцію яких входять сердечники з вторинною обмоткою, а первинна – відсутня. У головній ізоляції приладу передбачено спеціальний отвір, через який пропускається шина розподільного пристрою, що виконує роль первинної обмотки. Цей різновид трансформатора дуже схожий на стрижневий. Лише при малих свідченнях напруги через отвір в осерді прокладають кілька витків провідника, що дає можливість отримати багатовитковому конструкцію приладу.



Рисунок 1.4 – Шинний трансформатор струму

Переносні. Це пристрій електрики називають струмові кліщі. Вони є переносним і зручним вимірювальним трансформатором струму, у якого магнітна система розмикається і замикається вже навколо того дроту в якому і потрібно вимірювати значення струму.



Рисунок 1.5 – Переносний трансформатор струму

При виборі трансформатора струму варто знати головне, що при протіканні по первинній обмотці номінального струму в його вторинній

обмотці, яка замкнута на вимірювальний прилад, буде обов'язково 5 А. Тобто якщо потрібно проводити вимірювання струмових ланцюгів де його розрахункова робоча величина буде приблизно дорівнювати 200 А. Значить, при установці вимірювального трансформатора 200/5, прилад буде постійно показувати верхні бокові межі вимірювання, це незручно. Потрібно щоб робочі межі були приблизно в середині шкали, тому в цьому конкретному випадку потрібно вибирати трансформатор струму 400/5. Це означає що при 200 А номінального струму обладнання на вторинній обмотці буде 2,5 А і прилад буде показувати цю величину з запасом в бік збільшення або зменшення. Тобто і при змінах в контрольованому колі буде видно наскільки дане електрообладнання вийшло з нормального режиму роботи.

1.2 Моделювання перехідних процесів в трансформаторах струму

Одне з першочергових завдань на шляху підвищення ефективності роботи диференційного захисту ТС – отримання достовірної інформації про характер ПП в струмових ланцюгах ТС і в ланцюгах РЗ.

Найбільш достовірні результати можна отримати шляхом проведення виробничих випробувань електрообладнання. Однак для більшості технічних систем електроенергетики здійснити повноцінні натурні експерименти неможливо через небезпеку пошкодження обладнання та необхідності великих витрат, а також велику ймовірність значного недовідпущення електроенергії споживачам. Будь-які випробування супроводжуються виникненням збурень в енергосистемі, що в ряді випадків може привести до порушення її стійкої роботи. Разом з тим, проведення реальних експериментів є малоефективним заходом, так як умови, що визначають перебіг ПП (залишкова індукція в сердечниках силових і вимірювальних трансформаторів, відмінність характеристик намагнічування їх сердечників, різночасність включення фаз вимикача і т.д.), носять імовірнісний характер. Це призводить до того, що при обмеженому числі дослідів і неможливості

вплинути на всі параметри експерименту найбільш небезпечні ПП можуть бути не виявлені. Проведення досліджень шляхом узагальнення осцилограм, отриманих на діючих об'єктах енергосистеми в реальних аварійних ситуаціях, також важко: доступ до записів у більшості випадків є закритим, а також через те, що обсяг що збирається штатними засобами реєстрації аварійних подій, найчастіше, недостатній для повноцінного аналізу.

Аналітичне дослідження поведінки засобів РЗ в ПП є надзвичайно складним навіть при внесенні ряду припущень. Найбільш результативним підходом до вирішення поставленого завдання є поєднання спрощеного аналітичного дослідження і подальшого моделювання ПП.

Аналітичне дослідження надає можливість виявити області несприятливих режимів з точки зору стійкої роботи засобів РЗ. Все виявлені несприятливі режими в подальшому слід детально розглянути, використовуючи засоби чисельного експерименту на математичних моделях.

Моделювання являє собою процес заміщення об'єкта дослідження деякої його моделлю і проведення досліджень на моделі з метою отримання необхідної інформації про об'єкт. Модель – це фізичний або абстрактний образ реального об'єкта, зручний для проведення досліджень і дозволяє адекватно відображати фізичні властивості і характеристики об'єкта. Математична модель – це сукупність математичних об'єктів і відносин між ними, адекватно відображає фізичні властивості створюваного технологічного об'єкта.

Використання математичних моделей дозволяє проводити контрольовані експерименти, тобто так впливати на параметри моделі, щоб отримувати екстремальні ПП або, навпаки, визначити, за яких умов ПП представляють найменшу небезпеку для порушення стійкості функціонування.

Математичною моделлю даної реальної системи є уявлення групи об'єктів (енергосистема, ТС) в формі сукупностей математичних рівнянь, що описують досліджувані об'єкти з урахуванням прийнятих припущень. При

створенні математичних моделей необхідно використовувати такі програмні пакети для ЕОМ, які мають достатню гнучкість і надають великі можливості для аналізу і обробки результатів. Такими програмними продуктами, що задовольняють вищевказаним вимогам, є MATLAB, Simulink, Power System CAD, Electromagnetic Transients Program і ін. В даній роботі математичне моделювання всіх об'єктів виконується засобами програмних пакетів MATLAB та Simulink.

У більшості інженерних програмних пакетах (включаючи перераховані вище), призначених для моделювання електроенергетичних систем, є моделі ТС, в яких враховується нелінійність характеристики намагнічування і, при необхідності, може бути враховано явище гістерезису і тип магнітопроводу. Однак в зазначених програмних продуктах реалізовані моделі лише найбільш масових конструкцій ТС і не представлені моделі потужних трансформаторів і автотрансформаторів зі складною конфігурацією магнітного і електричного ланцюгів. Більш того, розробники інженерних програмних пакетів з метою збереження комерційної таємниці не в повній мірі публікують деякі особливості моделювання тих чи інших об'єктів електроенергетики, що може вплинути на коректність результатів досліджень. У зв'язку з цим необхідна розробка адекватних засобів, що дозволяють з достатньою точністю моделювати ПП в ланцюгах ТС різної складності.

У даній роботі прийнятий наступний підхід до складання математичних моделей. Спочатку розглядається модель однофазного трансформатора, при розробці якої встановлюються базові принципи моделювання та основні припущення. Далі шляхом ускладнення модельованих систем формуються моделі трифазних ТС різної конфігурації, а також використовуються моделі груп ТС.

1.3 Модель кидка струму намагнічування однофазного трансформатора

Завдання розрахунку перехідних режимів трансформатора полягає в визначенні електричних параметрів режиму його роботи на основі заданих параметрів встановленого обладнання і початкових умов, що впливають на динаміку ПП. Для всіх розглянутих модельованих режимів вихідними даними є параметри електричного і магнітного ланцюга, а також початкові значення параметрів режиму. В результаті розрахунку необхідно визначити зміну в часі струмів в обмотках і магнітних потоків в осерді.

Принципова схема модельованого однофазного трансформатора представлена на рис. 1.6.

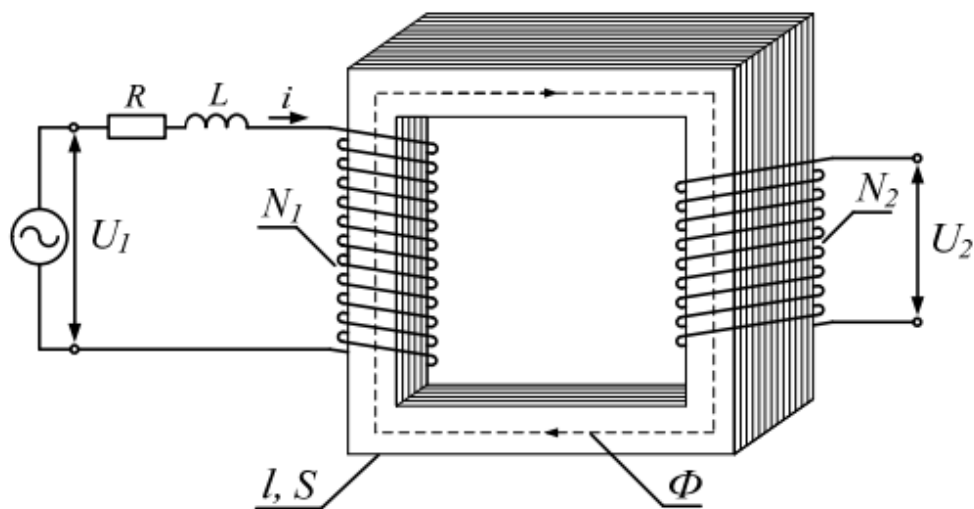


Рисунок 1.6 – Принципова схема однофазного трансформатора на холостому ході (вторинна обмотка розімкнута)

Позначення, прийняті на представленій схемі: U_1 – напруга на джерелі змінної ЕРС; U_2 – напруга на вторинній обмотці; R – еквівалентний активний опір системи і лінії живлення; L – еквівалентна індуктивність системи, лінії живлення і індуктивності, обумовленої потоком розсіювання модельованого трансформатора; l – довжина середньої магнітної лінії; S – площа

поперечного перерізу магнітопроводу; N_1 – число витків первинної обмотки; N_2 – число витків вторинної обмотки; i – струм намагнічування; Φ – магнітний потік, замикається всередині магнітопроводу.

Процес перемагнічування магнітопроводу відбувається по динамічній петлі гістерезису, яка залежить не тільки від матеріалу сердечника і конструктивного виконання, але і від його попереднього стану. Тому строгий математичний опис процесу перемагнічування важкий. Облік впливу явища гістерезису при моделюванні процесів, при яких має місце глибоке насичення сердечників, не виконується, а використовується основна крива намагнічування: при розглянутих глибоких насичених сердечника (максимальна напруженість магнітного поля H_{max} досягає більш $100 H_c$, де H_c – коерцитивна сила матеріалу сердечника) динамічна петля гістерезису настільки вузька, що нею можна знехтувати. У цьому випадку залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля $B = f(H)$ приймається однозначною, тобто розрахунки допустимо виконувати, використовуючи не петлю гістерезису, а основну криву намагнічування. В [18] зазначено, що при включенні ТС на холостий хід максимальна напруженість магнітного поля в магнітопроводі сягає 100000 А/м . Оскільки коерцитивна сила сучасних електротехнічних сталей становить близько 10 А/м , максимальні похибки від неврахування явища гістерезису значно менше 1% . Це є достатньою підставою, щоб при складанні математичної моделі ТС для дослідження процесів при БТН знехтувати неоднозначністю кривої намагнічування. Зважаючи на малу тривалість ПП при включенні ТС також знехтуємо активними втратами в сталі сердечника.

Ємнісні струми між елементами обмоток (витки і котушки) і між обмотками і сердечником трансформатора в звичайних умовах роботи (при частотах $f < 1000 \div 5000 \text{ Гц}$) дуже малі, і ними також можна знехтувати [19].

Застосовуючи другий закон Кірхгофа і закон повного струму для трансформатора, представленого на рис. 1.6, отримуємо систему рівнянь, що описує процеси в однофазному трансформаторі:

$$\begin{cases} U_1 = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi}{dt}; \\ \frac{d\Psi}{dt} = \frac{dB}{dt} N_1 S; \\ \oint H dl = N_1 i; \\ B = f(H), \end{cases} \quad (1.1)$$

де U_1 – напруга джерела живлення;

i – струм намагнічування;

R – еквівалентний активний опір системи і лінії живлення;

L – еквівалентна індуктивність системи, лінії живлення і індуктивності, обумовленої потоком розсіювання;

Ψ – потікосцеплення первинної обмотки;

H – напруженість магнітного поля;

di – елемент довжини середньої магнітної лінії сердечника, по якому береться круговий інтеграл;

N_1 – число витків первинної обмотки;

B – магнітна індукція в магнітопроводі;

S – площа поперечного перерізу магнітопроводу.

Для розглянутого магнітного сердечника друге рівняння в системі (1.1) можна записати так:

$$\oint H dl = Hl = iN_1, \quad (1.2)$$

де l – довжина середньої магнітної лінії магнітопроводу.

Уявімо швидкість зміни потіосцеплення $d\Psi / dt$ в наступному вигляді:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{di} \cdot \frac{di}{dt}, \quad (1.3)$$

де величина $d\Psi / di$ є диференціальною індуктивністю L_δ [10]. Оскільки характеристика намагнічування сталі зазвичай представляється як залежність магнітної індукції B в магнітопроводі від напруженості магнітного поля H , то, беручи до уваги, що $\Psi = N_1 B S$, і з огляду на рівняння (1.2), формулу для визначення диференційної індуктивності можна представити в наступному вигляді:

$$\frac{d\Psi}{di} = \frac{N_1^2 S}{l} \cdot \frac{dB}{dH}, \quad (1.4)$$

Обчислення диференційної індуктивності на кожному окремому етапі розрахунку проводиться шляхом чисельного диференціювання характеристики намагнічування.

Оскільки при використанні пакета MATLAB, в якому рішення диференціальних рівнянь здійснюється методами чисельного інтегрування, система рівнянь повинна бути представлена в формі Коші, то необхідно привести систему рівнянь (1.1) в форму Коші з урахуванням залежності (1.4).

У першому рівнянні системи (1.1) переносимо в ліву частину доданок $i \cdot R$, характеризує падіння напруги на активному опорі, а швидкість зміни магнітного потоку в осерді представляємо в формі диференційної індуктивності (1.5-1.6):

$$U - iR = L \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi}{di} \cdot \frac{di}{dt} = (L + L_\delta) \frac{di}{dt}; \quad (1.5)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{U - iR}{L + L_\delta}. \quad (1.6)$$

Замінюючи в першому рівнянні системи (1.1) множник отримуємо швидкість зміни в часі магнітної індукції:

$$U - iR = L \frac{d\Psi}{dt} \cdot \frac{di}{d\Psi} + \frac{d\Psi}{dt} = \frac{LSN}{L_0} \cdot \frac{dB}{dt} + SN \frac{dB}{dt} = \left(\frac{LSN}{L_0} + SN \right) \frac{dB}{dt}; \quad (1.7)$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{U - iR}{\frac{LSN}{L_0} + SN}. \quad (1.8)$$

Рівняння (1.6) і (1.8) є математичної моделлю 1-фазного трансформатора, і рішення цих рівнянь здійснюється чисельною інтеграцією. У теоретичних засадах електротехніки розрахунок ПП за допомогою вирішення відповідних диференціальних рівнянь шляхом їх чисельного інтегрування відомий як «метод послідовних інтервалів» [10], при якому диференціальні рівняння замінюються алгебраїчними рівняннями, що містять збільшення досліджуваних величин за відповідні інтервали часу. У сучасних ЕОМ для інтегрування диференціальних рівнянь застосовують методи Рунге-Кутта, оскільки вони володіють достатньою обчислювальною потужністю для знаходження рішення з необхідною точністю.

