

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Електротехнічний факультет

(повне найменування факультету)

Кафедра «Електричні та електронні апарати»

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему: «Проектування трансформатору струму 110 кВ та дослідження
метрологічних характеристик засобами комп'ютерного моделювання»

Виконав: студент(ка) II курсу, групи Е-412м
Спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

«Електричні та електронні апарати»

ЛЕГЕНЧУК В.Ф.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник КОЦУР М.І.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент САХНО О.А.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2023р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет “Запорізька політехніка”
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, Факультет «Фізико-технічний», «Електротехнічний»
Кафедра «Електричні та електронні апарати»
Ступінь вищої освіти «магістр»
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і найменування)
Освітня програма «Електричні та електронні апарати»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Ета ЕА
проф. Петро АНДРІЄНКО
“ ” 2023 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

ЛЕГЕНЧУКУ Василю Федоровичу

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: "Проектування трансформатору струму 110 кВ та дослідження метрологічних характеристик засобами комп'ютерного моделювання"

Керівник проекту (роботи) доц., канд. техн. наук, КОЦУР Михайло Ігорович

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 1.11.2023р. № 407

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту $I_1=1000$ А, $I_2=5$ А, $U_{1н}=110$ кВ, $I_{ед.ст.}=150$ кА, $S_{н}=20$ В·А, $I_{т.с}=35$ кА, клас точності вимірювальної обмотки 0,5, клас точності обмотки захисту 10Р

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). 1. Огляд конструкції та вимоги до трансформаторів струму, що працюють в перехідних режимах роботи. 2. Електромагнітний розрахунок. 3. Розрахунок міцності корпусу та болтових з'єднань 4. Дослідження похибок релейної обмотки типу ТРУ у перехідних режимах роботи. Висновки.

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

1. ГКІЮ. 671224.001 – Трансформатор струму ТОГ 110–II–II У1 лист (ФА1) СК; 2. ГКІЮ. 715005.002 П - Результати моделювання – 1 лист (ФА1). 3. Презентація (ФА4).

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Технічний	КОЦУР М.І., доцент		
Нормоконтроль	КОЦУР М.І., доцент		

7. Дата видачі завдання 01.04.2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
	Огляд конструкції та вимоги до трансформаторів струму, що працюють в перехідних режимах роботи	01.04.23-15.04.23	
	Електромагнітний розрахунок	15.04.23-15.05.23	
	Розрахунок міцності корпусу	15.05.23-1.06.23	
	Дослідження похибок релейної обмотки типу ГРУ у перехідних режимах роботи	1.06.23-15.10.23	
	Оформлення графічної частини	до 15.12.23	
	Оформлення пояснювальної записки	до 15.12.23	

Студент(ка)

_____ Василь ЛЕГЕНЧУК
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ Михайло КОЦУР
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 86с., 23 рис., 15 табл., 32джерел.

ТРАНСФОРМАТОР, НАПРУГА, СТРУМ, СТРУМОВА ПОХИБКА, КУТОВА ПОХИБКА, ЕЛЕГАЗ, ІЗОЛЯЦІЯ, ОБМОТКА, КОНДЕНСАТОР, ТРУДОМІСТКІСТЬ

Об'єкт дослідження – трансформатор струму з елегазовою ізоляцією.

Мета роботи – розробка та моделювання метрологічних характеристик релейної обмотки трансформатору струму 20 В·А, 110 кВ працюючого у перехідних режимах.

Метод дослідження – аналітичний метод та методи математичного моделювання, які базуються на чисельному розв'язанні нелінійних диференційних рівнянь за допомогою програми розрахунку нелінійних електричних кіл NAR2.

Виконано огляд конструкції та вимоги до трансформатора струму для захисту працюючих в перехідних режимах його роботи. Виконано електромагнітний розрахунок трансформатора струму ТОГ 110–ІІ–ІІ У. Виконано розрахунок міцності корпусу та болтових з'єднань трансформатора струму ТОГ 110–ІІ–ІІ У. Проведено дослідження похибок релейної обмотки типу ТРҮ у перехідних режимах роботи. Для розрахунку миттєвих значень похибок релейної обмотки трансформатору струму запропонована і розроблена його математична модель, яка дозволяє змодельовати метрологічні характеристики релейної обмотки трансформатору струму типу ТРҮ і отримати осцилограми миттєвих значень необхідних величин у залежності від заданих параметрів. З результатів досліджень було отримано важливі залежності миттєвої струмової похибки у перехідних режимах від основних параметрів магнітної системи, були визначені шляхи покращення і погіршення характеристик. Запропонована математична модель може використовуватися для дослідження будь-яких електричних і електромеханічних систем. Вона дозволяє отримувати вихідні діаграми будь-яких характеристик у залежності від вхідних параметрів.

ЗМІСТ

Реферат.....	4
Вступ.....	7
1 Огляд конструкції та вимоги до трансформаторів струму, що працюють в перехідних режимах роботи	8
1.1. Призначення та конструктивні особливості проектуємого трансформатора.....	8
1.2 Конструктивно-технологічні особливості вторинних обмоток.....	10
1.3 Вимоги до трансформаторів струму, що працюють в перехідних режимах роботи.....	13
1.4 Класи трансформаторів струму для захисту.....	20
1.5 Вибір класу трансформатора струму.....	21
1.6 Номінальні характеристики трансформаторів струму для захисту.....	22
2 Електромагнітний розрахунок.....	25
2.1 Розрахунок і обґрунтування первинної обмотки.....	25
2.2 Розрахунок електротермічної стійкості.....	25
2.3 Розрахунок параметрів вторинної обмотки.....	28
2.4 Розрахунок електродинамічної стійкості.....	33
2.5 Розрахунок похибок трансформатора струму.....	35
2.6 Визначення граничної кратності.....	41
2.7 Розрахунок напруги на розімкнених кінцях вторинної обмотки.....	43
2.8 Розрахунок зовнішньої ізоляції.....	44
2.9 Елегазова ізоляція та її розрахунок.....	46
3 Розрахунок міцності корпусу та болтових з'єднань	52
3.1 Розрахунок товщини стінок корпусу.....	52
3.2 Розрахунок випуклих днищ.....	53
3.3 Розрахунок болтових з'єднань.....	54
4 Дослідження похибок релейної обмотки типу ТРҮ у перехідних режимах	

роботи	56
4.1 Обґрунтування математичної моделі та її чисельна реалізація.....	56
4.2 Дослідження похибки релейної обмотки в номінальному режимі.....	60
4.3 Дослідження похибки релейної обмотки в режимі номінального КЗ....	63
4.4 Режим КЗ із включенням у фазу.....	71
4.5 Варіювання параметрів.....	73
Висновки.....	81
Перелік джерел посилань.....	83

ВСТУП

Останні роки характеризуються швидким розвитком енергетики. Енергетика є базовою галуззю, яка визначає розвиток економіки країни. Розвиток енергетики можливий на основі сучасних технологій та обладнання, яке забезпечує високу економічну ефективність, надійність, ресурсозабезпеченість. У зв'язку з цим виникає потреба створення нового високовольтного обладнання, одним з видів якого є трансформатори струму (ТС).

Нажаль системи релейного захисту, що використовуються в Україні, реагують на вже встановлений струм короткого замикання, що призводить до виходу з ладу захищаємого ними електрообладнання ще до спрацювання.

А на фоні номінальних напруг обладнання, що швидко збільшуються, значно збільшуються струми короткого замикання. Все це призводить до необхідності створення нового високовольтного обладнання, що може миттєво реагувати на вище згадані струми.

ТС, що працюють у перехідних режимах реагують на миттєві підвищення струмів у мережах і здатні набагато швидше реагувати на небезпечні перевантаження обладнання. Вони ізолюють силові ланцюги високої напруги від струмових ланцюгів вимірюючи приладів та приладів релейного захисту, а також дозволяють привести різні номінальні струми силових ланцюгів високої напруги до стандартних значень вторинних струмів (1А або 5А). Швидкодія трансформаторів, що пропонуються у десятки разів вища за ті, що використовуються у наших мережах.

Особливо доцільним стає питання похибок трансформаторів струму, оскільки це є одним з найважливіших параметрів.

1 ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЇ ТА ВИМОГИ ДО ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

1.1 Призначення та конструктивні особливості проектуемого трансформатора

Традиційним матеріалом для зовнішньої ізоляції трансформаторів струму зовнішнього встановлення є форфор, стеатит.

Трансформатор струму серії ТОГ -110кВ (опорний газонаповнений трансформатор струму) призначений для передачі сигналу вимірювальної інформації вимірювальним приладам і пристроям захисту й керування в установках змінного струму частотою 50 Гц

Він призначений для роботи в місцевостях не більше ніж 1000 м над рівнем моря.

Трансформатор з номінальною напругою 110кВ виготовляється в класах точності : 0,2; 0,2S; 0,5; 0,5S; I; 5P; I0P.

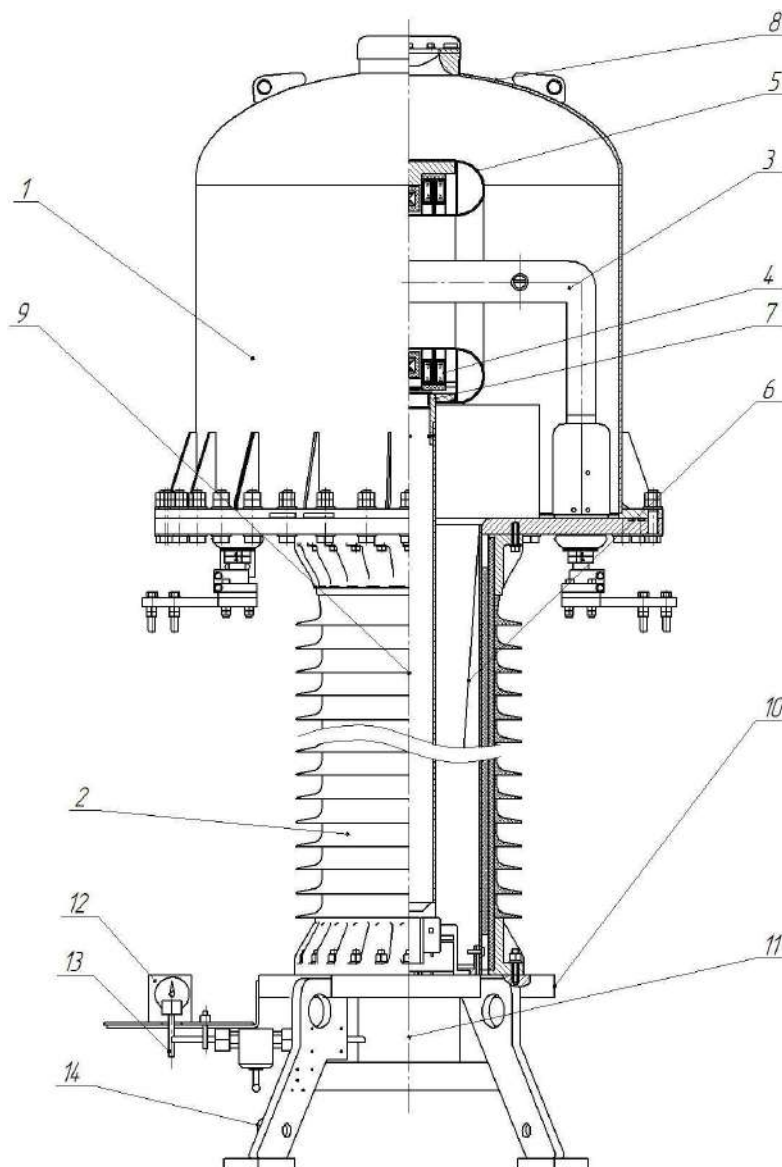
Він являє собою активну частину, що складається з первинної обмотки й комплекту вторинних обмоток, розміщених в підставку.

Активна частина розташована в металевому корпусі, що опирається на полімерну покришку й підставу.

Первинна обмотка складається із двох секцій, що з'єднують послідовно або паралельно за допомогою зовнішньої перемички, що забезпечує наявність двох коефіцієнтів трансформації. Контактні виводи первинної обмотки мають маркування L_1 і L_2 .

Трансформатор має кілька релейних вторинних обмоток й одну вимірювальну.

Трансформатор герметичний, заповнений елегазом до робочого надлишкового тиску усередині трансформатора при температурі 20 °С. Річний витік елегазу повинен бути не більше 1% від маси газу в трансформаторі.



- 1 – корпус; 2 – покришка; 3 – первинна обмотка; 4 – вторинна обмотка;
 5,6 – екрани; 7 – ізолятор; 8 – мембрана; 9 – вторинні виводи; 10 –
 основа;
 11 – коробка виводів; 12 – пристрій для виміру тиску ;13 – вентиль;
 14 – бобишка заземлення; 15 – труба підставки активної частини,
 виконуюча роль нульової обкладки

Рисунок 1.1 – Трансформатор струму $U_{\text{ном}}$ - 110 кВ

У трансформаторі є мембрана необхідна для захисту від надмірного підвищення тиску.

Трансформатор має запірні арматури, манометр, в який входить сигналізуючий пристрій верхнього і нижнього рівня допустимого тиску газу.

Ізоляційна покриття виконана у вигляді комбінованого ізолятора із синтетичного матеріалу, армованого скловолокном з наплавленими силіконовими ребрами.

У коробці вторинних виводів, розташованої на основі трансформатора, розташовані клеми виводів вторинних обмоток, клема «0» нульової обкладки. У трансформаторах напруги 110кВ роль нульової обкладки виконує підставк.

1.2 Конструктивно-технологічні особливості вторинних обмоток

Магнітопровід високовольних трансформаторів струму виготовляють з тонколистової електротехнічної сталі за ГОСТ 214427.3-75. У цей час для виготовлення магнітопроводів трансформаторів струм найбільш широке застосування одержала анізотропна холоднокатана електротехнічна сталь марки 3405. Ця сталь виготовляється у вигляді рулонів, листів або різаної стрічки й має з однієї сторони електроізоляційне термостійке покриття товщиною не більше 5мкм.

Слід лише зазначити, що удари, струси й механічні напруги (наклеп), яким неминує піддається електротехнічна сталь при транспортуванні й обробці (штампуванню, різанню й навивці), приводять до часткового порушення структури сталі, а отже до погіршення її магнітних властивостей. Порушена структура сталі може бути відновлена спеціальним відпалом магнітопровода. Тому всі магнітопроводи трансформатора струму піддаються відпалу.

По конструкції магнітопровід трансформатора струму ТОГ -110

спіральний.

Спіральний (стрічковий) магнітопровід утвориться шляхом навивки рулонної стрічки на циліндричну або овальну оправку. При відсутності рулонної стрічки магнітопровід можуть навивати зі смуг, нарізаних з листа. Довжина кожної смуги повинна перевищувати довжину окружності магнітопровода не менш ніж в 1,5 рази. Якщо довжина листа не достатня, то окремі смуги з'єднуються між собою по довжині точковим зварюванням. Смуги накладаються одна на іншу внахлест з перекриттям 10-20 мм залежно від ширини стрічки її зварюються. Число зварених крапок 5-12. Для зручності транспортування й намотування звичайно зварюються по довжині 2-3 смуги. Перекриття окремих смуг при намотуванні магнітопровода повинні в 2-3 рази перевищувати ширину смуги. Для запобігання розмотування магнітопровода початок і кінець стрічки приварюються до її попередніх витків у декількох крапках. Початок і кінець стрічки можуть бути розташовані в будь-якому місці по окружності магнітопровода. Намотування стрічки або смуг на оправлення виробляються з натягом для одержання щільно намотаного магнітопровода. Спіральні магнітопроводи навиті зі стрічки, мають трохи менші габарити й кращі характеристики, ніж магнітопроводи навиті з окремих смуг. Після цього магнітопровід обмотується одним шаром кіперної стрічки шириною 25 мм ГОСТ 4514-78 з перекриттям $\frac{1}{2}$ по зовнішньому діаметру. По внутрішньому діаметру перекриття стрічки може бути трохи більшим. Останній виток стрічки закріплюється (пришивається). Поверх кіперної стрічки магнітопровід обмотується одним шаром стрічки ЛСНБ шириною 15-20 мм з перекриттям $\frac{1}{2}$ по зовнішньому діаметру. Ізольований таким способом магнітопровід покривається епоксидною смолою.

Після цього він піддається термообробці. В результаті термообробки епоксидна смола твердіє і магнітопровід опиняється в твердому епоксидному каркасі.

При роботі трансформаторів струму магнітопровід трохи нагрівається. Охолодження магнітопроводів здійснюється за рахунок природної віддачі

теплоти в навколишній простір через ізоляцію магнітопровода й вторинну обмотку.

Внутрішній діаметр магнітопровода і його висота вибираються із конструктивних міркувань.

У деяких випадках магнітопровід заземлюється за допомогою приварювання до нього спеціального заземлюючого провідника або яким-небудь іншим способом.

Число витків первинної обмотки при тому самому струмі в значній мірі визначають похибки, які будуть мати трансформатори струму. Збільшення числа витків первинної обмотки дозволяє істотно зменшити похибки трансформаторів струму. Однак збільшення числа витків первинної обмотки приводить до деякого підвищення витрати міді, а також збільшенню маси й вартості трансформаторів струму. Тому в раціональній конструкції трансформатора струму число витків первинної обмотки не повинно бути більшим.

Первинна обмотка шинних трансформаторів струму виконується із твердих провідників прямокутного або круглого (суцільного або трубчастого) поперечного переріза, а також з декількох паралельних шин коробчатого або прямокутного перетину. Поперечний переріз провідника, з якого виготовляється первинна обмотка, визначається на підставі розрахунків на нагрівання.

Ізоляція між витками первинної обмотки при роботі трансформатора струму випробовує вплив напруги промислової частоти, а також газових і комутаційних перенапруг.

Між кінцями первинної обмотки виникає різниця напруг, обумовлена спаданням напруги внаслідок проходження по ній струму.

Міжвиткова ізоляція первинної обмотки здійснюється стрічкою зі склотканини.

Вторинна обмотка виготовляється з однопровідного мідного дроту марки ПЕТВБД діаметром 1,25 мм при вторинному струмі I_A . У тих випадках, коли і

трансформатор струму працює при підвищеній температурі навколишнього повітря, діаметр проводу вторинної обмотки трохи збільшують.

Вторинна обмотка намотується на попередньо ізолюваний магнітопровід. Число витків вторинної обмотки не розміщується по окружності в один шар, тобто вона укладається в чотири шари, причому один шар обмотки відокремлюється від іншого ізоляційною стрічкою, що намотується впівнахлест. Верхній ряд обмотки розподіляється рівномірно по окружності магнітопроводу й обмотується одним-двома шарами ізоляційної стрічки. Вивідні кінці вторинної обмотки звичайно виконуються із гнучкого мідного дроту марки ПЭЛБД з діаметром 2,12 мм. Вивідні кінці припаюються до вторинної обмотки мідно-фосфористим припоєм марки ПМФ-7.

1.3 Вимоги до трансформаторів струму, що працюють в перехідних режимах роботи

Критерії виконання трансформаторів струму класу Р, приведені в цьому розділі, відповідають [1] і відносяться до сталого змінного симетричного первинного струму намагнічення, який дозволяє граничному значенню вторинної ЕРС бути таким, як вказано в МЕК [1].

Вимоги до трансформаторів струму для захисту, враховують додатковий потік, що пов'язує вторинну обмотку від складової постійного струму і струм намагнічення.

Суворо кажучи, обмежуючі умови визначаються інтегралами напруги, яка індукується у вторинній обмотці трансформатора струму, для проведення струму у вторинному контурі, включаючи опір обмотки і вторинного ланцюга, за заданих умов намагнічення. Для зручності математичного виразу, для визначення обмежуючої умови, застосовується еквівалентна синусоїдальна ЕРС (електрорушійна сила).

Для трансформаторів струму, що працюють в перехідних режимах, застосовуються наступні визначення:

- Номінальний первинний струм короткого замикання (I_{psc}) - середньоквадратичне значення первинного симетричного струму короткого замикання, на якому базуються номінальні характеристики трансформатора струму.

- Миттєва струмова похибка (i_ε) - різниця між миттєвими значеннями вторинного струму (i_s) помноженим на номінальний коефіцієнт трансформації (K_n) і первинним струмом (i_p):

$$i_\varepsilon = K_n \cdot i_s - i_p . \quad (1.1)$$

Якщо присутні компонент змінного струму і постійного струму, компоненти окремо вказуються таким чином:

$$i_\varepsilon = i_{ac} + i_{dc} = (K_n \cdot i_{sac} - i_{pac}) + (K_n \cdot i_{sdc} - i_{pdc}) . \quad (1.2)$$

де i_{ac} - компонент змінного струму;

i_{dc} - компонент постійного струму.