При виконанні розрахунків для досягнення необхідної точності рекомендується використовувати характеристики намагнічування, отримані експериментально. При моделюванні прийнято, що магнітний сердечник виконаний з трансформаторної сталі Е330, характеристика намагнічування якої, отримана за експериментальними даними [11, 12], приведена в таблиці 1.1.

Для відтворення ПП в ТС необхідна інформація про значеннях B для будь-якого значення H . Для отримання значень основної кривої намагнічування в кожній точці використана ермітовим кусочно-лінійна інтерполяція, прийнятні результати також дає інтерполяція кубічними сплайнами.

Таблиця 1.1 – Характеристики основної кривої намагнічування електротехнічної сталі Е330

Магнітна індукція B , Тл	0,0	0,4	0,8	1,4	1,5	1,6	1,7
Напруженість магнітного поля H , А / м	0	28	46	100	130	200	800
Магнітна індукція B , Тл	1,85	1,9	1,95	2,0			
Напруженість магнітного поля H , А / м	2500	5000	10000	30000			

Для виконання інтерполяції використовувалися можливості програмного пакету MATLAB. Маючи певні значення B для будь-якого значення H , програма отримує значення dB / dH і L_∂ на кожному кроці розрахунку ПП. Використовуючи більшу кількість експериментальних точок B (H), можна підвищити точність інтерполяції. Використання диференціальної індуктивності, нехтування неоднозначністю характеристики намагнічування і спільне рішення рівнянь (1.6) і (1.8) дозволяє в якості початкової умови задавати залишкову намагніченість осердя B_r . Це пов'язано з тим, що програма, що входить в пакет MATLAB і виконує рішення диференціальних рівнянь, додає збільшення магнітної індукції і струму, отримані на поточному етапі обчислення, до їх початкових значень (в момент часу $t = 0$). При цьому, як випливає з рівнянь (1.6) і (1.8), величина приросту на кожному етапі розрахунків залежить від величини диференціальної індуктивності L_∂ , яка в свою чергу залежить тільки від похідної характеристики намагнічування при поточному значенні магнітної індукції B . Це дозволяє задавати ненульову індукцію при нульовому значенні струму, що дозволяє досліджувати процеси при різних значеннях залишкової індукції в сердечниках.

Облік залишкової індукції можливий тільки при спільному вирішенні рівнянь (1.6) і (1.8). Так, наприклад, можливо, окремо вирішуючи рівняння (1.8), знайти залежність зміни в часі магнітної індукції в магнітопроводі, а потім по кривій намагнічування знайти відповідні струми намагнічування для кожного окремого значення індукції.

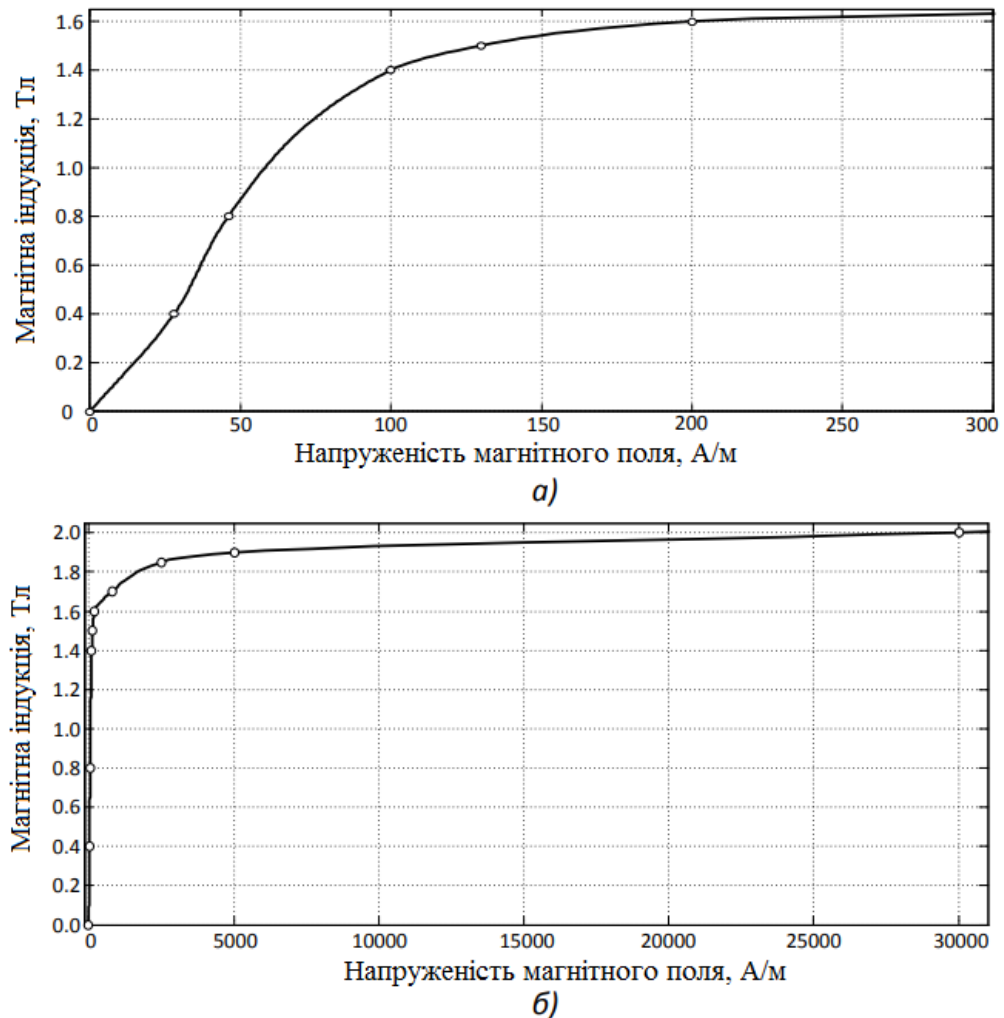


Рисунок 1.7 – Основна крива намагнічування сталі E330, отримана в
внаслідок інтерполяції:

- а) на інтервалі зміни напруженості магнітного поля від 0 до 300 А / м;
- б) на інтервалі зміни напруженості магнітного поля від 0 до 30000 А / м

Але в такому випадку, якщо використовувати звичайну основну характеристику намагнічування, нульове значення струму завжди відповідає

нульовому значенню індукції, а нульове значення B в момент часу $t = 0$ означає, що в ланцюзі протікав струм до включення вимикача.

Можливий також облік залишкової індукції шляхом використання спрямованої характеристики намагнічування, однак це призводить до виникненню помилок в сталих режимах.

1.4 Моделювання кидка струму намагнічування трифазних силових трансформаторів

На базі розглянутих понять і методів моделювання однофазних трансформаторів виконується моделювання більш складних систем 3-фазних ТС. В енергосистемах застосовуються як трифазні три стрижневі ТС, так і групи однофазних ТС, які мають різне виконання магнітопроводів.

Тому завдання математичного моделювання для кожного виду зазначених ТС необхідно розглядати окремо.

Особливістю моделювання тристрижневого трансформатора є складність обліку магнітних потоків Φ_3 , створюваних третіми гармонійними складовими струмів намагнічування. У трансформаторах магнітні потоки нульової послідовності не можуть замикатися всередині магнітопроводу. Магнітні потоки замикаються від одного ярма до іншого через неферомагнітне середовище (трансформаторне масло або повітря), а також через кріпильні деталі і стінки бака трансформатора, що призводить до зменшення величини потоків Φ_3 в порівнянні з трансформаторами інших типів (рисунок 1.8, в). В трифазній групі однофазних трансформаторів або трифазних трансформаторах з сердечником броньового типу потоки Φ_3 замикаються по замкнутому феромагнітному осерддю (рисунок 1.8, а, б).

При моделюванні ця особливість трансформаторів враховується введенням додаткового магнітного опору в схему заміщення магнітного кола (рис. 1.9). На рис. 1.9 прийняті такі позначення: F_A, F_B, F_C – магніторушійні сили в стрижнях фаз А, В і С відповідно; $\Phi_a, \Phi_B, \Phi_C, \Phi_0$ – магнітні потоки в

стрижнях фаз А, В, С і поза сердечником відповідно; R_{mA} , R_{mB} , R_{mC} , R_{m0} – магнітні опори стрижнів фаз А, В, С і поза сердечником відповідно.



Рисунок 1.8 – Шляхи замикання третіх гармонік магнітного потоку в 3-фазних трансформаторах: а) в групі однофазних трансформаторів; б) в трифазному трансформаторі броньового типу; в) в тристержневому трансформаторі

Моделювання груп однофазних трансформаторів є більш простим завданням, оскільки магнітні потоки різних фаз магнітної системи не впливають один на одного.

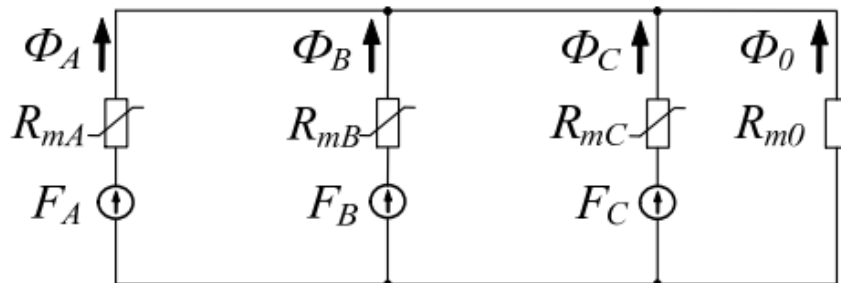


Рисунок 1.9 – Схема заміщення магнітного кола тристержневого трансформатора, в якій враховано проходження магнітного потоку поза магнітопроводом

Для зручності розгляду замість диференціальної індуктивності для вирішення даного завдання вводимо іншу величину. Приймаємо в вираженні для магнітного опору ділянки кола $R_m = \frac{1}{\mu\mu_0 S}$ абсолютну магнітну проникність $\mu\mu_0$ рівну для кожного поточного значення похідної від магнітної індукції B по напруженості магнітного поля в стрижні $\mu\mu_0 = dB / dH$.

Таким чином, вводиться диференціальна абсолютна магнітна, пов'язана з диференціальною індуктивністю і відрізняється від неї постійним коефіцієнтом.

Для визначення магнітного опору потоку розсіювання Φ_0 необхідно використовувати такі параметри, як середня довжина магнітної лінії l і площа поперечного перерізу магнітопроводу S , безпосереднє визначення яких не завжди можливо. Тому величину R_{m0} з метою спрощення розрахунків доцільно задаватися такою постійною величиною, при якій розрахунки на моделі найбільш точно відповідають результатам натурних експериментів [13].

Для чисельного рішення складених систем рівнянь з використанням пакету MATLAB їх необхідно представити в формі Коші. Це можна здійснити, вважаючи невідомими величини, що стоять під знаком похідної.

Тоді одним з методів виключення невідомих (наприклад, методом Жордана-Гаусса) можна представити всі змінні, що описують процеси в досліджуваному трансформаторі, у формі Коші (оскільки для системи диференціальних рівнянь, що містить велику кількість невідомих, ручний рахунок занадто трудомісткий, то для вирішення завдання приведення системи до форми Коші доцільно використовувати символічний процесор, який є в складі пакету MATLAB) [14]. Одержуваний результат цього подання виявляється занадто громіздкий, і тому не наводиться в тексті роботи.

Типовий приклад включення ТС на холостий хід – це включення високовольтної лінії з ненавантаженим ТС на протилежному кінці. При цьому, як правило, необхідно враховувати не тільки взаємну індуктивність між фазами лінії, а й те, що обмотка боку нижчої напруги ТС з'єднана за схемою «трикутник». Навіть при відключеному вторинному навантаженні ланцюг «трикутника» не розмикається, що забезпечує компенсацію магнітних потоків третьої гармоніки. Завдяки цьому магнітні потоки, ЕРС і напруги фаз піддаються меншому спотворенню [19].

При складанні моделі вважаємо, що стержні магнітопроводу А, В і С відповідають однойменній фазі лінії; числа витків обмоток на всіх стрижнях боку ВН однакові і дорівнює W_y , а на стороні НН відповідно число витків дорівнює W_d . На рис. 1.10 приведена схема розглянутого трансформатора, на якій прийняті наступні позначення: e_A, e_B, e_C – еквівалентні фазні ЕРС; R – еквівалентний активний опір системи, лінії живлення і обмоток трансформатора; R_d – активний опір вторинної обмотки, з'єднаної в «Трикутник»; L – сумарна еквівалентна індуктивність розсіювання системи, живильної лінії і ТС; M_c – взаємна індуктивність фаз прилеглої мережі; R_N – активний опір заземлення; W_y – число витків первинної обмотки, з'єднаної в «зірку»; W_d – число витків вторинної обмотки, з'єднаної в «Трикутник».

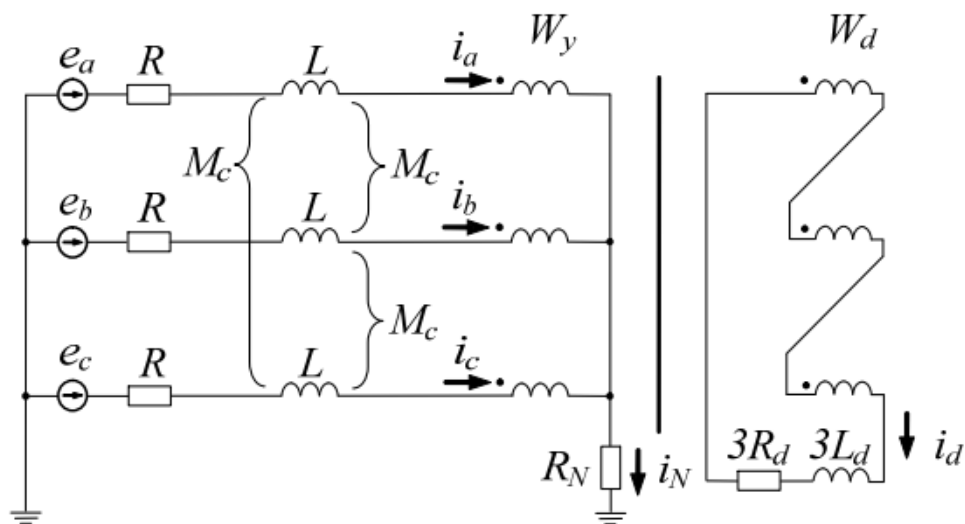


Рисунок 1.10 – Схема заміщення електричних ланцюгів ТС

Складаємо математичну модель для групи однофазних трансформаторів. Система рівнянь електричного кола однакова для будь-яких видів розглянутих ТС:

$$\begin{cases} e_a = i_a R + L \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + W_y \frac{d\Phi_A}{dt} + i_N R_N; \\ e_b = i_b R + L \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + S W_y \frac{d\Phi_B}{dt} + i_N R_N; \\ e_c = i_c R + L \frac{di_c}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + S W_y \frac{d\Phi_C}{dt} + i_N R_N; \\ W_d \left(\frac{d\Phi_A}{dt} + \frac{d\Phi_B}{dt} + \frac{d\Phi_C}{dt} \right) + 3 \cdot i_d R_d + 3 \cdot L_d \frac{di_d}{dt} = 0; \\ i_N = i_a + i_b + i_c. \end{cases} \quad (1.9)$$

Перепишемо систему (1.9), виразивши магнітні потоки в фазах А, В, С (Відповідно Φ_A , Φ_B , Φ_C) через відповідні значення магнітної індукції (B_A , B_B , B_C) в магнітопроводах трансформаторної групи:

$$\begin{cases} e_a = i_a R + L \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + W_y S \frac{dB_A}{dt} + i_N R_N; \\ e_b = i_b R + L \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + W_y S \frac{dB_B}{dt} + i_N R_N; \\ e_c = i_c R + L \frac{di_c}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + W_y S \frac{dB_C}{dt} + i_N R_N; \\ W_d S \frac{dB_A}{dt} + W_d S \frac{dB_B}{dt} + W_d S \frac{dB_C}{dt} + 3 \cdot i_d R_d + 3 \cdot L_d \frac{di_d}{dt} = 0; \\ i_N = i_a + i_b + i_c. \end{cases} \quad (1.10)$$

Для зручності запису переносимо в праву частину всі складові, які не стоять під знаком похідної і виражаємо струм в нейтралі як суму фазних струмів:

$$\begin{cases} e_a - i_a R - (i_a + i_b + i_c) R_N = L \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + W_y S \frac{dB_A}{dt}; \\ e_b - i_b R - (i_a + i_b + i_c) R_N = L \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + W_y S \frac{dB_B}{dt}; \\ e_c - i_c R - (i_a + i_b + i_c) R_N = L \frac{di_c}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + W_y S \frac{dB_C}{dt}; \\ 3 \cdot i_d R_d = -W_d S \frac{dB_A}{dt} - W_d S \frac{dB_B}{dt} - W_d S \frac{dB_C}{dt} - 3 \cdot L_d \frac{di_d}{dt}. \end{cases} \quad (1.11)$$

Система рівнянь для магнітного ланцюга ускладнюється за рахунок наявності струмів в обмотці, з'єднаної в «трикутник». Застосовуючи закони Ома і Кірхгофа для магнітних кіл, виражаємо зв'язок між струмами на різних сторонах трансформатора і магнітними потоками в кожному з трьох магнітопроводів.

Згідно з прийнятими на рис. 2.10 позначенням, магнітні потоки, створювані струмами на стороні ВН і в «трикутнику», підсумовуються, тому:

$$\begin{cases} W_y S \frac{dB_A}{dt} = W_y S \frac{dB_A}{dH_A} \frac{dH_A}{dt} = \mu_{\partial A} W_y S \frac{dH_A}{dt}; \\ W_y S \frac{dB_B}{dt} = W_y S \frac{dB_B}{dH_B} \frac{dH_B}{dt} = \mu_{\partial B} W_y S \frac{dH_B}{dt}; \\ W_y S \frac{dB_C}{dt} = W_y S \frac{dB_C}{dH_C} \frac{dH_C}{dt} = \mu_{\partial C} W_y S \frac{dH_C}{dt}, \end{cases} \quad (1.12)$$

де $\mu_{\partial A}$, $\mu_{\partial B}$, $\mu_{\partial C}$ – диференціальна магнітна проникність магнітопроводів фаз А, В і С; H_A , H_B , H_C – напруженість магнітного поля в магнітопроводах фаз А, В і С.

Застосовуючи закон повного струму і диференціюючи отриманий результат, отримуємо зв'язок між dH_A , dH_B , dH_C і di_A , di_B , di_C , di_d . Згідно з прийнятими на рис 1.10 позначенням і відповідно до особливості конструкції магнітопроводу, магнітні потоки, створювані струмами на стороні ВН і в «трикутнику», підсумовуються, тому:

$$\begin{cases} dH_A = \frac{di_a W_y + di_d W_d}{l_A}; \\ dH_B = \frac{di_b W_y + di_d W_d}{l_B}; \\ dH_C = \frac{di_c W_y + di_d W_d}{l_C}, \end{cases} \quad (1.13)$$

де l_A, l_B, l_C – довжина магнітопроводу однойменної фази.

Підставляючи (1.13) в (1.12), отримуємо:

$$\begin{cases} W_y S \frac{dB_A}{dt} = \frac{\mu_{oA} W_y S}{l_A} \cdot \frac{di_a W_y + di_d W_d}{dt}; \\ W_y S \frac{dB_B}{dt} = \frac{\mu_{oB} W_y S}{l_B} \cdot \frac{di_b W_y + di_d W_d}{dt}; \\ W_y S \frac{dB_C}{dt} = \frac{\mu_{oC} W_y S}{l_C} \cdot \frac{di_c W_y + di_d W_d}{dt}. \end{cases} \quad (1.14)$$

Системи рівнянь (1.11) і (1.14) повністю описують ПП в групі однофазних трансформаторів. Покажемо, що рівняння (1.14) можна отримати, застосовуючи закони Ома і Кірхгофа для магнітних кіл, замінюючи струми, магнітні потоки і індукції їх похідними за часом, а абсолютну магнітну проникність – диферентіальною абсолютною магнітною проникністю. Для цього виразимо зв'язок між струмами на різних сторонах трансформатора і магнітної індукції в кожному з трьох магнітопроводів. Згідно з прийнятими на рис. 1.10 позначенням, магнітні потоки, створювані струмами на стороні ВН і в «трикутнику», повинні підсумовуватися, тому:

$$\begin{cases} W_y \frac{di_a}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_A}{\mu_{\partial A} S} \frac{d\Phi_A}{dt} = \frac{l_A}{\mu_{\partial A}} \frac{dB_A}{dt}; \\ W_y \frac{di_b}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_B}{\mu_{\partial B} S} \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{l_B}{\mu_{\partial B}} \frac{dB_B}{dt}; \\ W_y \frac{di_c}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_C}{\mu_{\partial C} S} \frac{d\Phi_C}{dt} = \frac{l_C}{\mu_{\partial C}} \frac{dB_C}{dt}. \end{cases} \quad (1.15)$$

Значення dB / dt для різних фаз після елементарних перетворень виходять такими ж, як в (1.14), тому в подальшому використовуються закони Ома і Кірхгофа для магнітних кіл при визначенні зв'язків між струмами і магнітній індукції в магнітопроводах. Розглянемо модель для ТС. Як говорилося вище, система рівнянь електричного кола однакова для будь-яких виконань магнітопроводів ТС (див. систему рівнянь (1.11)). Схема заміщення магнітного ланцюга трансформатора наведена на рис 1.11, б. система рівнянь, що описує магнітний ланцюг трансформатора:

$$\begin{cases} W_y \frac{di_a}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_A}{\mu_{\partial A}} \frac{dB_A}{dt} - R_{m0} \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ W_y \frac{di_b}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_B}{\mu_{\partial B}} \frac{dB_B}{dt} - R_{m0} \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ W_y \frac{di_c}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_C}{\mu_{\partial C}} \frac{dB_C}{dt} - R_{m0} \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ S \frac{dB_A}{dt} + S \frac{dB_B}{dt} + S \frac{dB_C}{dt} + \frac{d\Phi_0}{dt} = 0. \end{cases} \quad (1.16)$$

Системи (1.11) і (1.16) дозволяють досліджувати перехідні процеси в трифазному ТС.

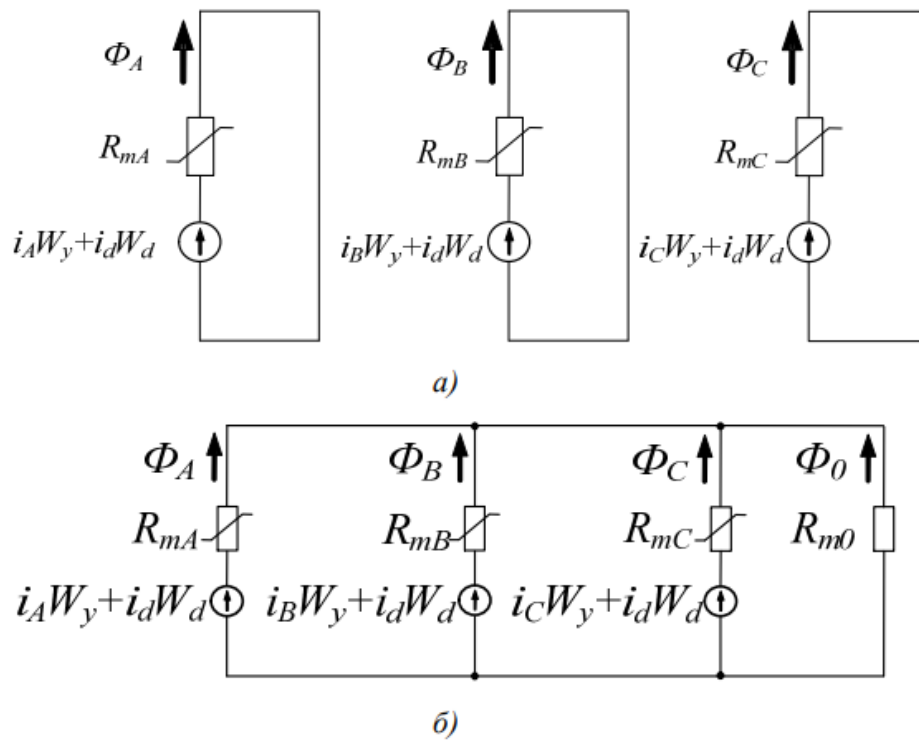


Рисунок 1.11 – Схема заміщення магнітної системи трифазного трансформатора при наявності обмотки, з'єднаної в «трикутник»: а) групи однофазних трансформаторів; б) тристержневого трансформатора

1.5 Моделювання зовнішніх і внутрішніх коротких замикань

При моделюванні зовнішніх і внутрішніх КЗ можна нехтувати нелінійністю гілки намагнічування в схемі заміщення ТС. Тому завдання моделювання ПП в цих режимах істотно об'єднується. У зв'язку з цим доцільно використовувати засоби моделювання, доступні в більшості інженерних програмних пакетів. Моделювання зовнішніх і внутрішніх КЗ виконано в програмному пакеті Simulink, структурна схема моделі представлена на рис. 1.12. Модель трансформатора виконана за допомогою елемента Three-Phase Transformer (Two Windings), синхронний генератор і енергосистема – за допомогою елементів Three-Phase Source. При моделюванні зовнішніх КЗ поза зоною захисту ТС використані блоки «Аварія 1» і «Аварія 4», для моделювання КЗ всередині зони – блоки «Аварія 2» і «Аварія 3» (елементи «Three-Phase Fault»), визначення струмів,

протікають від енергосистеми і від генератора, виробляється відповідно з допомогою вимірювальних блоків «M1» і «M2» (елементи «Three-Phase VI Measurement»), підключених до елементів типу Scope.

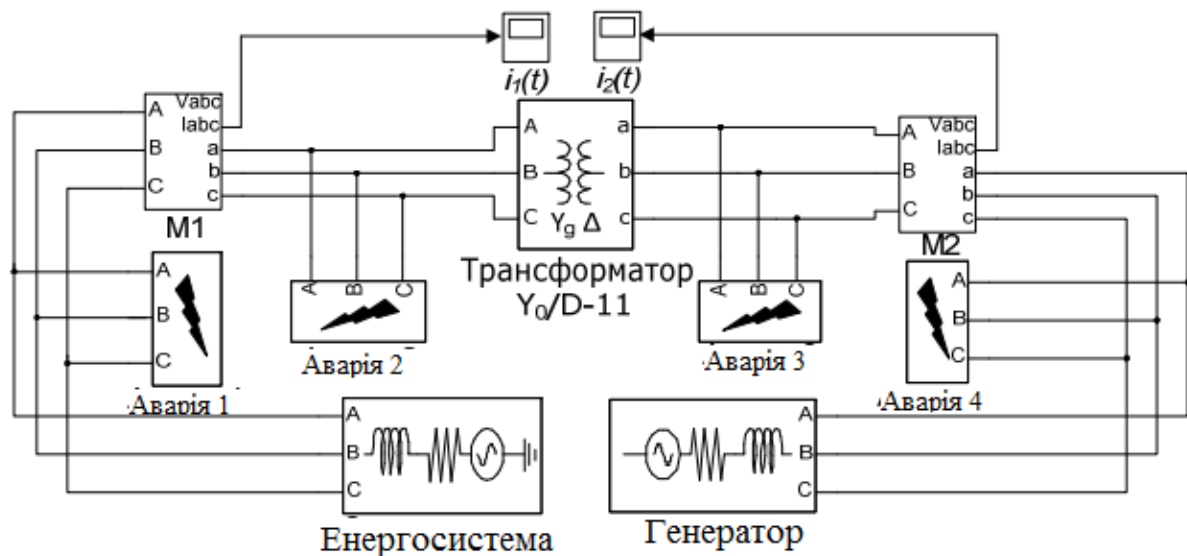


Рисунок 1.12 – Структурна схема математичної моделі в програмному пакеті Simulink для завдання режимів зовнішніх і внутрішніх КЗ

1.6 Модель групи трансформаторів струму

Однією з особливостей виконання ДЗ на мікропроцесорній елементній базі є відсутність загального навантаження на групи ТС, що формують плечі захисту. Вимірювальні ТС, розташовані на сторонах суміжних напруг (незалежно від групи з'єднань обмоток останнього), можуть бути з'єднані за однаковою схемою, а диференційний струм, компенсація $3I_0$ і фазовий зсув сигналів при цьому здійснюються програмним шляхом в пристрої захисту [15]. На практиці застосовують включення ТС як за схемою «Повної зірки», так і за схемою «трикутника» [14]. зазначені особливості необхідно враховувати при складанні математичної моделі груп ТС. Для аналізу ПП в ланцюгах ДЗ використовується математична модель групи ТС.