Пікове значення миттєвої (повної) похибки ($\tilde{\varepsilon}$) - максимальна миттєва струмова похибка, для заданого робочого циклу, виражена у відсотках пікового миттєвого значення номінального первинного струму короткого замикання, %:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{100 \cdot i_\varepsilon}{\sqrt{2} \cdot i_{psc}} \quad (1.3)$$

Пікове значення миттєвої похибки компоненту змінного струму (ε_{ac}) - максимальна миттєва похибка компоненту змінного струму, виражена у відсотках від пікового миттєвого значення номінального первинного струму

короткого замикання, %:

$$\tilde{\varepsilon}_{ac} = \frac{100 \cdot i_{ac}}{\sqrt{2} \cdot i_{psc}} . \quad (1.4)$$

Задана константа часу первинного струму (T_p) - таке задане значення константи часу компоненти постійного струму первинного струму на якому засновано виконання трансформатора струму. Дане значення може бути також номінальним параметром для трансформаторів струму класів TPX, TPY і TPZ і вказане на таблиці технічних даних.

Допустимий час для граничного значення точності (t_{al}) - час протягом якого підтримується задана точність протягом заданого періоду намагнічення даного циклу.

Цей час зазвичай визначається критичним часом вимірювання відповідної схеми захисту. Якщо стабільна робота схеми захисту є лімітуючою вимогою, може також бути необхідним врахувати час вимагається для вимикача щоб відключити струм.

Час досягнення максимального потоку (t_{max}) - час за період проведення наказаного намагнічення, за яке перехідний магнітний потік в осерді трансформатора струму досягне максимального значення, при цьому вважається, що насичення осердя не відбудеться.

Безструмовий час (при повторному включенні) (t_{fr}) - інтервал часу між перериванням і повторному протіканні первинного струму короткого замикання в ході проведення вимикачем циклу автоматичного повторного включення.

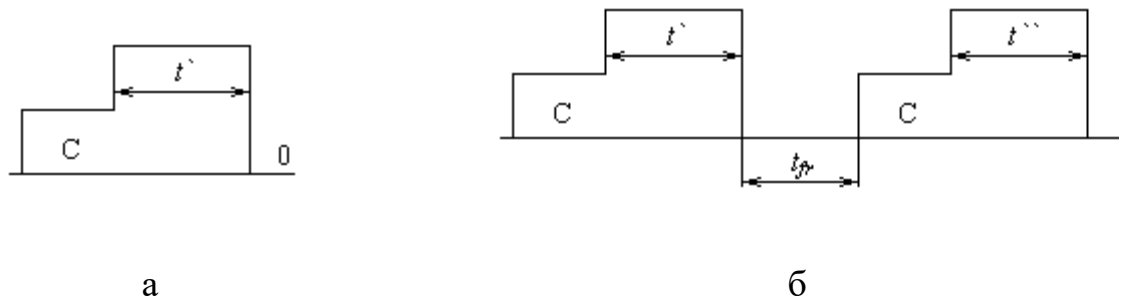
Задані режими циклів (C-0 або C-0-C-0) - режими циклів, в яких, протягом кожного заданого намагнічення, первинний струм, що намагнічує, вважається повністю зміщеним (див. рисунок 2.1), із заданою постійною часу загасання (T_p) при номінальній амплітуді (I_{psc}).

Режими циклів наступні:

- одинарне (разове) намагнічення: $C - t' - 0$;
- подвійне намагнічення: $C - t' - 0 - t_{fr} - C - t''$.

Обидва намагнічення відбуваються при потоку однакової полярності, де:

t' - тривалість першого протікання струму, протягом часу підтримується задана точність; t'' - тривалість другого протікання струму, протягом часу підтримується задана точність.



а) схема $C - t' - 0$;

б) схема $C - t' - 0 - t_{fr} - C - t''$

Рисунок 1.2 – Схеми режимів циклів

Номінальне активне навантаження (R_b) - номінальне значення вторинного активного приєднаного навантаження в Омах.

Опір вторинної обмотки (R_{ct}) - опір вторинної обмотки постійному струму, приведений до 75°C , або до іншої заданої температури.

Опір вторинного контуру (R_s) - повний опір вторинного ланцюга, включаючи опір вторинної обмотки, приведений до 75°C , якщо не задана інша температура, включаючи усі приєднані зовнішні навантаження.

Номінальна константа часу вторинного контуру (T_s) - значення постійної часу вторинного контуру трансформатора струму одержане з суми індуктивностей намагнічення і розсіяння (L_s) і опору вторинного контуру (R_s):

$$T_s = L_s / R_s \quad . \quad (1.5)$$

Коефіцієнт номінального симетричного струму короткого замикання (K_{ssc}) - співвідношення:

$$K_{ssc} = I_{psc} / I_{pn} \quad . \quad (1.6)$$

Коефіцієнт перехідного режиму (K_{tf}) - відношення повного розрахункового вторинного потоку зчеплення до пікового миттєвого значення компоненту змінного струму цього потоку, коли трансформатор струму піддається заданому одиночному намагніченню і вважається, що постійна часу вторинного контуру (T_s) досягла постійного значення у всьому періоді намагнічення.

Трансформатор струму з низьким потоком розсіяння - трансформатор струму по якому знання по вторинних характеристиках намагнічення і опорі вторинної обмотки є достатніми для оцінки його перехідного режиму, при будь-якій комбінації навантаження і режиму циклів, при номінальному, або нижчому значенні первинного симетричного струму короткого замикання, аж до розрахункової межі здатності трансформатора струму витримувати цей струм, визначеної з вторинних характеристик намагнічення.

Трансформатор струму з великим потоком розсіяння - трансформатор струму, який не відповідає вимогам трансформатора струму з низьким потоком розсіяння і для якого виробником зроблені додаткові допущення і заходи по обліку дій призводять до додаткового потоку розсіяння.

Вважається, що такий трансформатор струму задовольнятиме заданому режиму циклу.

Загалом, якщо розрахунковий коефіцієнт параметрів перехідного режиму (K_{td}) задовольняє режим циклу C-0-C-0, тоді точність підтримується протягом циклу C-0 щонайменше, до часу при якому досягається номінальне еквівалентне граничне значення ЕРС (електрорушійної сили) (E_{al}), що

визначена далі.

Номінальне еквівалентне граничне значення вторинної електрорушійної сили ЕРС, (E_{al}) - таке середньоквадратичне значення еквівалентного ЕРС вторинного ланцюга, при номінальній частоті, яке необхідне для задоволення заданого режиму циклу і що витікає з наступного рівняння, В:

$$E_{al} = K_{ssc} \cdot (R_{ct} + R_b) \cdot I_{sn} \quad . \quad (1.7)$$

Номінальна еквівалентна гранична вторинна напруга при намагніченні (U_{al}) - таке середньоквадратичне значення синусоїдальної напруги при номінальній частоті, яка необхідна для забезпечення досягнення номінального еквівалентного граничного значення вторинної електрорушійної сили ЕРС, після належного обліку конструкції трансформатора струму, і яка при додатку до вторинної обмотки трансформатора приведе до того, що струм, що намагнічує, не викличе перевищення максимальної допустимої струмової похибки, відповідної класу трансформатора струму, В.

$$U_{al} = E_{al} \cdot F_c \quad . \quad (1.8)$$

де F_c - коефіцієнт конструкції, визначений далі.

Еквівалентна вторинна ЕРС відповідна граничній точності (E_{alc}) - еквівалентне середньоквадратичне значення ЕРС при номінальній частоті, визначене при випробуваннях, при якій спостережувана струмова похибка відповідає встановленому граничному значенню для класу трансформатора струму.

Струмова похибка є абсолютним значенням, заснованим на заданому значенні первинного струму і не є схильною до будь-яких параметричних змін,

які можуть бути необхідними для досягнення граничних умов для вторинної похибки.

Еквівалентна вторинна напруга відповідна граничній точності (U_{alc}) - таке середньоквадратичне значення синусоїдальної напруги при номінальній частоті, яка якщо прикласти його до вторинної обмотки трансформатора струму, викличе струм намагнічення відповідний максимальній допустимій струмовій похибці, відповідний класу трансформатора струму.

Потік насичення (Ψ_s) - таке пікове значення потоку, яке існувало б у осерді при переході з ненасиченого стану до повністю насиченого стану і, як вважається, було б тією крапкою на характеристиці "В-Н" для даного осердя в якій 10% збільшення "В" приведе до збільшення "Н" на 50%.

Залишковий потік (Ψ_r) - таке значення потоку, який би залишився в осерді через три хвилини після переривання струму намагнічення достатньої величини для індукції потоку насичення Ψ_s , що вказано вище.

Коефіцієнт залишкової намагніченості (K_r) - це відношення:

$$K_r = \Psi_r / \Psi_s . \quad (1.9)$$

Граничний потік відповідаючий заданій точності (Φ_{al}) - пікове значення вторинного потоку зчеплення відповідного E_{al} :

$$\Phi_{al} = \sqrt{2} E_{al} / 2\pi f . \quad (2.10)$$

Якщо E_{al} дане у вольтах, середньоквадратичне значення Φ_{al} виражається у веберах.

Граничне значення точності вторинного струму збудження (I_{al}) - пікове значення струму збудження (похибки), що відповідає класу трансформатора струму.

Коефіцієнт конструкції (F_c) - коефіцієнт, що встановлюється виробником для даної конструкції. Коефіцієнт конструкції визначається з

відношення:

$$F_c = U_{alc} / E_{alc} . \quad (111)$$

1.4 Класи трансформаторів струму для захисту

Трансформатори струму для захисту класифікуються згідно виконуваним функціям таким чином:

- Клас Р: Межа точності визначається повною похибкою ($\tilde{\varepsilon}_0$) при сталому симетричному первинному струмі. Не встановлюється граничне значення для залишкового потоку.

- Клас TPS: Трансформатор струму з низьким потоком розсіювання, виконання якого визначається вторинними характеристиками намагнічення і граничною похибкою співвідношення витків. Не встановлюється граничне значення для залишкового потоку.

- Клас TRX: Граничне значення точності визначається піковим значенням миттєвої похибки ($\tilde{\varepsilon}_0$) протягом певного перехідного циклу. Не встановлюється граничне значення для залишкового потоку.

- Клас TRY: Граничне значення точності визначається піковим значенням миттєвої похибки ($\tilde{\varepsilon}$) протягом певного перехідного циклу. Залишковий потік не повинен перевищувати 10% потоку насичення.

- Клас TRZ: Граничне значення точності визначається піковим значенням миттєвої похибки компоненту змінного струму (ε_{ac}), протягом одиночного намагнічення з максимальним зсувом постійного струму при заданій постійній часу вторинного контуру. Не встановлюється граничне значення похибки компоненти постійного струму. Залишковий потік практично незначний.

1.5 Вибір класу трансформатора струму

Вибір класів трансформаторів TPS, TPX, TPY або TPZ, у багатьох випадках визначається практикою Замовника, що бере до уваги релейне устаткування, яке знаходиться в мережі, для якої трансформатори струму призначені. Деякі з основних характеристик індивідуальних класів, розглядаються нижче.

На додаток до того, що вони є трансформаторами струму з низьким потоком розсіяння, трансформатори струму класу TPS потрібні для здійснення управління коефіцієнтом трансформації витків. Ці обидві вимоги є істотними в схемах захисту пошкоджень фази і замикань на землю, заснованих на простому принципі циркулюючого струму і реле, що застосовують, з великою індуктивністю. Оскільки залишковий потік не має заданої межі, обмеження по вживанню вимірювальних захисних реле звичайно засновані на імперичних формулах, одержаних в результаті досвіду експлуатації і при випробуваннях. Переривання первинного струму, що намагнічує, коли трансформатор струму насичений, приведе до дуже швидкого згасання струму у вторинному ланцюзі, у міру того, як потік падає від рівня насичення до залишкового рівня. Уставки часу для захисних реле звичайно трохи залежать від характеристик згасання трансформаторів струму класу TPS.

Основні характеристики трансформаторів струму класу TPX, загалом, подібні характеристикам трансформаторів струму класу TRS, за винятком відмінності в заданих межах похибок і можливим впливом дій, які залежать від коефіцієнта конструкції більшим, ніж 1.1.

Трансформатори струму класу TPY контролюють залишковий потік до значення не більше ніж 0.1 на одиницю потоку насичення. В ході переходу від насичення до умов залишкового потоку, струм у вторинному ланцюзі

підтримуватиметься на значно вищому рівні і протягом більшого часу, ніж у разі трансформаторів струму TPS або TPX з подібними розмірами і з подібним вторинним приєднанням навантаженням. Для циклу C-0-C-0 коефіцієнт параметрів перехідного режиму необхідні для трансформаторів струму класу ТРУ сильно залежатиме від співвідношення між постійною часу вторинного ланцюга (T_s) і безструмовим часом (t_{fr}).

Оскільки граничне значення повної допустимої похибки 10%, коефіцієнт параметрів перехідного режиму повинен розглядатися спільно з постійною часу вторинного ланцюга.

$$\frac{100K_{td}}{2\pi f T_s} = \varepsilon \leq 10\% \quad (2.12)$$

Для трансформаторів струму класу TPZ залишковий потік є незначним і задаються параметричні межі постійної часу вторинного контуру. Затухаючий вторинний струм, після сильного насичення, підтримуватиметься на вищому значенні, ніж було б у разі трансформатора струму класу ТРУ протягом початкового періоду, що представляє інтерес (час повторної уставки реле). Багато релейних ланцюгів мають магнітні підсилювачі струму і напруги на вводі для перетворення вимірів для обробки. Таким чином, інтерес представляє тільки компонент змінного вторинного струму і регульовальні характеристики значною мірою не залежні від декремента трансформатора струму.

1.6 Номінальні характеристики трансформаторів струму для захисту

Стандартними значеннями K_{ssc} для трансформаторів струму для захисту у виконанні для перехідних режимів є: 3-5-7,5-10-12,5-15-17,5-20-25-30-40-50.

Переважні значення підкреслені.

Стандартні значення для номінальної постійної часу первинного струму (T_p) в мілісекундах, є: 40-60-80-100-120.

Для деяких застосувань можуть бути потрібні вищі значення постійної часу. Наприклад: ланцюги великих турбогенераторів.

Стандартні значення номінального активного навантаження (R_b) в Омах для трансформаторів струму класу TP, засновані на номінальному вторинному струмі I_A є наступними: 2,5-5-7,5-10-15.

Переважні значення підкреслені.

Для трансформаторів струму, що мають номінальний вторинний струм, відмінний від I_A , вищезгадані значення повинні бути визначені в зворотному відношенні до квадрата струму.

Межі похибок для трансформаторів струму TPX, TPY і TPZ, при опорі вторинної петлі відрегульованому до значення $R_s=R_{ct}+R_b$, похибки не повинні перевищувати значень приведених в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Межі похибок трансформаторів струму

Клас	При номінальному первинному струмі			При граничних умовах точності
	Похибка коеф. трансформації, %	Зсув фаз		
		хв	сантирад	Макс. пік миттєва похибка
Т РХ	±0.5	±30	±0.9	10
Т РУ	±1.0	±60	±1.8	10
Т РЗ	±1.0	180±18	5.3±0.6	10

Для деяких застосувань можуть знадобитися відхилення від вищезгаданих значень. Також, абсолютні значення зсуву фаз можуть в деяких

випадках мати менше значення по їх важливості, ніж досягнення мінімального відхилення від середнього значення, даної серії продукції.

Якщо замовник бажає забезпечити сумісність між існуючим устаткуванням і новими виробами, специфікація узгодження може визначити граничні значення деяких параметрів, наприклад, T_s або R_{ct} . Проте, це буде необхідним визнати можливі відмінності між конструкціями. Видання даних по вживанню нових виробів і дані існуючих трансформаторів струму (таблички технічних даних), що іменуються, звичайно досягають прийнятних результатів.

2 ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК

2.1 Розрахунок і обґрунтування первинної обмотки

Визначається поперечний переріз струмопровідної частини первинної обмотки за формулою

$$g_1 = I_{1\text{ном}} / j_1, \quad (2.1)$$

де $I_{1\text{ном}}$ - первинний струм, А;

j_1 - допустима густина струму в первинній обмотці, А/мм², згідно [1]
знаходиться для мідних провідників у межах $0,9 \div 1,8$ А/мм²,
приймається
1,8 А/мм².

$$g_1 = 1500/1,8=833,3 \text{ мм}^2.$$

По одержаному значенню поперечного перерізу і керуючись стандартами ГОСТ 1517.6-89 приймається мідна труба з зовнішнім діаметром 45 мм і внутрішнім 50 мм. Тоді дійсна площа дорівнює $g_{\text{дійсн}} = 375 \text{ мм}^2$.

Керуючись заданим значенням первинного струму задається значення первинної магніторушійної сили первинної обмотки (МРС), виходячи з умови, що $F_{1\text{ном}} \geq 1000 \text{ А}$.

Приймається $F_{1\text{ном}} = 1000 \text{ А}$ і визначається кількість витків первинної обмотки:

$$W_{1\text{ном}} = F_{1\text{ном}} / I_{1\text{ном}} \quad (2.2)$$

де $W_{1\text{ном}}$ – кількість витків у первинній обмотці;

$F_{1ном}$ - прийняте значення МДС первинної обмотки, А, тобто 1000 А;

$I_{1ном}$ - номінальне значення струму первинної обмотки, А, відповідно до завдання 1500 А.

$$W_{1ном} = 1000 / 1500 = 0,7.$$

Приймається 1 виток у первинній обмотці.

2.2 Розрахунок електротермічної стійкості

Термічна стійкість апарату – це його властивість видержувати короточасні теплові дії струму короткого замикання. Ця властивість характеризується номінальним струмом термічної стійкості при заданих значеннях часу термічної стійкості. При цьому температура струмопровідних частин апарату в кінці короткого замикання при цих значеннях струму і часу може бути вище допустимої температури номінального режиму роботи.

Для розрахунку термічної стійкості первинної обмотки вибираємо із вихідних даних струм термічної стійкості - 30000А і час його дії - 3 с.

По графіку залежності температури нагріву теплового імпульсу знаходиться гранична температура нагріву.

Для цього знаходиться значення теплового імпульсу ($j^2 \cdot t$). Густина струму визначається з виразу:

$$j_{т.с.} = I_{т.с.} / q_1, \quad (2.3)$$

де $j_{т.с.}$ - густина струму термічної стійкості, А/мм²;

$I_{т.с.}$ - задане значення струму термічної стійкості, А;

q_1 - площа поперечного перерізу первинної обмотки, мм².

$$j_{т.с.} = 30000 / 375 = 80 \text{ А/мм}^2.$$

Визначимо тепловий імпульс при дії струму короткого замикання

$$A_{к.з.} = j^2 \cdot t_{т.с.} \quad (2.4)$$

де $A_{к.з.}$ - тепловий імпульс від дії струму короткого замикання, $\text{А}^2 \text{ с/мм}^4$;

$t_{т.с.}$ – час дії струму, відповідно до завдання 3 с,

$$A_{к.з.} = 80^2 \cdot 3 = 1,92 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \text{ с/мм}^4.$$

За початкову умову, згідно [1], приймається припустима температура тривалого режиму роботи рівна 90°C .

Розрахунок проводимо по теплових імпульсах згідно [1] по кривим адіабатичного нагрівання для міді. Тепловий імпульс для початкової температури зазначеної вище (позначимо A_d) буде складати:

$$A_d = 1,7 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{мм}^4$$

Для знаходження температури первинної обмотки ТС в режимі короткого замикання знаходимо суму:

$$A_{\Sigma} = A_d + A_{к.з.}, \quad (2.5)$$

Визначимо сумарний тепловий імпульс A_{Σ} :

$$A_{\Sigma} = 1,7 \cdot 10^4 + 1,92 \cdot 10^4 = 3,2 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{мм}^4$$

Користуючись графіком [1] визначається відповідну температуру. Вона

дорівнює 125 °С. Температура первинної обмотки в кінці режиму короткого замикання не повинна перевищувати для міді 250°С. Так як знайдена температура менше припустимої температури: $200 \leq 250$, то в режимі короткого замикання перегріву не відбувається і первинна обмотка є термічностійкою.

2.3 Розрахунок параметрів вторинної обмотки

Для розрахунку похибок трансформатора струму необхідно знати цілий ряд допоміжних даних, визначення яких буде розглянуто далі.