На рис. 1.14 і 1.15 приведені електричні схеми заміщення групи ТС, з'єднаних відповідно за схемою «повна зірка» і «трикутник», із зазначенням

позитивних напрямків струмів. Характеристики намагнічування сталі магнітопроводів враховані за допомогою нелінійних індуктивних опорів гілок намагнічування.

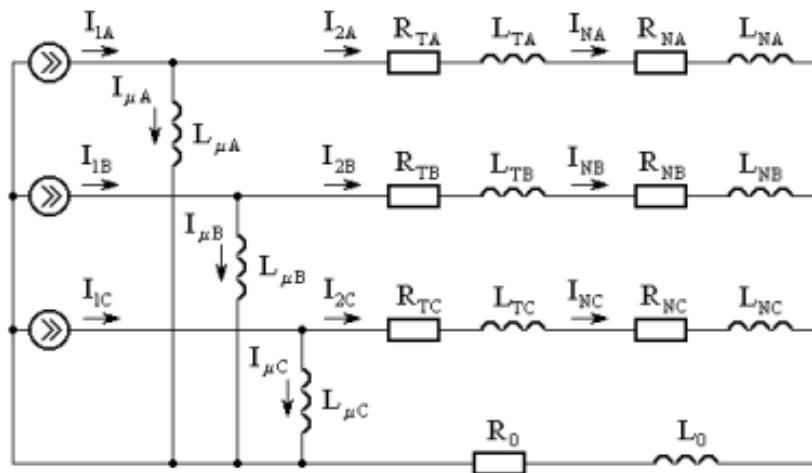


Рисунок 1.14 – Схема заміщення електричного кола групи ТС, з'єднаної з схемою «повна зірка»

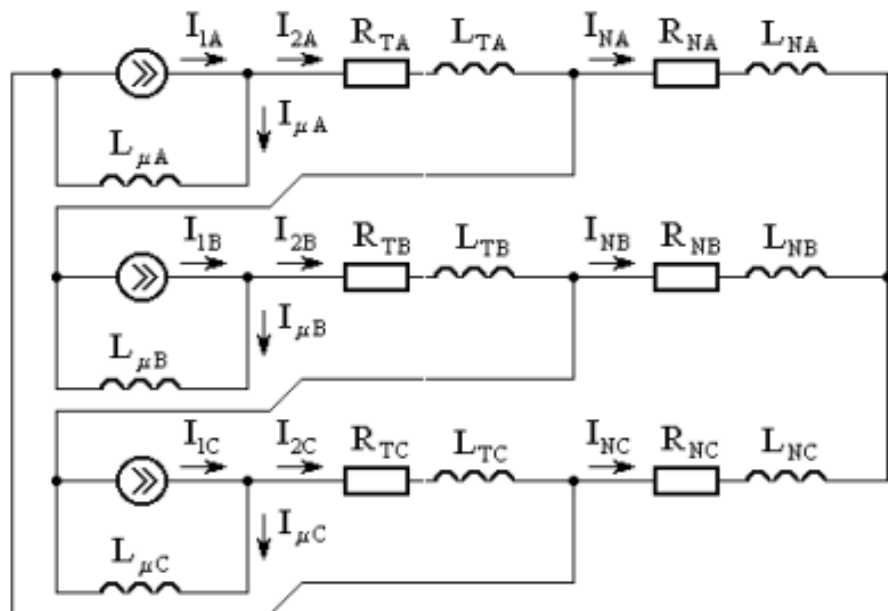


Рисунок 1.15 – Схема заміщення електричного кола групи ТС, з'єднаної з схемою «трикутник»

Позначення, прийняті на обох схемах: I_{1j} – первинний струм ТС, наведений до вторинної сторони; $I_{\mu j}$ – струм намагнічування ТС; I_{2j} –

вторинний струм ТС; R_{Tj} – активний опір вторинної обмотки ТС; L_{Tj} – індуктивність вторинної обмотки ТС; R_{Nj} – активний опір навантаження фази; L_{Nj} – індуктивність навантаження фази; R_0 – активний опір в нульовому проводі; L_0 – індуктивність в нульовому проводі; $j = A, B, C$.

1.7 Оцінка адекватності моделі трансформатора

Розрахунок чисельних параметрів моделей

Наступним важливим етапом моделювання є визначення чисельних значень параметрів електричних і магнітних кіл складених моделей.

Визначення чисельних значень параметрів деяких моделей не викликає ускладнень. Так, чисельні значення параметрів моделі групи ТС визначені за довідковими даними [19].

Характеристика намагнічування сталі магнітопроводів силових і вимірювальних трансформаторів прийнята відповідної однойменної характеристики, наведеної на рис 1.8.

У довідковій літературі відсутні дані по електричних параметрам обмоток ВН і НН трифазних ТС, які необхідні для визначення параметрів, необхідних для моделювання БТН, тому слід визначати їх безпосередньо за доступними довідковим або паспортним даними моделюємого обладнання.

На рис. 1.16 зображена осцилограма струмів включення однофазного трансформатора [11, 16]. На рис. 1.17 наведена осцилограма струму включення однофазного трансформатора, отримана в результаті рішення рівнянь ПП чисельними методами.

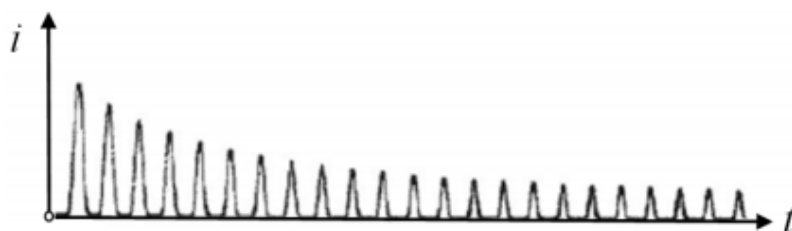


Рисунок 1.16 – Осцилограма струму в однофазному трансформаторі

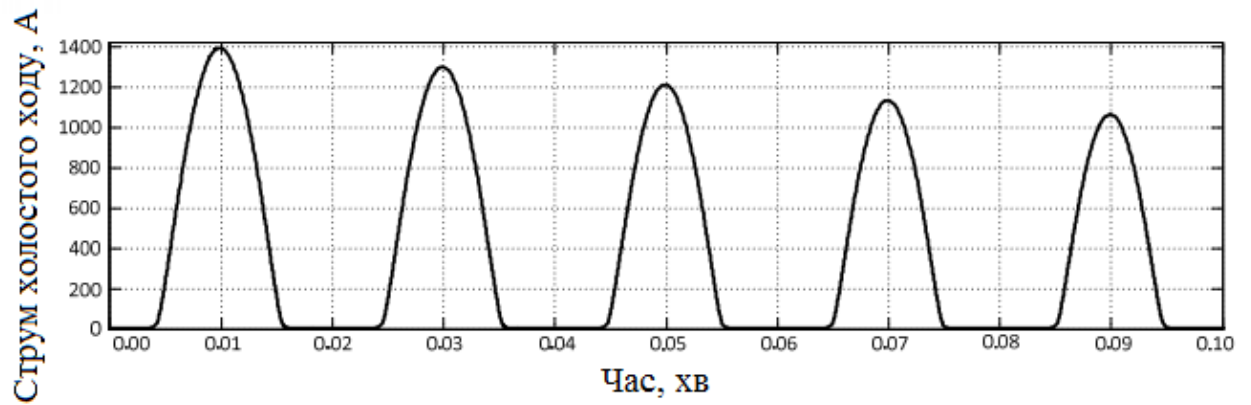


Рисунок 1.17 – Осцилограма струму включення однофазного трансформатора, отримана в результаті чисельного інтегрування системи рівнянь ПП в однофазному трансформаторі

Як видно з рис. 1.17, отриманий струм збігається формою з характерним струмом включення однофазного трансформатора, наведеним на рис 1.16.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

1. Розроблено математичну модель трифазних ТС, яка враховує особливості конструкції їх магнітної системи і забезпечує можливість моделювання БТН і КЗ, виконаний розрахунок чисельних параметрів моделі.

2. Показано, що модель з високою точністю відтворює ПП при включенні ТС під напругу. Це, в свою чергу, дозволяє використовувати розроблену модель з метою визначення уставок РЗ і поглибленого дослідження ПП в струмових ланцюгах релейного захисту. Особливий інтерес представляє можливість дослідження поведінки захистів в режимі БТН при різних початкових умовах: в умовах неодночасного замикання фаз вимикача при включенні ТС під напругу, при різних значеннях залишкової магнітної індукції в стрижнях магнітопроводу і т.п.

3. Розроблено математичну модель ТС для дослідження його роботи в режимах зовнішніх і внутрішніх КЗ. З огляду на простоту математичного опису ТС в даних режимах модель виконана за допомогою універсальних блоків поширених інженерних програмних пакетів.

4. Чисельні експерименти показують, що в ТС амплітуда БТН в бічних фазах вище, ніж амплітуда БТН в однойменних фазах, розрахована для групи однофазних ТС. Цю обставину слід враховувати при розрахунку уставок захистів ТС.

РОЗДІЛ 2. КОНТРОЛЬ ЦІЛОСТІ ВТОРИННИХ КІЛ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ У МЕРЕЖАХ 0,4 ... 10 кВ

Для контролю за режимами роботи електричних мереж і для реєстрації переданої електроенергії на всіх приєднаннях, підключених до шин підстанцій і електростанцій, а також на всіх трансформаторних пунктах 10/0,4 кВ встановлюють трансформатори струму (ТС) [1; 2]. Дуже часто зустрічаються трансформаторні пункти з обвугленими ТС. Такий трансформатор струму працював з обривом у вторинному ланцюзі і вийшов з ладу. При цьому порушується комерційний облік електроенергії [3; 4; 5; 6].

2.1 Розробка методу контролю цілості вторинних кіл трансформаторів струму у мережах 0,4 ... 10 кВ

Відомо [7], що трансформатори струму в електричних мережах виконують дві функції: перетворюють струм первинної обмотки пропорційно в струм вторинних обмоток; електрично поділяють кола вторинних обмоток від первинних високовольтних ланцюгів, що дозволяє обслуговувати вторинні кола на діючому високовольтному обладнанні. На відміну від силових трансформаторів і трансформаторів напруги ТС нормально працюють в режимі короткого замикання [8]. Для цього навантаження, що підключається до вторинної обмотки, може змінюватися від часток Ома до декількох Ом в залежності від потужності ТС. У режимі холостого ходу при роботі з розімкненим вторинним ланцюгом ТС виходять з ладу [9]. Крім цього, на розімкнутій вторинній обмотці з'являється висока напруга, що представляє небезпеку для обслуговуючого персоналу в разі дотику до вторинних ланцюгів.

У найпростішому вигляді принцип роботи ТС можна пояснити таким чином [10; 11]. Струм навантаження споживачів I_1 протікає по первинній обмотці з числом витків W_1 . Цей струм створює магніторухливу силу

(МРС) $I_1 \cdot W_1$. Під дією цієї МРС через магнітопровід замикається магнітний потік синусоїдальної форми Φ_1 . Магнітний потік Φ_1 індуктує у вторинній обмотці з частотою f з числом витків W_2 ЕРС:

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot W_2 \cdot \Phi_1 \quad (2.1)$$

При замиканні вторинної обмотки на невеликий опір у вторинному ланцюзі протікає струм I_2 , цей струм створює свою МРС $I_2 \cdot W_2$ і свій магнітний потік Φ_2 , який за правилом Ленца спрямований назустріч потоку Φ_1 . Тоді сумарний магнітний потік $\Phi_{\text{сум}}$, що проходить через магнітопровід, дорівнює різниці магнітних потоків Φ_1 і Φ_2 :

$$\Phi_{\text{сум}} = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (2.2)$$

$\Phi_{\text{сум}}$, на який розраховується магнітопровід, за величиною набагато менше потоку Φ_1 , і амплітуда синусоїди вторинної ЕРС має невелике значення:

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot W_2 \cdot (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (2.3)$$

Відповідно невелика напруга буде на навантаженні у вторинному ланцюзі. Так при допустимому навантаженні $Z_{2\text{доп}} = 0,6$ Ома при номінальному струмі вторинного ланцюга 5 А отримаємо:

$$\begin{aligned} U_{2\text{ном}} &= I_{2\text{ном}} \cdot Z_{2\text{доп}}; \\ U_{2\text{ном}} &= 5 \cdot 0,6 = 3\text{В}; \end{aligned} \quad (2.4)$$

Така напруга не представляє небезпеки для обслуговуючого персоналу, навіть якщо він торкається одночасно до двох виводів вторинного ланцюга трансформатора струму. Ізоляція між первинною і вторинною обмотками

випробовується підвищеною напругою, тому дотик до проводів вторинного ланцюга безпечно [12].

Щоб не розривати вторинну обмотку при заміні, наприклад, амперметра на діючому приєднанні, попередньо закорочується вторинна обмотка на клемнику, найближчому до виводів трансформатора струму. Для виконання цієї операції передбачаються спеціальні клеми в релейному відсіку або на панелі релейного захисту. Після закорочення можна безпечно замінювати амперметр. У такій же послідовності замінюють лічильники, тільки додатково на другому клеммнику необхідно вимкнути кола напруги.

Якщо розривається вторинне коло ТС, коли по первинному ланцюзі протікає номінальний струм – струм споживачів, то зникає потік, створюваний вторинною обмоткою Φ_2 , а через магнітопровід намагається пройти потік Φ_1 . Оскільки перетин магнітопроводу не розрахований на пропускання такого великого магнітного потоку, то магнітопровід насичується і нагрівається. Зовні це проявляється в почорнінні магнітопроводу через обвуглювання межлистової ізоляції. Від магнітопроводу нагріваються обмотки, їх ізоляція обвуглюється, і ТС виходить з ладу.

Для доказу збільшення магнітного потоку при розриві вторинного ланцюга в ярмі магнітопроводу був просвердлений отвір. У цей отвір встановили магнітоуправляємий контакт (геркон). У нормальному режимі роботи ТС магнітний потік, що проходить через феромагнітні платівки геркона, дорівнює різниці між магнітними потоками первинної і вторинної обмоток ($\Phi_1 - \Phi_2$) і недостатній для їх замикання. Розрив вторинного ланцюга ТС призводить до різкого збільшення магнітного потоку, і контактні пластинки геркона під дією магнітного потоку Φ_1 замикаються кожен напівперіод, так як час замикання пластин становить кілька мілісекунд. Пульсуючий сигнал з виходу геркона сигналізує про обрив вторинної обмотки світловим або звуковим сигналом.