На підставі заданого коефіцієнта трансформації знаходимо номінальне значення витків вторинної обмотки.

Знаючи магніторухісну силу первинної обмотки і номінальний вторинний струм, можна визначити номінальну кількість витків $W_{2\text{ном}}$, витків, за формулою:

$$W_{2\text{ном}} = F_1 / I_{2\text{ном}} \quad (2.10)$$

$$W_{2\text{ном}} = 1500 / 1 = 1500$$

Поперечний переріз проводу вторинної обмотки знаходиться керуючись формулою густини струму, яка для мідного проводу береться в межах від 1,2 до 1,95 А/мм²:

$$g_2 = I_{2\text{ном}} / j_2 \quad (2.11)$$

де g_2 - площа поперечного перерізу проводу вторинної обмотки, мм²;

j_2 - густина струму для вторинних обмоток ТС, А/мм², для мідного проводу

знаходиться в межах від 1,2 до 1,95 А/мм² , приймається 1,95 А/мм²

$$g_2 = 1 / 1,95 = 0,5 \text{ мм}^2.$$

Для знайденого поперечного перерізу за ГОСТ16507-80 приймається з запасом провід ПБ з діаметром дроту вторинної обмотки 0,83 мм по міді, з ізоляцією 0,98 мм, тоді дійсна площа поперечного перерізу проводу складає 0,54 мм².

Вторинні обмотки розміщуються на магнітопроводах кільцеподібної (спіральної) форми. Розміри магнітопроводів в значній мірі впливають на характеристики трансформатора. Так, для підвищення точності ТС намагаються зменшити середню довжину магнітного шляху, або збільшити переріз магнітопроводу. Спіральні магнітопроводи одержують шляхом намотки стрічки (смуги) електротехнічної сталі на оправку, яка визначає форму магнітопроводу (круглий, овальний) і його внутрішній діаметр.

Конструктивно (за даними базового підприємства) внутрішній діаметр магнітопроводу приймається 0,23 м, а зовнішній – 0,35м.

Геометричний поперечний переріз магнітопроводу визначається за формулою:

$$Q = 0,225 \cdot I_{2\text{ном}} \cdot Z_{2\text{ном}} / f \cdot W_{2\text{ном}} \cdot B_{\text{мах}} \cdot \eta \quad (2.12)$$

де Q - поперечний переріз магнітопроводу (геометричне) м² ;

$I_{2\text{ном}}$ - номінальний вторинний струм, А;

f - частота струму, у даному випадку промислова 50 Гц;

$W_{2\text{ном}}$ - номінальне число витків вторинної обмотки;

$B_{\text{мах}}$ - амплітудне значення індукції, Тл, у даному розрахунку знаходиться в межах від 0,04 до 0,1 Тл, приймається 0,1Тл;

η - коефіцієнт заповнення перерізу сталлю, знаходиться в межах від 0,85 до 0,97, приймається 0,97:

$Z_{2\text{ном}}$ - номінальне вторинне навантаження, Ом, згідно вихідних даних дорівнює 1,2:

$$Q = 0,225 \cdot 1 \cdot 30 / 50 \cdot 1500 \cdot 0,1 \cdot 0,97 = 0,0021 \text{ м}^2.$$

Середня довжина магнітного шляху магнітопроводу кільцевої форми знаходимо по формулі:

$$\ell_m = \pi \cdot (d_v + d_3) / 2 \quad (2.13)$$

де ℓ_m - довжина магнітного шляху, м.

$$\ell_m = 3,14 (0,23 + 0,35) / 2 = 0,91 \text{ м.}$$

Маса сталі, яка необхідна для виготовлення магнітопроводу

$$M = Q \cdot \ell_m \cdot \gamma \cdot \eta, \quad (2.14)$$

де M - маса сталі, кг;

γ - густина матеріалу магнітопроводу, кг/м^3 (для електротехнічної сталі $\gamma = 7650 \text{ кг/м}^3$).

$$M = 0,0021 \cdot 0,91 \cdot 7650 \cdot 0,9 = 13,05 \text{ кг.}$$

На ізольований магнітопровід намотується вторинна обмотка. Ізоляцію магнітопроводу виконуємо плівкою ПЕТ – Е 20. Намотуючи вторинну обмотку намагаємося розмістити її витки рівномірно по всьому периметру магнітопроводу. Якщо це вдається, то довжину намотки по магнітопроводу знаходимо так:

$$\ell = \pi \cdot (d_b - 2 \Delta_{iz.}), \quad (2.15)$$

де ℓ - довжина намотки, м

$$\ell = 3,14 \cdot (0,23 - 2 \cdot 0,003) = 0,703\text{м.}$$

Знаючи довжину магнітопроводу, на якій буде розміщений провід вторинної обмотки та діаметр проводу з ізоляцією, знаходимо кількість витків, які можливо розмістити на цій довжині:

$$W_2^{-1} = \ell \cdot K_y / d_{\text{пр}}, \quad (2.16)$$

де W_2^{-1} - можлива кількість витків;

K_y - коефіцієнт якості укладки проводу вторинної обмотки, $(0,9 \div 0,95)$

приймається 0,95;

$d_{\text{пр}}$ - діаметр проводу з ізоляцією, м.

$$W_2^{-1} = 0,703 \cdot 0,95 / 0,00098 = 682\text{м.}$$

Знаходиться число шарів розміщення проводу вторинної обмотки на магнітопроводі:

Так як $W_2^{-1} < W_2$, то обмотка розміщується на магнітопровід в один шар. Провід останнього шару розміщується рівномірно по магнітопроводі.

Середня довжина проводу витка вторинної обмотки може бути знайдена в відповідності з розмірами перерізу магнітопроводу, або по формулі:

$$l_2 = d_p - d_b + 2h_m + 4K \cdot d_n + 0,012, \quad (2.17)$$

де ℓ_2 - середня довжина витка проводу обмотки, м;

h_m - висота магнітопроводу, м; конструктивно приймається 0,03;

K – коефіцієнт який прийнятий для одношарової обмотки -3,25.

$$\ell_2 = 0,35 - 0,23 + 2 \cdot 0,03 + 4 \cdot 3,25 \cdot 2,27 + 0,012 = 0,742 \text{ м.}$$

Після цього знаходимо активний та індуктивний опір вторинної обмотки.

Активний опір вторинної обмотки з урахуванням нагріву:

$$r_2 = \rho_t \ell_2 W_{2\text{ном}}/q_2, \quad (2.18)$$

де r_2 - значення активного опору, Ом;

ρ_t -питомий електричний опір проводу вторинної обмотки з урахуванням нагріву, Ом · м, приймається $2,05 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

$$r_2 = 2,05 \cdot 10^{-8} \cdot 0,742 \cdot 1500 / 0,54 \cdot 10^{-6} = 42,24 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір вторинної обмотки при її рівномірному розміщенні по магнітопроводу дорівнює нулю:

$$X_2 = 0$$

Активний опір навантаження вторинної обмотки знаходиться:

$$r_{2\text{н}} = Z_{2\text{ном}} \cdot \cos\varphi_2, \quad (2.19)$$

де $r_{2\text{н}}$ - активний опір навантаження вторинної обмотки, Ом;

$Z_{2\text{ном}}$ - номінальне навантаження вторинної обмотки, Ом

$\cos\varphi_2$ - коефіцієнт потужності навантаження, згідно завдання дорівнює 0,8:

$$r_{2\text{н}} = 30 \cdot 0,8 = 24 \text{ Ом.}$$

Аналогічно, індуктивний опір навантаження, Ом:

$$X_{2H} = Z_{2ном} \cdot \sin \varphi_z, \quad (2.20)$$

$$X_{2H} = 30 \cdot 0,6 = 18 \text{ Ом.}$$

Повний опір вторинного ланцюгу обмотки і навантаження знаходиться по формулі:

$$Z_{2п} = \sqrt{(r_2 + r_{2H})^2 + (x_2 + X_{2H})^2} \quad (2.21)$$

де $Z_{2п}$ - повний опір вторинного ланцюгу, Ом:

$$Z_{2п} = \sqrt{(42,24 + 24)^2 + (0 + 18)^2} = 68 \text{ Ом.}$$

Кут зсуву фаз між вторинним струмом I_2 і вторинною ЕРС E_z знаходиться по формулі:

$$\alpha = \arctg (x_2 + x_{2H}) / (r_2 + r_{2H}) \quad (2.22)$$

$$\alpha = \arctg 18 / (42,24 + 24) = 40,8^\circ$$

2.4 Розрахунок електродинамічної стійкості

Механічні сили, які виникають в струмопроводі між окремими частинами або між з'єднаними струмопроводами при проходженні по ним струму називаються електродинамічними.

Електродинамічна сила, згідно літератури [1], визначається за формулою:

$$F_{\text{ел.д.}} = 10^{-7} \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{к.з.}} \cdot 2 \left\{ \ln \left[(2a/r)/1 + \sqrt{1 + (a/h)^2} \right] + 0,25 \right\} \quad (223)$$

де $F_{\text{ел.д}}$ – електродинамічна сила, яка тисне на обмотку, Н;

a – міжвісьова відстань, м, згідно класу напруги конструктивно приймається

0,55;

h – довжина первинної обмотки, м; конструктивно приймається 0,331 м;

r – зовнішній радіус обмотки, 0,275.

$$F_{\text{ел.д.}} = 10^{-7} \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 30000^2 \cdot 2 \left\{ \ln \left[(2 \cdot 0,9/0,027)/1 + \sqrt{1 + (0,9/0,425)^2} \right] + 0,25 \right\} = 4031,69 \text{ Н.}$$

Визначаються електродинамічні сили на розрив:

$$\sigma_p = F_{\text{ел.д}} / g_{\text{дійсн}} \leq \sigma_{\text{р.доп}}, \quad (2.24)$$

де σ_p – електродинамічна сила на розрив, МПа;

$\sigma_{\text{р.доп}}$ – допустиме значення сили розриву, МПа, для міді складає 245 МПа.

$$\sigma_p = 4031,69 / 375 \cdot 10^{-6} = 10,8 \cdot 10^6 \text{ МПа.}$$

Так як $10,8 < 245$ МПа, розриву первинної обмотки не буде. Отже, первинна обмотка трансформатора струму електродинамічностій

2.5 Розрахунок похибок трансформатора струму

Дійсне значення вторинного струму завжди має відхилення від номінального значення, тому що мають місце втрати енергії в самому трансформаторі.