Живлення більшості споживачів здійснюється від силових трансформаторів 10/0,4 кВ через щити низької напруги 0,4 кВ по повітряним (рідше по кабельним) лініях електропередачі [13]. Для контролю кількості електроенергії, переданої через силовий трансформатор, в кожному щиті низької напруги встановлені в трьох фазах ТС, через первинні обмотки яких проходять струми навантаження споживачів, а до вторинних обмоток підключаються струмові кола трифазних лічильників активної енергії або сучасних інтегральних лічильників електроенергії [14]. Інформація про електричні величини з інтегральних лічильників передається по GSM-каналам диспетчерам електромережних або електрозбутових компаній, що дозволяє здійснювати моніторинг споживання електроенергії і дистанційно знімати показники лічильників. Іноді у вторинні ланцюги ТС послідовно з струмовими ланцюгами лічильників підключаються амперметри. При порушенні контакту або при розриві в будь-якій точці вторинного ланцюга ТС магнітний потік, що замикається на його магнітопроводі, збільшується, що призводить до перегріву заліза магнітопроводу, порушення міжлистової ізоляції і обвуглювання ізоляції вторинної обмотки, в результаті ТС виходить з ладу [15; 16].

Контроль цілості вторинних ланцюгів ТС в експлуатації здійснюється періодично зовнішнім оглядом, в кращому випадку протискуєте контактні з'єднання [17]. За час між оглядами не виключається порушення цілості вторинних ланцюгів ТС, тому зустрічаються щити низької напруги трансформаторних пунктів з обвугленими ТС, при цьому не може бути мови про точність відліку переданої через силовий трансформатор електроенергії.

2.2 Розробка схеми контролю цілості вторинних ланцюгів трансформаторів струму

В роботі запропоновано пристрій безперервного контролю цілості вторинних ланцюгів ТС для трифазних мереж з нульовим проводом (рис. 3.1). Пристрій містить силовий трансформатор Т 10/0,4 кВ з первинними обмотками W_1 і вторинними обмоткам W_2 , від яких через первинні обмотки ТС $TA_1 \dots TA_3$, лінію електропередачі на напрузі 380/220 В живляться довільні трифазні або однофазні навантаження Z_1, Z_2, Z_3 , споживають струми, представлені векторами фазних струмів IA, IB, IC (рис. 3.2). Сума векторів фазних струмів замикається через вторинні обмотки силового трансформатора W_2 , через нульовий провід і через повторні заземлення представлена вектором струму IN . Геометрична сума векторів первинних струмів фазних і нульового проводу завжди дорівнює нулю:

$$I_{\Sigma 1} = IA + IB + IC = 0 \quad (2.5)$$

До вторинних обмоток $TA_1 \dots TA_3$, сполучених за схемою повної зірки, підключені струмові обмотки трифазного лічильника PIa, PIb, PIc . У робочому режимі геометрична сума векторів вторинних фазних струмів ТС замикається по нульовому проводу вторинного ланцюга. Геометрична сума векторів вторинних струмів так само, як і первинних, дорівнює нулю:

$$I_{\Sigma 2} = Ia + Ib + Ic + In = 0 \quad (2.6)$$

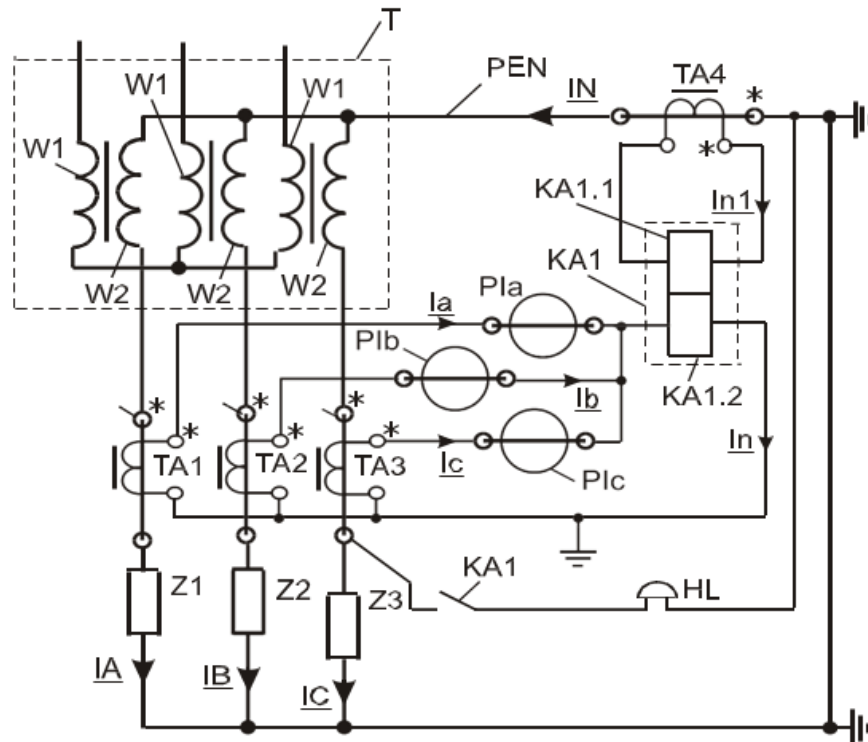


Рисунок 2.1 – Підключення первинних ланцюгів і з'єднання вторинних ланцюгів трансформаторів струму

Якщо у розтин нульового проводу PEN безпосередньо у виводу нульової точки вторинної обмотки силового трансформатора встановити додатковий трансформатор струму TA4 з таким же коефіцієнтом трансформації, як у TA1 ... TA3, то його вторинний струм In_1 буде такий же за величиною і за фазою, як і In . Струм In_1 протікає через одну з обмоток KA1.1 двохобмотувального струмового реле, а сума вторинних фазних струмів In протікає через другу обмотку KA1.2 двохобмотувального струмового реле. Токи в обмотках створюють зустрічні магнітні потоки. За магнітопроводом струмового реле KA1 буде протікати тільки потік небалансу, від якого контакти реле не замикаються.

Коли розривається один з проводів вторинного ланцюга трансформаторів струму TA1 або TA2, або TA3, то зміниться струм в нульовому проводі вторинного ланцюга In , а вторинний струм додаткового токового реле In_1 залишиться незмінним, так як первинні струми не змінюються. На зміну одного з вторинних струмів реагує сумарний

магнітний потік тлумового реле, його контакти замикаються і подають світловий або звуковий сигнал про несправності вторинних ланцюгів трансформаторів струму.

Дослідимо працездатність схеми за допомогою векторних діаграм. На рис. 2.2 представлені векторні діаграми первинних і вторинних струмів при несиметрії струмів в силовій мережі. У діючих чотирьох провідних мережах несиметрія струмів спостерігається завжди [18; 19; 20].

У силових фазних проводах через первинні обмотки трансформаторів струму ТА1, ТА2, ТА3 протікають різні за величиною струми, представлені товстими лініями векторів I_A , I_B , I_C , зсунутими один щодо одного на однакові або різні кути. В результаті додавання векторів трьох первинних струмів в фазах отримуємо суму первинних струмів $I_A + I_B + I_C$. Вектор струму I_N в нульовому проводі PEN спрямований в бік, протилежний сумі трьох первинних фазних струмів, так як вектори I_A , I_B , I_C спрямовані від силового трансформатора Т до навантажень Z_1 , Z_2 , Z_3 , а вектор струму I_N спрямований від навантажень до силового трансформатору Т, тому сума векторів первинних струмів I_A , I_B , I_C і I_N в чотирьох проводах силової мережі в будь-якому режимі дорівнює нулю (рис. 2.2).

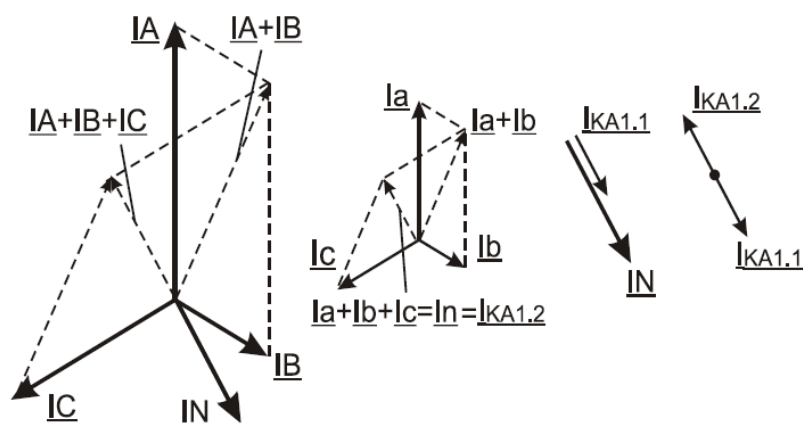


Рисунок 2.2 – Векторні діаграми первинних і вторинних струмів при несиметричному навантаженні первинного ланцюга

Вектори вторинних струмів I_a , I_b , I_c трансформаторів струму в іншому масштабі зменшені за величиною на рис. 2.2 в порівнянні з первинними струмами, але для зручності аналізу мають теж напрямок, що і первинні струми I_A , I_B , I_C трансформаторів струму.

Сума трьох вторинних струмів $I_a + I_b + I_c$ представлена вектором струму $I_n = I_{KA1.2}$. Вектор первинного струму I_N , що протікає по нульовому проводу PEN силової мережі через первинну обмотку додаткового трансформатора струму ТА4, перетворюється і у вторинній обмотці ТА4 протікає струм, представлений вектором $I_{n1} = I_{KA1.1}$, що збігається по напрямку з вектором первинного струму I_N . Вектори струмів $I_{KA1.1}$ і $I_{KA1.2}$ в обмотках струмового реле спрямовані зустрічно, їх геометрична сума близька до нуля, тому струмове реле КА1 не спрацьовує.

На рис.2.3 представлені векторні діаграми струмів при обрывах вторинних ланцюгів ТС. У разі обриву в будь-якій точці вторинних ланцюгів ТС первинні струми I_A , I_B , I_C , I_N залишаються без зміни, як і на рис. 2.2, а змінюються вторинні струми.

При обриві вторинного ланцюга ТС ТА1 (рис. 2.3, а) на векторній діаграмі вторинних струмів виключений вектор струму I_a , тоді сума двох, що залишилися вторинних струмів I_b , I_c складе струм, представлений вектором $I_b + I_c = I_{KA1.2}$, який протікає по першій обмотці реагуючого органу K_1 . Вторинний струм $I_{KA1.1}$ ТА4, встановленого в нульовому проводі силового ланцюга, залишається без зміни. Геометрична сума струмів, що протікають в двох обмотках реагуючого органу KA_1 представлена вектором $I_{KA1.2} + I_{KA1.1}$. Від впливу суми двох струмів реагуючий орган K_1 спрацює, на його виході замикаються контакти KA_1 і подають звуковий або світловий сигнали обслуговуючому персоналу або диспетчеру.

У разі обриву в будь-якій точці вторинного ланцюга, що одержує живлення від вторинної обмотки ТС ТА2 (рис. 2.3, б), первинні струми I_A , I_B , I_C , I_N залишаються без зміни, а на діаграмі вторинних струмів виключений вектор струму I_b . Тоді сума двох, що залишилися вторинних

струмів $I_a + I_c$ складе струм, представлений вектором $I_{KA1.2}$, який протікає по першій обмотці реагуючого органу KA_1 . Вторинний струм $I_{KA1.1}$ ТС ТА4, встановленого в нульовому проводі силового ланцюга залишається без зміни. Геометрична сума струмів, що протікають в двох обмотках реагуючого органу KA_1 , представлена вектором $I_{KA1.1} + I_{KA1.2}$. Від впливу суми двох струмів реагуючий орган KA_1 спрацює, на його виході контакти подадуть сигнал про несправності.

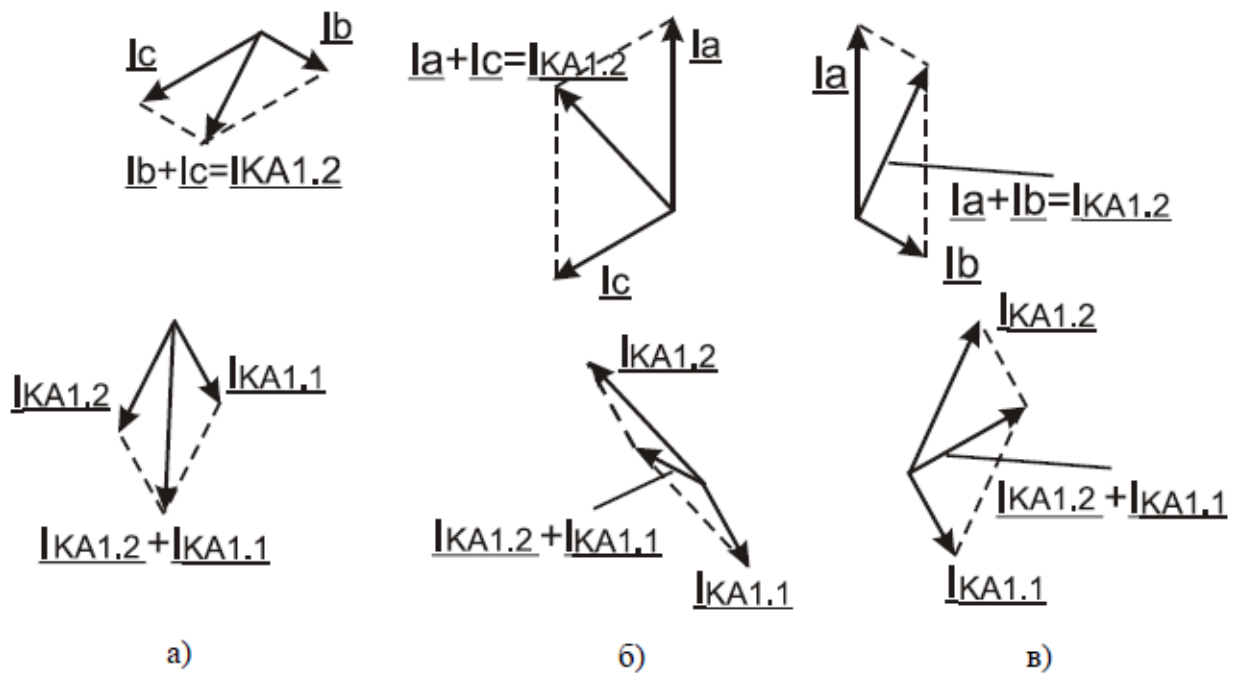


Рисунок 2.3 – Векторні діаграми струмів при обрывах вторинних ланцюгів

У разі обриву в будь-якій точці вторинного ланцюга, що одержує живлення від вторинної обмотки ТС ТА2 (рис. 2.3, б), первинні струми I_A , I_B , I_C , I_N залишаються без зміни, а на діаграмі вторинних струмів виключений вектор струму I_b . Тоді сума двох, що залишилися вторинних струмів $I_a + I_c$ складе струм, представлений вектором $I_{KA1.2}$, який протікає по першій обмотці реагуючого органу KA_1 . Вторинний струм $I_{KA1.1}$ ТС ТА4, встановленого в нульовому проводі силового ланцюга залишається без зміни. Геометрична сума струмів, що протікають в двох обмотках реагуючого органу KA_1 , представлена вектором $I_{KA1.1} + I_{KA1.2}$. Від впливу суми двох

струмів реагуючий орган КА1 спрацює, на його виході контакти подадуть сигнал про несправності.