Розпізнають похибку по струму і по куту.

Розрахунок похибок ТС на практиці проводять для двох найбільш важких режимів роботи:

- для 5% первинного струму і 100% вторинного навантаження для гірших сортів сталі.
- для 120% первинного струму і 25% вторинного навантаження при кращих сортах сталі.

В першому випадку матимемо найбільшу мінусову, а в другому – найбільшу плюсову похибки.

Розрахунок найбільшої мінусової похибки проводимо в такій послідовності.

Знаходимо значення струму в первинній обмотці для першого режиму роботи:

$$I_1 = 0,05 \cdot I_{1\text{ном}}, \quad (2.25)$$

де I_1 - значення струму первинної обмотки, А.

$$I_1 = 0,05 \cdot 1500 = 75\text{А}.$$

Знаходимо значення МРС первинної обмотки, А:

$$F_1 = 0,05 \cdot F_{1\text{ном}}, \quad (2.26)$$

де - F_1 - первинна МРС при розрахунку негативної похибки, А:

$$F_1 = 0,05 \cdot 1500 = 75A.$$

Струм для вторинної обмотки знаходимо по формулі:

$$I_2 = 0,05 \cdot I_{2\text{ном.}}, \quad (2.27)$$

де I_2 - значення струму вторинної обмотки в першому режимі, А.

$$I_2 = 0,05 \cdot 1 = 0,05A.$$

Знаходимо значення ЕРС вторинної обмотки, В:

$$E_2 = Z_{2\pi} \cdot I_2, \quad (2.28)$$

де E_2 - вторинна ЕРС, В

$$E_2 = 34 \cdot 0,05 = 1,7B.$$

Знаходиться максимальне значення індукції для цього режиму, Тл по формулі:

$$B_{\text{max}} = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot E_2 / W_{2\text{ном}} \cdot Q, \quad (2.29)$$

де B_{max} – максимальне значення індукції, Тл;

Q – площа поперечного перерізу магнітопроводу, m^2 , дорівнює 0,0014 m^2 .

$$B_{\text{max}} = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,7 / 1500 \cdot 0,0021 = 0,009Tл.$$

По таблиці (по графіку) для знайденого значення магнітної індукції знаходиться питома МРС намагнічування гірших сортів електротехнічної сталі

$$F_{o,пт.} = f (B_{max.})$$

$$F_{o,пт.} = 0,752 \text{ А/м}$$

Знаючи питому МРС намагнічування знаходимо повне значення МРС, А:

$$F_o = F_{o,пт.} \cdot \ell_m, \quad (2.30)$$

де F_o - повне значення МРС, А

$$F_o = 0,752 \cdot 0,91 = 0,68 \text{ А.}$$

По кривій (таблиці) кута втрат для значення індукції знаходиться значення кута втрат ψ для гірших сортів сталі, який становить 10° . Проводиться розрахунок номінальної струмової похибки:

$$f_i = F_o / F_1 [\sin (\psi + \alpha)] \cdot 100, \quad (2.31)$$

де f_i - значення токової негативної погрішності, %.

$$f_i = 0,68 / 75 [\sin (10^\circ + 40,8^\circ)] \cdot 100 = 0,71\%$$

Знаходиться похибка по куту:

$$\sigma = F_0 / F_1 [\cos (\psi + \alpha)] \cdot 3440 \quad (2.32)$$

$$\sigma = 0,68 / 75 [\cos (10^0 + 40,8)] \cdot 3440 = 19,96^0$$

Розрахунок плюсової похибки проводиться в такій послідовності:

- знаходиться активний опір навантаження для другого режиму роботи,

Ом:

$$r_{2H} = 0,25 \cdot Z_{2ном} \cos \cdot \varphi_2, \quad (2.33)$$

$$r_{2H} = 0,25 \cdot 30 \cdot 0,8 = 6 \text{ Ом.}$$

- індуктивний опір навантаження для цього режиму роботи:

$$X_{2H} = 0,25 Z_{2ном} \cdot \sin \varphi_2 \quad (2.34)$$

$$X_{2H} = 0,25 \cdot 30 \cdot 0,6 = 4,5 \text{ Ом.}$$

Знаходиться повний опір вторинного ланцюгу обмотки і навантаження з урахуванням умов другого режиму роботи:

$$Z_{2\Pi} = \sqrt{(r_2 + r_{2H})^2 + (x_2 + x_{2H})^2} \quad (2.35)$$

$$Z_{2\Pi} = \sqrt{(0,197+24)^2 + (0 + 4,5)^2} = 24,6 \text{ Ом.}$$

Кут зсуву фаз між вторинним струмом і вторинної ЕРС знаходиться по формулі:

$$\alpha = \arctg (x_2 + x_{2H}) / (r_2 + r_{2H}) \quad (2.36)$$

$$\alpha = \arctg (0 + 0,5) / (0,197 + 24) = 3,2^\circ$$

Значення струму в первинній обмотці для другого режиму роботи знайдеться з виразу:

$$I_1 = 1,2 \cdot I_{1\text{ном}}, \quad (2.37)$$

де I_1 - значення струму первинної обмотки, А.

$$I_1 = 1,2 \cdot 1500 = 1800 \text{ А.}$$

Знаходиться значення МРС первинної обмотки:

$$F_1 = 1,2 \cdot F_{\text{ном}} \quad (2.38)$$

$$F_1 = 1,2 \cdot 1500 = 1800 \text{ А.}$$

Струм вторинної обмотки в другому режимі роботи знайдеться так:

$$I_2 = 1,2 \cdot I_{2\text{ном}} \quad (2.39)$$

де I_2 - значення струму вторинної обмотки, А.

$$I_2 = 1,2 \cdot 1 = 1,2 \text{ А.}$$

Знаходиться значення ЕРС вторинної обмотки для другого режиму роботи по (2.34), а потім по (2.35) знаходиться і значення магнітної індукції:

$$E_2 = Z_{2\pi} \cdot I_2, \quad (2.40)$$

$$E_2 = 24,6 \cdot 1,2 = 29,52\text{В.}$$

$$B_{\max} = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot E_2 / W_{2\text{ном}} \cdot Q \quad (2.41)$$

$$B_{\max} = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 36 / 1500 \cdot 0,0021 = 0,05143\text{Тл.}$$

По таблиці (по графіку) для знайденого значення магнітної індукції знаходиться питома МРС намагнічування для кращих сортів електротехнічної сталі, А/см:

$$F_{\text{о.пит}} = f(B_{\max})$$

де $F_{\text{о.пит}}$ - питома МРС намагнічування для кращих сортів електротехнічної сталі, А/см

$$F_{\text{о.пит}} = 2,35 \text{ А/см.}$$

Знаючи питому МРС намагнічування знаходиться повне значення МРС по (34), потім по кривій (таблиці) кута втрат для знайденого вище значення індукції знаходиться значення кута ψ^0 для кращих сортів сталі, яке становить 34^0

$$F_o = F_{\text{о.пт.}} \cdot \ell_m, \quad (2.42)$$

$$F_o = 2,35 \cdot 0,91 = 2,139 \text{ А/см.}$$

По (2.35) проводиться розрахунок номінальної струмової похибки другого режиму роботи:

$$f_i = F_o / F_1 [\sin(\psi + \alpha)] \cdot 100 \quad (2.43)$$

$$f_i = 2,139/1500[\sin (35,5^\circ + 8,8^\circ)] \cdot 100 = 0,1$$

а по (2.36) похибки по куту, °

$$\sigma = F_0 / F_1 [\cos (\psi + \alpha)] \cdot 3440 , \quad (2.44)$$

$$\sigma = 2,139/1500 [\cos (35,5^\circ + 3,2^\circ)] \cdot 3440 = 3,5^\circ$$

Отримані значення номінальної струмової похибки і по куту зрівнюються з допустимими значеннями по ДСТУ ГОСТ7746 -2003, або по [1] і знаходиться, що розрахований трансформатор струму відповідає класу точності 0,2S і 10P, тому виткову корекцію проводити не вимагається.

2.6 Визначення граничної кратності

Для захисних і комбінованих ТС найвідповідальніший режим роботи настає при різкому підвищенні струму в первинній обмотці, яке відбувається, як правило, при короткому замиканні в електричній мережі. ТС повинен забезпечити в цьому випадку надійну роботу релейного захисту, тобто давати вторинний струм, похибка якого не перебільшує 5-10% при максимально допустимій індукції, яка дорівнює 1,8 Тл для електротехнічної сталі 3414.

Так як вимірювальна обмотка має такі ж самі розміри, як захисні, то розрахунок граничної кратності ведеться за розрахунками вимірювальної обмотки, які були прораховані в попередніх пунктах.

Зважаючи що кратність первинного і вторинного струмів однакова, з формули для визначення магнітної індукції знаходиться гранична кратність

$$K_{гр} = B_{гр} f W_2 Q / 0,225 I_{2ном} \cdot Z_{2П} \quad (2.45)$$

де $K_{гр}$ - гранична кратність;

$B_{гр}$ - гранична магнітна індукція, Тл.

$$K_{гр} = 1,8 \cdot 50 \cdot 1500 \cdot 0,0021 / 0,225 \cdot 1 \cdot 34 = 24,7$$

По значенню індукції, використовуючи залежність, знаходимо питому МРС (А/м):

$$F_{о.пт} = f(B_{гр})$$

$$F_{о.пт} = 670 \text{ А/м.}$$

Потім по (2.34) знаходимо повне значення намагнічування, А:

$$F_o = F_{о.пт.} \cdot \ell_m \quad (2.46)$$

$$F_o = 670 \cdot 0,91 = 610 \text{ А.}$$

Значення МРС первинної обмотки знаходиться по формулі, А:

$$F_1 = K_{гр.} \cdot F_{1ном} \quad (2.47)$$

$$F_1 = 24,7 \cdot 1500 = 37050 \text{ А}$$

Знаючи значення МРС намагнічування і первинної обмотки проводимо розрахунок повної похибки:

$$\varepsilon = 100 \cdot F_0 / F_1 \quad (2.48)$$

$$\varepsilon = 100 \cdot 610 / 37050 = 1,6$$

Так як повна струмова похибка не перебільшує 10%, то розрахункове значення граничної кратності приймається.

2.7 Розрахунок напруги на розімкнених кінцях вторинної обмотки

При розмиканні вторинної обмотки працюючого ТС в його вторинному ланцюгу зникає струм, і, як слідство, зникає його розмагнічуюча дія на магнітопровід. Первинний струм при цьому стає намагнічуючим, тобто $I_1 = I_0$. Це приводить до появи великої ЕРС у вторинній обмотці і до сильного насичення заліза магнітопроводу.

Для знаходження напруги на розімкнутих кінцях вторинної обмотки необхідно знайти значення питомої МРС намагнічування цього режиму роботи

$$F_{\text{опт}} = F_1 / \ell_m \quad (2.49)$$

$$F_{\text{опт}} = 1500 / 0,91 = 1648,4 \text{ А},$$

Використовуючи залежність питомої напруги від питомої МРС намагнічування $E_{\text{пт}} = f(F_{\text{опт}})$ для заданної марки сталі, знаходиться значення питомої напруги, яке дорівнює $E_{\text{пт}} = 1,5 \text{ кВ}$.

Напруга на розімкнутих кінцях вторинної обмотки розраховується за формулою:

$$E_2 = E_{\text{пт}} \cdot W_2 \cdot Q \quad (2.50)$$

$$E_2 = 1500 \cdot 1500 \cdot 0,0021 = 4725 \text{В.}$$

Напруга на розімкнутих кінцях вторинної обмотки може досягти високих значень (до десятків кіловольт), що показує на аварійність цього режиму для ТС.

2.8 Розрахунок зовнішньої ізоляції

Трансформатори струму можуть працювати в різноманітних умовах і до цих умов повинна бути пристосована їх ізоляція. Вони можуть установлюватись в закритих приміщеннях, на відкритих площадках, розподільчих будов, в районах з забрудненим повітрям, в районах з низькими і високими температурами, а також на висоті 1000м і більше над рівнем моря. В відповідності до цих умов висовуються вимоги до ізоляції.

По найбільшій робочій напрузі ТС визначають сухорозрядну, мокророзрядну і імпульсну напруги за ГОСТ 1516.1 – 76.

По знайденим значенням напруги розраховуються різні відстані, тобто відстані між електродами по формулі:

$$h_1 = (U_{\text{сух}}/3,95)^{1/0,93} \quad (2.51)$$

$$h_1 = U_{\text{мокр}}/2,15 \quad (2.52)$$

$$h_1 = U_{\text{імп}}/5,15 \quad (2.53)$$

де h – активна висота покритишки, см

$$h_1 = (295/3,95)^{1/0,93} = 101 \text{см}$$

$$h_1 = 215 / 2,15 = 100 \text{ см}$$

$$h_1 = 480 / 5,15 = 93,2 \text{ см.}$$

Із одержаних трьох результатів вибирається найбільша відстань між електродами і розраховується висота покритишки:

$$H_a = h_{\max} \cdot k \quad (2.54)$$

де k – коефіцієнт запасу, який становить 10%.

$$H_a = 101 \cdot 1,1 = 111,1 \text{ см.}$$

Визначається загальна довжина шляху витoku по поверхні покритишки, $L_{\text{вит}}$, см за формулою:

$$L_{\text{вит}} = U_{\text{н.р}} \cdot l_{\text{пт.втр}} \quad (2.55)$$

$$L_{\text{вит}} = 110 \cdot 1,5 = 165 \text{ см.}$$

Визначається кількість ребер, n , за формулою:

$$n = L_{\text{вит}} / 100 \quad (2.56)$$

$$n = 1650 / 100 = 16,5$$

Приймається 17 ребер.

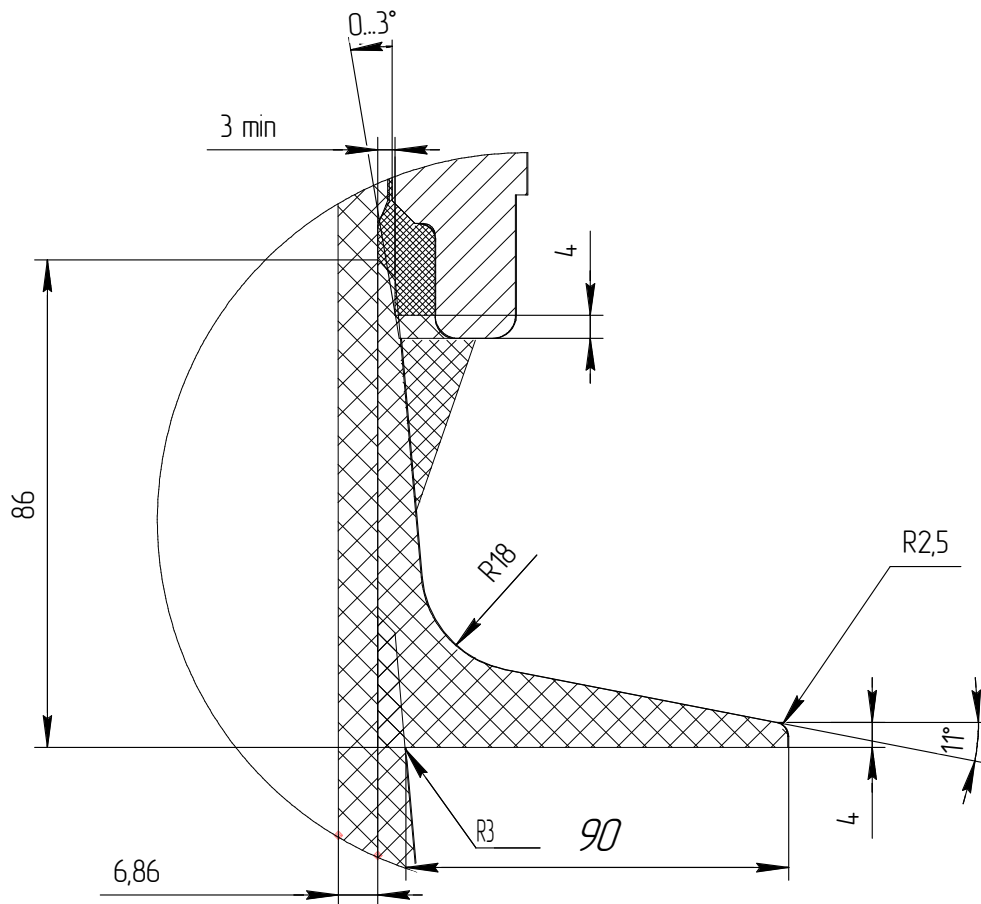


Рисунок 2.1 – Ескіз ребра

2.9 Елегазова ізоляція та її розрахунок

2.9.1 Електрична стійкість елегазових проміжків

В наш час в АВН все ширше знаходить використання елегаз SF₆, який поєднує високу електричну стійкість та високу дугогасну спроможність. Вперше він був вивчений Б. М. Гохбергом, який і назвав його так скорочено від слів “електричний газ”.

Елегаз не має кольору та запаху. Він практично не розчиняється у воді та трансформаторному маслі. В чистому вигляді не горючий, нагрівається до

800°C.

Елегаз у порівнянні з повітрям має ряд переваг : його електрична міцність в 2,5 рази вища, ніж у повітря; питома об'ємна теплоємність приблизно в 4 рази вища, ніж у повітря; дугогасна спроможність камери повздовжнього дуття з елегазом в 5 раз вища, ніж з повітрям; мала напруженість електричного поля в стовбурі дуги дозволяє подовжити строк служби контактів, так різко скорочується їх знос; хімічно чистий елегаз є інертним і до температури 180°C не реагує на будь-які матеріали, які використовуються в АВН. При більш високих температурах не рекомендується застосовувати матеріали та сплави , які вміщують кремній При тиску порядку 0,2МПа електрична стійкість елегаза наближається до стійкості трансформаторного масла.

Під впливом дуги чи корони відбувається розклад елегаза з утворенням хімічно активних сполук, які можуть викликати руйнування ізоляційних та конструктивних матеріалів. Продукти розкладу елегаза під час дотику з вологою повітря можуть утворює небезпечні сполуки.

Технічний елегаз отримують шляхом прямої реакції сполуки між розплавленою сіркою та газоподібним фтором, який отримують під час електролізу розчину фтористого калія у фтористоводневій кислоті. Кількість домішок в технічному елегазі повинно бути мінімальним.

Недоліками елегазу є висока температура зжиження та відносно висока вартість. При тиску 1.3МПа та температурі 0°C починається зжиження елегазу, тому при такому тиску вже при додатковій температурах треба вмикати систему підігріву. В наш час , як правило, використовується елегаз при тиску 0.7МПа. При атмосферному тиску 0.1МПа елегаз може знаходитись в газоподібному чи твердому стані.

Елегазові АВН повинні мати якісні конструкційні матеріали зовнішніх оболонок та надійні ущільнення для збереження якості та кількості елегазу.

На ізоляційні проміжки в елегазі значно впливає конфігурація електричного поля між різними елементами струмоведучого контуру, які

знаходяться під великим тиском та іншими частинами апарата.

Електрична міцність одна із основних характеристик ТС, яка визначає його придатність до роботи. Розміри ізоляції суттєво впливають на масу і габарити ТС. Ось чому створення раціональної ізоляції в конструкції має таке важливе значення. В трансформаторі в якості ізоляції між обмотками використовується елегаз, що є кращим у порівнянні з повітрям, тому що його електрична міцність у 2,5 рази вище, ніж у повітря; питома об'ємна теплоємність у 4 рази вища; мала напруженість електричного поля дозволяє продовжити строк служби контактів. Вона забезпечує найбільшу електричну міцність і проста в виконанні в порівнянні з другими видами ізоляції при збереженні порівняно відповідних габаритів.

Розрахунок газових ізоляційних проміжків проводиться шляхом порівняння максимальної напруги електричного поля на поверхні електродів з допустимою напругою. При розрахунку напруг форма і розташування електродів, які мають у розрахунковому трансформаторі, зводиться до найпростіших форм.

2.9.2 Розрахунок ізоляційних проміжків в елегазі

Коефіцієнт запасу визначається за формулою

$$k_E = \frac{E_{\text{доп}}}{E_{\text{імп}}}, \quad (2.57)$$

де $E_{\text{доп}}$ – допустима напруженість, В/мм;

$E_{\text{імп}}$ – напруженість електричного поля на поверхні електродів при імпульсній напрузі, В/мм.

$$k_E = \frac{20}{11,4} = 1,754 \text{ В/мм.}$$

Отримані коефіцієнти запасу повинні бути уточнені по результатам випробувань дослідних трансформаторів.