У разі обриву в будь-якій точці вторинного ланцюга, що одержує живлення від обмотки ТА3 третього ТС (рис. 2.3, в), первинні струми ІА, ІВ, ІС, ІN залишаються без зміни, а на діаграмі вторинних струмів виключений вектор струму Іс, тоді сума двох, що залишилися вторинних струмів Іа + Іб складе струм, представлений вектором ІКА1.2, який протікає по першій обмотці реагуючого органу КА₁. Вторинний струм ІКА1.1 трансформатора струму ТА4, встановленого в нульовому проводі силового ланцюга, залишається без зміни. Геометрична сума струмів, що протікають в двох обмотках реагуючого органу КА1, представлена вектором ІКА1.2 + ІКА1.1. Від впливу суми двох струмів реагуючий орган КА₁ спрацює, на виході контакти КА₁ замкнуться і подадуть світловий або звуковий сигнал, сигналізуючи про несправності. Таким чином контролюється цілість вторинних ланцюгів всіх трансформаторів струму.

Контроль цілості вторинних ланцюгів ТС в мережах 6 ... 35 кВ

У мережах з ізольованою нейтраллю, що містять повітряні ЛЕП, однофазні замикання на землю (ОЗЗ) через малу величину струму пошкодження не відключаються, а тільки сигналізуються. Для сигналізації одна з обмоток трансформатора напруги з'єднується в фільтр напруги нульової послідовності, на виході якого підключається реле напруги. Трансформатори напруги встановлюються для живлення ланцюгів напруги вимірювальних приладів і релейних захистів на кожній секції розподільного пристрою. А на кожному приєднанні встановлюють ТС з двома вторинними обмотками в двох фазах для відключення міжфазних коротких замикань і для живлення струмових ланцюгів вимірювальних приладів (рис.2.4).

Первинні обмотки ТС ТА1, ТА2 включаються у розтин силової мережі, через них проходять струми навантаження трансформаторних пунктів, що забезпечують живлення споживачів. До початків першого комплекту

вторинних обмоток ТС W_{a1} , W_{c1} , позначених зірочками, підключаються струмові обмотки лічильника PI_a , PI_c і амперметр PA . Кінці вторинних обмоток W_{a1} , W_{c1} з'єднуються в неповну зірку, від якої через амперметр PA перший зворотний провід підключається до неповної зірки виходів лічильника PI_a , PI_c . Аналогічно до початків другого комплекту вторинних обмоток W_{a2} , W_{c2} підключаються ланцюги струмового захисту приєднання KA_1 , KA_2 . Кінці другого комплекту вторинних обмоток W_{a2} , W_{c2} з'єднуються також в неповну зірку, від якої другий зворотний провід підключається до неповної зірки струмових захистів.

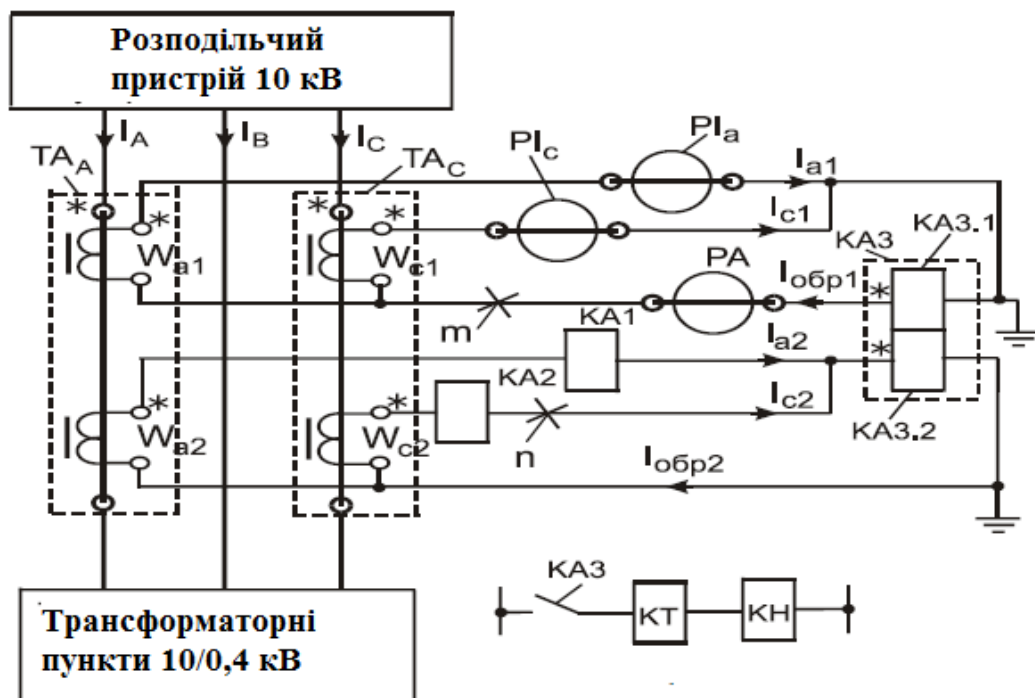


Рисунок 2.4 – Схема контролю цілості вторинних ланцюгів трансформаторів струму в мережах 6...35 кВ

Для контролю цілості всіх вторинних ланцюгів двох ТС пропонується у розтин зворотних проводів схем, з'єднаних в неповну зірку, включити обмотки двохобмотувального струмового реле KA_3 так, щоб струми в них протікали зустрічно. Вихід двохобмотувального струмового реле KA_3 через елемент витримки часу KT зв'язати з виконавчим органом $КН$, в якості якого

використано вказівне реле, повернення якого в початковий стан здійснюється тільки вручну.

Досліджуємо пропоновану схему в нормальному робочому режимі, а також в режимах обриву фазного проводу вторинного ланцюга і обриву зворотного проводу. У нормальному робочому режимі в трьох фазах силової мережі фіксуємо три вектора фазних струму I_A , I_B , I_C (рис. 2.5). У ці ж моменти часу вторинні струми ТС обмоток W_{a1} , W_{c1} , встановлених в фазах А і С, матимуть значення I_{a1} , I_{c1} , що протікають через струмові обмотки P_{Ia} , P_{Ic} лічильника, а їх геометрична сума дорівнює вектору струму $I_{обр1}$, що протікає від кінця до початку першої обмотки КА3.1 двохобмотувального реле і через амперметр РА. У другому комплекті вторинних обмоток W_{a2} , W_{c2} , ТС через струмові обмотки релейного захисту КА1, КА2 будуть протікати струми, представлені векторами I_{a2} , I_{c2} , а їх геометрична сума дорівнює вектору струму $I_{обр2}$, що протікає від початку до кінця другої обмотки КА3.2 двохобмотувального реле. Струми в обмотках двохобмотувального токового реле мають зустрічний напрямок, і створюваний ними магнітний потік близький до нуля.

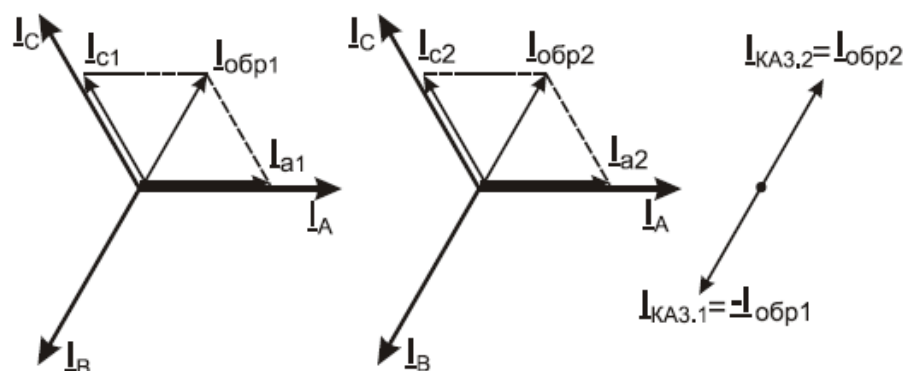


Рисунок 2.5 – Векторні діаграми первинних і вторинних струмів в нормальному режимі

При порушенні цілості фазного дроту вторинного ланцюга, наприклад в точці n (рис. 2.4), в першому комплекті вторинних обмоток W_{a1} і W_{c1}

вектор струму в зворотному проводі $I_{обр1}$ буде таким ж, як і в нормальному режимі (рис. 2.6).

Цей струм протікає від кінця до початку виводів обмотки КА3.1, тому на векторній діаграмі направляємо його поверненням на 180° . У другому комплекті вторинних обмоток W_{a2} і W_{c2} струм в обірваному дроті фази С дорівнює нулю $I_{C2} = 0$, а струм I_{a2} фази А буде протікати через обмотку КА3.2 від початку до кінця.

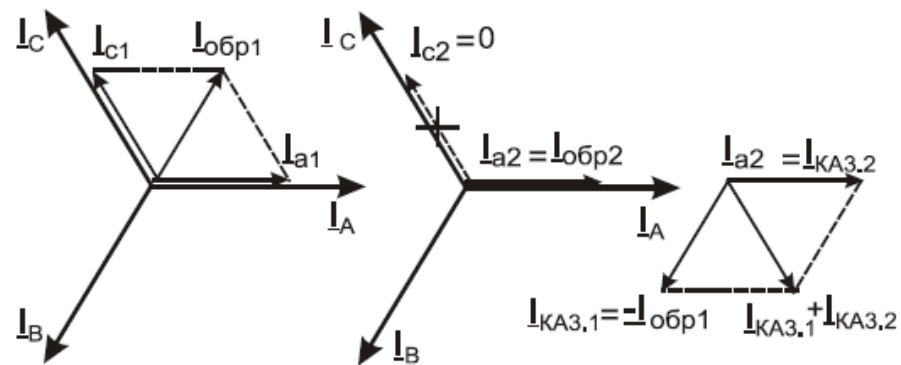


Рисунок 2.6 – Зміна вторинних струмів при обриві провода фази С в точці

n

Геометрична сума струмів в обмотках КА3.1 і КА3.2 створює магнітний потік, під дією якого реле КА3 спрацьовує і через витримку часу КТ впливає на вказівне реле КН. Вказівний реле подає світловий і звуковий сигнал обслуговуючому персоналу. Якщо підстанція без обслуговуючого персоналу, то реле КН подає сигнал по GSM-каналі диспетчеру електричних мереж про несправності.

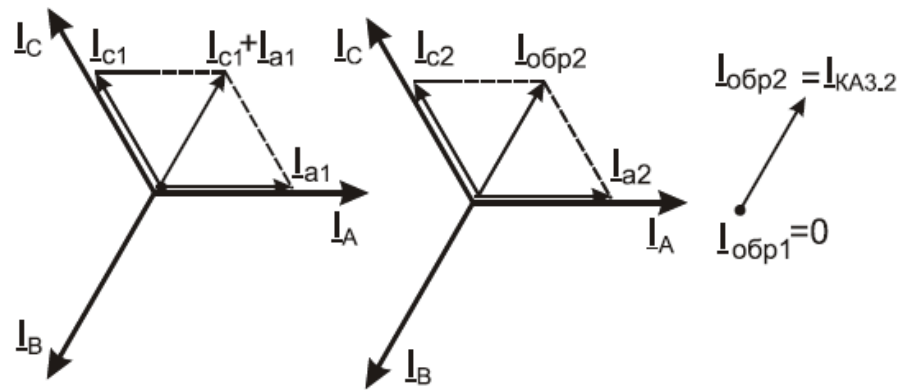


Рисунок 2.7 – Зміна вторинних струмів при обриві зворотнього проводу в точці m

У разі обриву одного з зворотних проводів в точці m (рис. 2.4) через вторинні обмотки W_{a1} і W_{c1} буде протікати сума струмів $I_{c1} + I_{a1}$ (рис. 3.7), не протікаючи через обмотку КАЗ.1.

У другому комплекті вторинних обмоток W_{a2} і W_{c2} струм в зворотному проводі буде дорівнювати сумі струмів $I_{c2} + I_{a2} = I_{обp2}$. Цей струм, протікаючи через обмотку КАЗ.2, викличе спрацьовування реле КАЗ, і персонал отримає сигнал про несправності, як і в випадку обриву фазного проводу вторинного ланцюга.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

Для збільшення надійності роботи лічильників електроенергії в мережі 0,4 кВ досить в нульовий провід силового трансформатора встановити додатковий ТС і порівнювати його вторинний струм з сумою вторинних струмів трансформаторів струму, встановлених в фазах силової мережі двообмоткових струмовим реле, що сигналізує про порушення цілості вторинних ланцюгів.

У мережах з ізольованою нейтраллю при з'єднанні ТС і навантажень в неповну зірку порівняння струмів в зворотних проводах двох комплектів вторинних обмоток двообмоткових струмовим реле забезпечується контроль цілості всіх вторинних струмових ланцюгів приєднання.

Працездатність схем автоматичного контролю цілості вторинних ланцюгів трансформаторів струму доведена аналізом векторних діаграм вторинних струмів.

РОЗДІЛ 3. МЕТОД ОЦІНКИ МАКСИМАЛЬНОЇ АМПЛІТУДИ УСТАЛЕНОЇ НАПРУГИ НА РОЗІМКНЕНИХ ВИВОДАХ ВТОРИННОЇ ОБМОТКИ ОДНОСТУПЕНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ

3.1 Спрощена розрахункова схема одноступеневого трансформатора струму за розімкнутого вторинного кола

Розглянемо роботу ТС за розімкненого його вторинного кола. Такий режим роботи трансформатора є аварійним внаслідок індукування на виводах його вторинної обмотки високовольтних імпульсів напруги, коли у первинній обмотці ТС протікає відповідний струм [26].

На рис. 3.1 наведена загальновідома спрощена розрахункова схема ТС з розімкненим його вторинним колом [14].

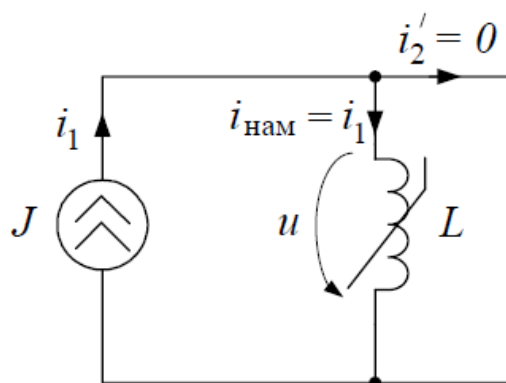


Рисунок 3.1 – Спрощена розрахункова схема ідеального ТС з розімкненим
вторинним колом

Джерело струму J моделює первинний струм i_1 ТС. Вітка намагнічування представлена нелінійною індуктивністю L , параметри якої задаються відповідно до вебер-амперної характеристики (ВбАХ) $\Psi_1 = f(i_{\text{нам}})$ первинної обмотки ТС [26].

Спрощена розрахункова схема не враховує втрати активної потужності на гістерезис і вихрові струми в осерді ТС (приймаємо $r_{\text{нам}} \rightarrow \infty$), а також

втрати активної потужності в його обмотках. Як зазначалося, опір первинної обмотки не впливає на режим роботи ТС, тому його в розрахунковій схемі не враховують. Опором вторинної обмотки також нехтують у заданому режимі, оскільки вторинне коло розімкнене [26].

З метою спрощення розрахунку режимів роботи ТС з замкненими осерддями їх нелінійні криві намагнічування апроксимують кусково-лінійними відрізками. Така апроксимація кривої намагнічування забезпечує наочність інтерпретації фізичних процесів зі збереженням допустимої точності розрахунків [14]. У спрощеній розрахунковій схемі ТС його ВБАХ обмоток часто задають двокусово-лінійною апроксимованою характеристикою (рисунок 3.2) [14].

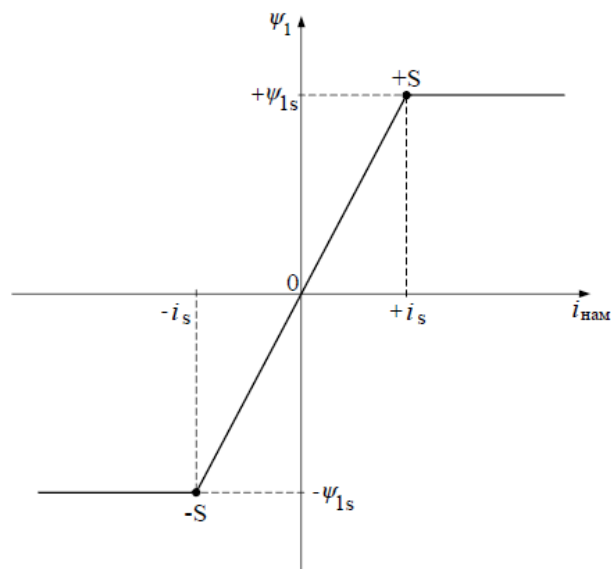


Рисунок 3.2 – Двокусово-лінійна ВБАХ первинної обмотки ТС

Лінійна похила частина кривої на проміжку зміни струму намагнічування відповідає ненасиченому стану магнітопроводу трансформатора. Точки +S, -S (від «Saturation» – насичення) відповідають границям входження осердя в зону насичення. Горизонтальні ділянки кривої характеризують роботу ТС за насичення його осердя з відповідним значенням граничного магнітного потоку (потокозчеплення первинної обмотки) [26].

3.2 Потокозчеплення обмоток трансформатора струму та напруга на розімкнених виводах його вторинної обмотки за протікання синусоїдного первинного струму

На рисунку 3.3 наведено координати усталеного режиму роботи ТС за розімкненого його вторинного кола при протіканні у первинній обмотці трансформатора синусоїдного струму. Для наглядності, за великої швидкості зміни первинного синусоїдного струму, коли осердя ТС ненасичене, відрізки синусоїди замінюють відповідними лінійними відрізками з постійним нахилом.

За розмикання вторинного кола ТС його намагнічувальний струм стає рівним первинному струму. За такого режиму крива потокозчеплення первинної обмотки ТС складена з ділянок з лінійним зростанням (спаданням) потокозчеплення (за режиму ненасиченого магнітопроводу) та горизонтальних ділянок (за насичення осердя), на яких потокозчеплення постійне та сягає значень $\pm\Psi_{1s}$ [26].

Вторинна напруга u (рисунк 3.3, г), зведена до первинної обмотки ТС, дорівнює:

$$u = -\frac{d\Psi_1}{dt} \approx -\frac{\Delta\Psi_1}{\Delta t}. \quad (3.1)$$

Так для проміжку часу $[0; t_1]$ запишемо

$$u \approx -\frac{\Delta\Psi_1}{\Delta t} = -\frac{\Psi_{1s} - 0}{t_1 - 0} = -\frac{\Psi_{1s}}{t_1},$$

а для проміжку часу $[t_2; t_3]$ –

$$u \approx -\frac{\Delta\Psi_1}{\Delta t} = -\frac{-\Psi_{1s} - \Psi_{1s}}{t_3 - t_2} = -\frac{(-2 \cdot \Psi_{1s})}{2 \cdot t_1} = \frac{\Psi_{1s}}{t_1}.$$

Аналогічні вирази можна записати і для інших проміжків зміни потокозчеплення.

Як видно з рисунку 3.3, за насичення магнітопроводу, коли потокозчеплення первинної обмотки у часі не змінюється (за реальних процесів змінюється незначно), похідна $d\Psi_1/dt$ і відповідно зведена вторинна напруга u рівні нулю (за реальних процесів модуль напруги змінюється незначно, як правило, в межах до 1000 В). Коли ж осердя ТС ненасичене, то швидка зміна потокозчеплення в інтервалах $[\Psi_{1s}; -\Psi_{1s}]$ та $[-\Psi_{1s}; +\Psi_{1s}]$ індукуює у вторинній обмотці ТС напруги з амплітудами відповідно $+U_m$ та $-U_m$, які за протікання відповідних значень первинного струму i_1 можуть бути значно більші за 1000 В (допустима напруга для ізоляції вторинних кіл систем релейного захисту та автоматики, підключених до вторинної обмотки ТС [11]).

Вищенаведені розрахунки координат режиму роботи ТС у відповідності до рисунку 2.3 можуть бути використані в методі оцінки максимальної амплітуди усталеної напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки одноступеневого ТС [26].

Як зазначено вище, за реальних процесів, коли осердя ТС насичене, модуль напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки змінюється незначно, однак не дорівнює нулю. Для більш чіткого відтворення форми кривої цієї напруги доцільно врахувати зміну потокозчеплення обмотки і під час насичення осердя ТС. У цьому випадку відрізок двокускової ВБАХ первинної обмотки ТС в області насичення осердя матиме кут нахилу до осі абсцис не рівний нулю, але значно менший від такого ж кута нахилу відрізка для області ненасиченого осердя [26].

Координати режиму за розімкненого вторинного кола ТС з урахуванням зміни потокозчеплення первинної обмотки за насиченого осердя наведені на рисунку 2.4 [3].

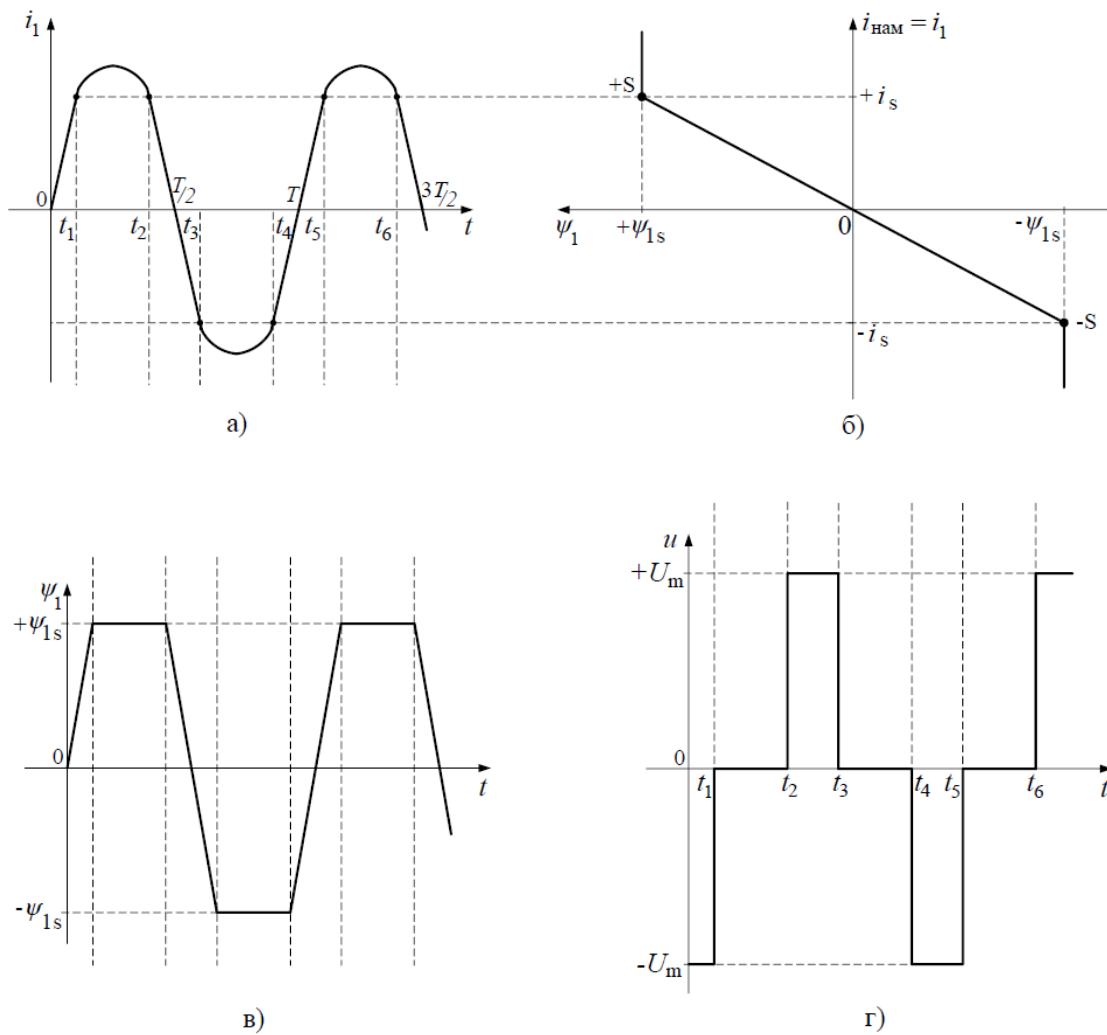


Рисунок 3.3 – Координати усталеного режиму роботи ТС за розімкненого вторинного кола

Як видно з рисунка 3.4, за насиченого осердя модуль приросту потокозчеплення становить $(\Psi_{1m} - \Psi_{1s})$, що значно менше такого приросту $(2 \cdot \Psi_{1s})$ за ненасиченого осердя. При цьому, наприклад, за додатних значень Ψ_1 , коли осердя насичене, приріст потокозчеплення відбувається за інтервал часу $(t_2 - t_1)$, що значно більший за інтервал часу $(t_3 - t_2)$, коли осердя ненасичене. Такі ж співвідношення параметрів режиму матимемо і за від'ємних значень потокозчеплення [26].

В результаті, як видно з рисунку 2.4, за ненасиченого осердя, модуль амплітуди напруги U_m значно більший за модуль напруги u_1 , коли осердя ТС насичене. Також, за такої апроксимації двокусової ВБХ первинної

обмотки ТС має місце більш чітке відтворення форми кривої напруги на виводах розімкненої його вторинної обмотки. Водночас і частотний спектр такої напруги більш близький до реального, що неабияк важливо для можливості створення ефективного частотного реагуючого органу системи захисту від перенапруг за обриву вторинних кіл ТС [26].

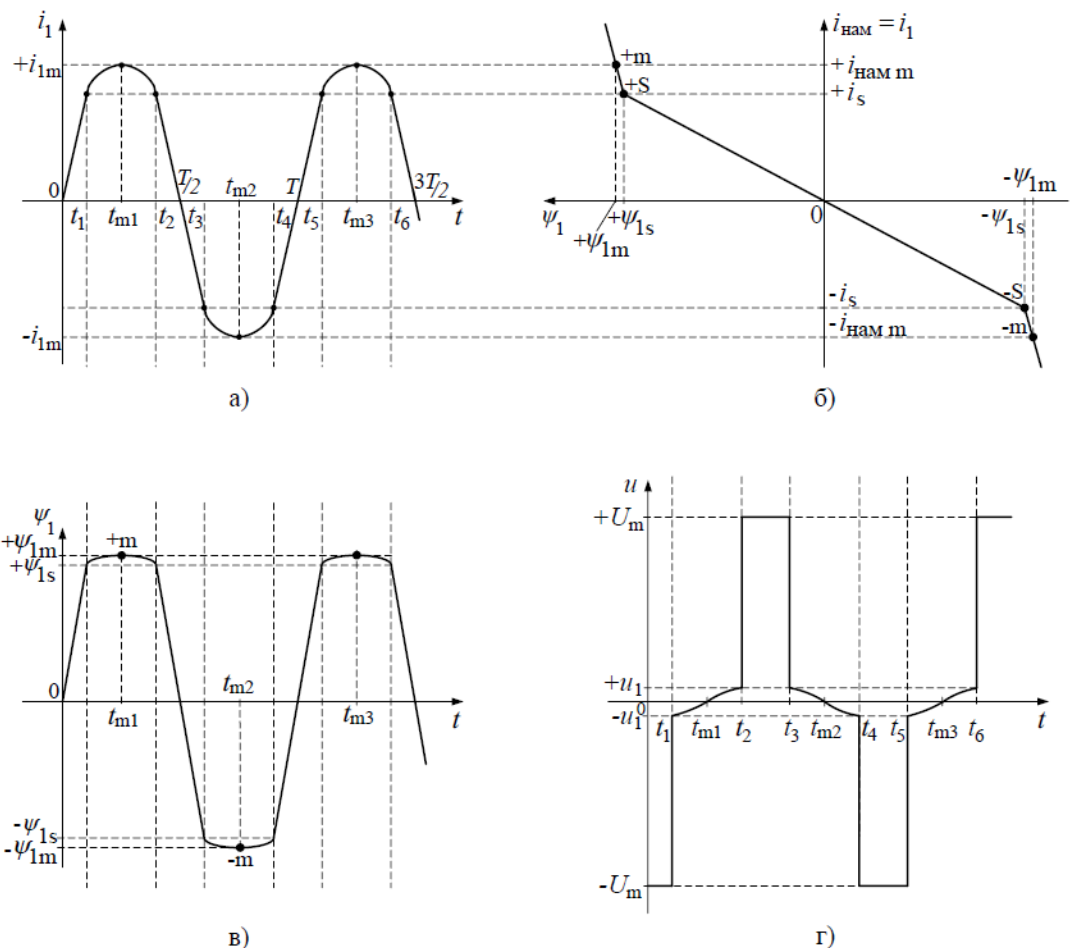


Рисунок 3.4 – Координати режиму за розімкненого вторинного кола ТС з урахуванням зміни потокозчеплення первинної обмотки за насиченого осердя

Координати режиму роботи ТС (рис. 3.4) розраховують аналогічно виразам, наведеним вище для розрахунку режиму роботи ТС (рис. 3.3).

Наведені розрахункові осцилограми наглядно характеризують особливості та небезпеку режиму роботи ТС з розімкненим вторинним колом.

3.3 Метод оцінки максимальної амплітуди напруги на розімкнених затискачах вторинної обмотки трансформатора струму за протікання синусоїдного первинного струму

Для усталеного режиму роботи ТС запропоновано простий метод визначення максимальної амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за протікання синусоїдного первинного струму [2]. При цьому користуємось двокусково-лінійною ВБАХ обмоток ТС. Застосування запропонованого методу дозволить швидко розрахувати амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки одноступеневого ТС за протікання синусоїдного первинного струму, використовуючи прості розрахункові формули – без необхідності комп'ютерного моделювання [26].

Для розрахунку амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС з характеристики намагнічування магнітопроводу трансформатора визначають координати точки «коліна»: магнітну індукцію B_s , Тл, та напруженість магнітного поля H_s , А/м. Далі визначаємо потокозчеплення вторинної обмотки, Ψ_b , за формулою

$$\Psi_{2s} = B_s \cdot w_2 \cdot S_{ст}, \quad (3.2)$$

де w_2 – кількість витків вторинної обмотки ТС;

$S_{ст}$ – площа поперечного перерізу сталі магнітопроводу ТС, м².

Визначаємо миттєве значення струму, A , первинної обмотки ТС для точки «коліна»

$$i_{1s} = \frac{H_s \cdot l}{w_1}, \quad (2.3)$$

де l – середня довжина магнітної силової лінії осердя, м;

w_1 – кількість витків первинної обмотки ТС.

Миттєве значення первинного струму рівне

$$i_1 = I_{1m} \cdot \sin(2\pi f t), \quad (3.4)$$

де I_{1m} – амплітуда первинного синусоїдного струму ТС, А; f – промислова частота, рівна 50 Гц. Визначаємо час t_s , с, коли миттєве значення первинного струму трансформатора досягне величини i_{1s} :

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(i_{1s}/I_{1m}). \quad (3.5)$$

За час $\Delta t = 2t_s$, коли осердя перемагнітиться від значення магнітної індукції $(-B_s)$ до значення $(+B_s)$, приріст потокозчеплення вторинної обмотки становитиме $\Delta\Psi_{2s} = 2 \cdot \Psi_{2s}$. Тоді амплітуда напруги, U , на розімкнених виводах вторинної обмотки трансформатора визначатиметься за формулою (3.6):

$$U_{2m} = \frac{\Delta\Psi_{2s}}{\Delta t} = \frac{2 \cdot \Psi_{2s}}{2 \cdot t_s} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s}. \quad (3.6)$$

Слід відмітити, що всі наведені співвідношення справедливі за умови лінійної зміни потокозчеплення обмоток ТС, коли $H_s \ll H_m = I_{1m} \cdot w_1 / l$. За малих значень амплітуди первинного синусоїдного струму I_{1m} слід користуватися формулами, наведеними нижче. Модуль піку перенапруги, зведеної до первинної обмотки ТС, визначаємо за виразом (3.7):

$$u_1 = \left. \frac{d\Psi_1}{dt} \right| (i_1 = 0), \quad (3.7)$$

тому що, коли i_1 рівний нулю ($t = 0$), похідні

$$di_1 / dt | (t = 0) = d(I_{1m} \cdot \sin(2\pi ft)) / dt | (t = 0) = 2\pi f I_{1m} \cdot \cos(2\pi ft) | (t = 0) = 2\pi f I_{1m} \quad \text{і,} \quad \text{як}$$

наслідок, похідні $d\Psi_1/dt$ досягають своїх максимальних значень.

Точне визначення похідної потокозчеплення за струмом $d\Psi_1 / di_1$ ($i_1 = 0$) можливе, коли відома залежність динамічної магнітної проникності матеріалу осердя ТС. Наближено можна визначити, спрямляючи початковий відрізок кривої намагнічування $B(H)$, що і є основним джерелом похибки розрахунку у методі. Запишемо:

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = \frac{d\Psi_1}{di_1} \cdot \frac{di_1}{dt}; \quad (3.8)$$

$$\Psi_1 = B \cdot w_1 \cdot S_{\text{ст}}; \quad (3.9)$$

$$\Psi_2 = B \cdot w_2 \cdot S_{\text{ст}}; \quad (3.10)$$

$$i_1 = \frac{H \cdot l}{w_1}. \quad (3.11)$$

З (3.9, 3.10) отримаємо

$$\Psi_1 = \Psi_2 \cdot \frac{w_1}{w_2}. \quad (3.12)$$

Співвідношення (3.12) справедливе, коли коефіцієнт зв'язку K між первинною і вторинною обмотками близький до одиниці, що має місце за ненасиченого осердя ТС ($i_1 \approx 0$). Враховуючи [26], що пік напруги на виводах вторинної обмотки трансформатора дорівнює:

$$U_{2m} = \frac{d\Psi_2}{dt} | (i_1 = 0), \quad (3.13)$$

отримаємо з (3.8, 3.12)

$$U_{2m} = [d\Psi_1/di_1 | (i_1 = 0)] \cdot [di_1/dt | (i_1 = 0)] \cdot w_2/w_1. \quad (3.14)$$

За синусоїдного первинного струму ТС

$$i_1 = I_{1m} \cdot \sin(2\pi ft) \quad (3.15)$$

значення похідних у виразі (3.14) з урахуванням (3.9, 3.11) будуть рівні:

$$d\Psi_1/di_1 | (i_1 = 0) = \frac{S_{ст} \cdot w_1^2}{l} \cdot [dB/dH | (H = 0)]; \quad (3.16)$$

$$di_1/dt | (i_1 = 0) = 2\pi f I_{1m}. \quad (3.17)$$

Для лінеаризованого початкового відрізка кривої намагнічування
можемо записати

$$dB/dH | (H = 0) \approx \Delta B/\Delta H | (H = 0). \quad (3.18)$$

Підставивши (3.16, 3.17) з врахуванням (3.18) у (3.14), отримаємо
остаточний розрахунковий вираз для визначення піку напруги U_{2m} , В, на
розімкнених виводах вторинної обмотки ТС:

$$U_{2m} = 2\pi f \cdot S_{ст} \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot [\Delta B/\Delta H | (H = 0)]/l. \quad (3.19)$$

Описані вище аналітичні вирази дають змогу за відомими параметрами обмоток і магнітного кола ТС швидко та з достатньою точністю розрахувати для усталених режимів величини амплітуд напруг на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за різних значень синусоїдного первинного струму. При цьому виключається необхідність створення громіздких розрахункових схем трансформатора та моделювання його характеристики намагнічування.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

Для попереднього аналізу усталених режимів роботи одноступеневих ТС за розімкнених їх вторинних кіл отримано розрахункові осцилограми та вирази для параметрів координат усталеного режиму роботи ТС за розімкненого кола вторинного навантаження за протікання у первинній обмотці трансформатора синусоїдного струму.

На основі застосування для аналітичних розрахунків двокускової ВБАХ обмоток ТС запропоновано метод оцінки максимальної амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за протікання в первинній обмотці синусоїдного струму.

Показано ефективність застосування апроксимації гіперболічним синусом залежності матеріалу феромагнітних осердь сучасних ТС для аналітичних розрахунків амплітуди вторинної напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за протікання в первинній обмотці синусоїдного струму.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішена науково-технічна задача аналізу режимів роботи трансформаторів струму за аварійного розмикання їх вторинних кіл та розробки системи захисту трансформаторів струму від таких режимів, що сприятиме надійності функціонування електричних систем. В руслі даного напрямку отримано наступні результати:

1. Розглянуто конструкції, технічні характеристики трансформаторів струму з замкнутим магнітопроводом, особливості режимів роботи цих трансформаторів у сучасних мережах 6 – 750 кВ промислової частоти за розімкнутих кіл їх вторинних обмоток.

2. Проведено аналіз публікацій з результатами досліджень режимів роботи трансформаторів струму за обриву кіл вторинних обмоток цих трансформаторів, а також з описами пристроїв захисту від перенапруг, що виникають за таких режимів. Кількість цих публікацій виявилась незначною, а проведений аналіз підтверджує доцільність продовження досліджень таких режимів та розробки відповідних захистів для трансформаторів струму.

3. Запропоновано метод оцінки максимальних амплітуд перенапруг на розімкнених виводах вторинних обмоток трансформаторів струму, що дає змогу здійснювати попередній аналіз перенапруг на основі паспортних даних трансформаторів струму. Результатами аналітичних розрахунків підтверджено наявність небезпечних (більше 1000 В) перенапруг на розімкнених виводах трансформаторів струму різних типів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз режимів роботи вторинних кіл трансформаторів струму за їх розкорочення [Текст] / А. В. Журахівський, Б. М. Кінаш, А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2012. – № 736 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 43–49.
2. Журахівський А. В. Аналіз режиму роботи трансформатора струму з розімкненим вторинним колом методами аналітичних розрахунків [Текст] / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, Р. Я. Ференсович // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6 (123). – С. 89–94.
3. Кенс Ю. А. Спрощений аналіз усталеного режиму роботи однокаскадного трансформатора струму за розкорочення його вторинної обмотки [Текст] / Ю. А. Кенс, Р. Я. Ференсович, Н. Б. Дьяченко // Вісник НУ «Львівська політехніка». – 2015. – № 834 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 26–32.
4. Яцейко А. Я. Аналіз аварійних режимів роботи вимірювальних трансформаторів струму [Електронний ресурс] / А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович // Енергетика та системи керування : Матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2013. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 32–35. – Назва з екрану.
5. Захист від наднапруг розімкненого вторинного кола трансформатора струму [Текст] / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, Р. Я. Ференсович, Н. Б. Дьяченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 5 (134). – С. 74–79.
6. Пат. 71385 Україна, МПК H02H 7/04(2006.01). Пристрій захисту трансформатора струму від перенапруг / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович ; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201200114 ; заявл. 04.01.2012 ; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.

7. Пат. 89566 Україна, МПК H02H 7/04(2006.01). Пристрій захисту трансформатора струму від пошкоджень перенапругами / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович ; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201313704 ; заявл. 25.11.2013 ; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.

8. Пат. 111065 Україна, МПК H02H 7/04(2006.01). Пристрій захисту від перенапруг трансформатора струму та його вторинних кіл / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович ; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201605446 ; заявл. 19.05.2016 ; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.

9. Перевірка трансформаторів струму, які використовуються в схемах релейного захисту : СОУ-Н МПЕ 40.1.35.301:2004. – Видання офіційне. – К. : ГРІФРЕ : М-во палива та енергетики України, 2005. – 80 с. – (Нормативний документ Мінпали-венерго України. Інструкція).

10. Стогний Б. С. Анализ и расчет переходных режимов работы трансформаторов тока [Текст] / Б. С. Стогний. – К. : Наук. думка, 1972. – 140 с.

11. Сирота И. М. Переходные режимы работы трансформаторов тока [Текст] / И. М. Сирота. – К. : Изд. АН УССР, 1961. – 192 с.

12. Свірщов В. О. Особливості діагностування стану вимірювальних та силових трансформаторів в електромережах [Текст] / В. О. Свірщов, Є. В. Походило, Р. В. Курдидик // Вісник НУ «Львівська політехніка». – Л. : В-цтво НУ ЛП, 2008. – № 608 : Автоматика, вимірювання та керування. – С. 123–127.

13. ТРАНСФОРМАТОРИ ВИМІРЮВАЛЬНІ. Частина 1. Трансформатори струму (ІЕС 60044-1 : 2003, ІДТ) : ДСТУ ІЕС 60044-1 : 2008. – [Чинний від 2010-01- 01]. – Видання офіційне. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 39 с. – (Національний стандарт України).

14. Ференсович Р. Я. Режими роботи та захист трансформаторів струму за обривів вторинних кіл : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи / Роман Ярославович Ференсович ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2018. – 256 с.

15. Arri, E., Carta, A., Mocci, F., Tosi, M. (1993). Diagnosis of the state of power transformer windings by on-line measurement of stray reactance. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 42(2), 372-378.

16. Chen, Y. H., Huang, Y. H., Hsiao, W. Y., Yang, Y. H. (2020). Automatic composition of guitar tabs by transformers and groove modeling. arXiv preprint arXiv:2008.01431.

17. Yang, G., Qian, Y., Liu, H., Tang, B., Qi, R., Lu, Y., Geng, J. (2022). MSFusion: Multistage for remote sensing image spatiotemporal fusion based on texture transformer and convolutional neural network. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 15, 4653-4666.

18. Schwitz, W., Kampfer, R., Braun, A., Souders, T. M., Moore, W. J., Cassidy, B. R., Deacon, T. A. (1985). International comparison of current transformer calibrations. IEEE transactions on instrumentation and measurement, (2), 234-238.

19. Umerenkov, D., Shashkova, T. I., Strashnov, P. V., Nikolaev, F., Sindeeva, M., Ivanisenko, N. V., Kardymon, O. L. (2022). PROSTATA: protein stability assessment using transformers. BioRxiv, 2022-12.

20. Hu, D., Hu, M., Xu, Y. G., Sheng, X. F., Li, J. N., Li, Z., Jin, J. (2017). Design and electromagnetic analysis of a 330 kVA single-phase HTS transformer. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 27(4), 1-5.