Напруженість поля при індуктивній напрузі визначається за формулою:

$$E_{ind} = E_{imp} \cdot \frac{U_{ind}}{U_{imp}}, \text{ кВ} \quad (2.58)$$

де U_{imp} - досліджувальна напруга повного імпульсу, максимальне значення, кВ;

U_{ind} – індуктивна напруга.

$$E_{ind} = 11,4 \cdot \frac{230}{550} = 4,768 \text{ кВ.}$$

Напруженість поля при робочій напрузі визначається за формулою:

$$E_{роб} = E_{imp} \cdot \frac{U_{роб}}{U_{imp}}, \text{ кВ} \quad (2.59)$$

де $U_{роб}$ – робоча напруга, кВ.

$$E_{роб} = 11,4 \cdot \frac{110}{550} = 2,28 \text{ кВ.}$$

Розрахункова формула залежить від розташування і форми електрода (рис.2.2).

Розрахуємо напруженість поля при імпульсній напрузі для точок 1-2:

$$E_{imn} = \frac{U_{imn} \cdot h}{r \cdot (H - r) \cdot \ln \frac{H + h}{r}}, \text{кВ} \quad (2.60)$$

де $h = \sqrt{H^2 + r^2}$, мм;

r – радіус електрода, мм;

H – відстань між електродами, мм.

$$E_{imn} = \frac{550 \cdot 328,6}{210 \cdot (390 - 210) \cdot \ln \frac{390 + 328,6}{210}} = 11,4 \text{ кВ.}$$

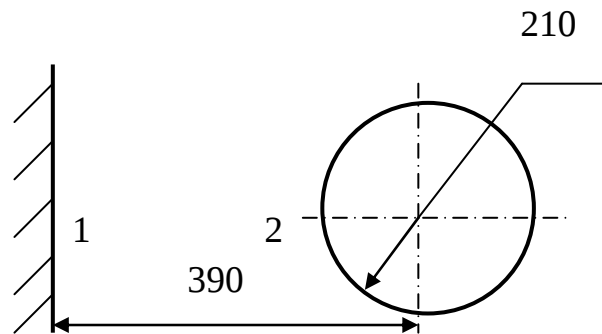


Рисунок 2.2 – Циліндр-площина

Розрахуємо напруженість поля при імпульсній напрузі для точок 3-4, (рис. 2.3):

$$E_{imn} = \frac{U_{imn} h}{r_1 (H_1 - r_1) \ln \frac{(H_1 + h) r_2}{(H_2 - h) r_1}}, \quad (2.61)$$

де r_1 , r_2 – радіуси електродів, $r_1 = 25$ мм, $r_2 = 315$ мм.

$$h = \sqrt{H_1^2 - r_1^2}, \quad h = \sqrt{192_1^2 - 25_1^2} = 190.3 \text{ мм};$$

$$H_1 = H + \frac{r_1^2 - r_2^2}{4H}, \quad H_1 = 280 + \frac{25^2 - 315^2}{4 \cdot 280} = 192 \text{ мм}$$

$$E_{имп} = \frac{550 \cdot 190.3}{25 \cdot (192 - 25) \ln \frac{(192 + 190.3) \cdot 315}{(368 - 190.3) \cdot 25}} = 7.59, \text{ кВ / мм.}$$

$$K_e = \frac{20}{7.59} = 2.63$$

$$E_{инд} = 7.59 \cdot \frac{230}{550} = 3.173 \text{ кВ / мм}$$

$$E_{роб} = 7.59 \cdot \frac{110}{550} = 1.518 \text{ кВ / мм.}$$

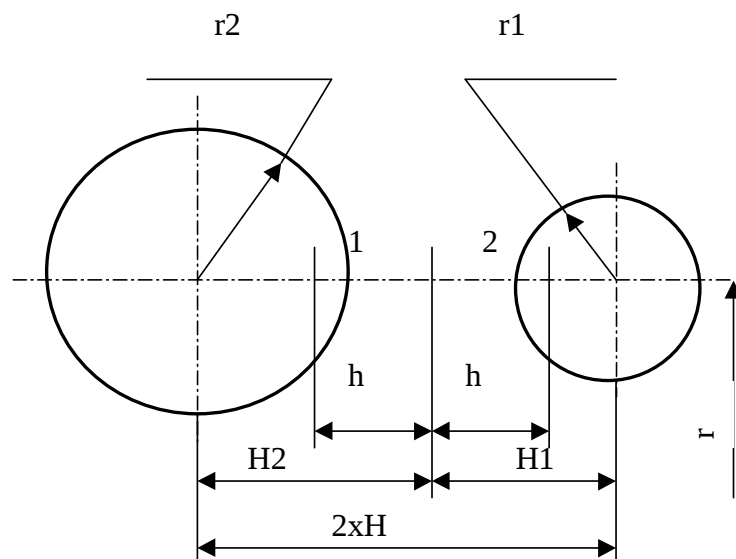


Рисунок 2.3 – паралельні циліндри

З проведених розрахунків видно, що k_3 у всіх випадках достатній

3 РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ КОРПУСУ ТА БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ

3.1 Розрахунок товщини стінок корпусу

Товщина стінки корпусу

$$S = \frac{P_{\epsilon} D_{3\epsilon}}{200 \phi \sigma_{\partial on} + P_{\epsilon}} + C, \quad (3.1)$$

де P_{ϵ} - випробувальна напруга, $P_{\epsilon} = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$;

$D_{3\epsilon}$ - зовнішній діаметр обичайки, $D_{3\epsilon} = 830 \text{ мм}$;

ϕ - коефіцієнт послаблення зварного шву, $\phi = 1$;

$\sigma_{\partial on}$ - допустима напруга, $\sigma_{\partial on} = 1.3 \cdot 10^6 \text{ Па}$;

C – надбавка до розрахункової товщини стінки, $C = 1.09 \text{ мм}$

$$S = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 1112}{200 \cdot 1 \cdot 1.3 \cdot 10^6 + 8 \cdot 10^5} + 1.09 = 3.6 \text{ мм}.$$

Приймається товщина стінки корпусу 5мм.

Повинна виконуватись умова $\frac{S-C}{D_{3\epsilon}} \leq 0.25$

$$\frac{S-C}{D_{3\epsilon}} = \frac{5-1.09}{830} = 0.0047$$

Так як умова виконується, то обрана конструкція корпусу задовольняє вимогам міцності.

3.2 Розрахунок випуклих днищ

Товщина стінки випуклого еліптичного днища:

$$S = \frac{P_{\epsilon} D_{\epsilon}}{400 z \sigma_{\partial on} + P_{\epsilon}} \cdot \frac{D_{\epsilon}}{2 h_{\epsilon}} + C_1, \quad (3.2)$$

де D_{ϵ} - внутрішній діаметр днища, $D_{\epsilon} = 688\text{мм}$;

z – коефіцієнт, який враховує послаблення днища отвором;

h_{ϵ} - висота днища, $h_{\epsilon} = 290\text{мм}$;

C_1 – надбавка до розрахункової товщини днища, $C_1 = 1.29\text{мм}$

$$S_1 = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 688}{4001 \cdot 1.3 \cdot 10^6 + 8 \cdot 10^5} \cdot \frac{688}{2 \cdot 290} + 1.29 = 3.5\text{мм}.$$

Приймається товщина стінки випуклого днища 5мм:

$$\frac{S - C_1}{D_{\epsilon}} = \frac{5 - 1.29}{688} = 0.0053,$$

$$0.0043 \leq 0.25.$$

Так як умова виконується, то обрана конструкція корпусу задовольняє вимогам міцності.

3.3 Розрахунок болтових з'єднань

Сила відриваюча корпус від фланця

$$Q = \frac{\pi D}{4} \cdot P_{\epsilon}, \text{ Н} \quad (3.3)$$

Контактний тиск

$$P_{\kappa} = \frac{\epsilon}{1-\epsilon} \cdot E_{\text{сж.к}} 10^5, \text{ Па}, \quad (3.4)$$

де $E_{\text{сж.к}}$ – модуль пружності, Па;

ϵ – відносне деформування ущільнень, %.

Поверхня ущільнень

$$S_y = \frac{\pi(D_1^2 - D_2^2)}{4}, \text{ см}^2, \quad (3.5)$$

де D_1 – зовнішній діаметр канавки під ущільненням, $D_1=120.5\text{см}$;

D_2 – внутрішній діаметр канавки під ущільненням, $D_2=117.5\text{см}$;

$$S_y = \frac{\pi(120.5^2 - 117.5^2)}{4} = 560.8 \text{ см}^2.$$

Сила, яка необхідна для створення контактного тиску в ущільненні:

$$Q_1 = P_k S_y, \quad (3.6)$$

$$Q_1 = 25.7 \cdot 560.8 = 14412 \text{ Н}.$$

Зусилля, яке приходить на один болт:

$$Q_{\Sigma} = Q + Q_1 = 76027 + 14412 = 90438 \text{ Н}.$$

Зусилля, яке приходить на один болт:

$$q_i = \frac{Q_{\Sigma}}{i}, \quad (4.7)$$

де i – кількість болтів, $i = 36$,

$$q_i = \frac{90438}{36} = 2512 \text{ Н}.$$

Умова міцності:

$$q_i \leq [q_{\text{доп}}],$$

де $q_{\text{доп}}$ – допустиме зусилля, яке приходить на один болт,

$$q_{\text{доп}} = 5000 \text{ Н}.$$

Так як для даного трансформатора $q_i < [q_{\text{доп}}]$, то обрана конструкція задовольняє вимогам міцності.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБОК РЕЛЕЙНОЇ ОБМОТКИ ТИПУ ТРУ У ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Для розрахунку миттєвих значень похибок релейної обмотки трансформатору струму у перехідних режимах, що була розрахована у розділі 3, на базі підприємства ВАТ «ВІТ» була запропонована і розроблена його математична модель, яку було реалізовано за допомогою програми розрахунку нелінійних електричних кіл NAP2, за допомогою вбудованого мови програмування.

Програма вирішує нелінійні диференціальні рівняння методом Ньютона – Радсона.

Математична модель дозволяє змодельовати метрологічні характеристики релейної обмотки трансформатору струму типу ТРУ і отримати осцилограми миттєвих значень необхідних величин у залежності від заданих параметрів.

4.1 Обґрунтування математичної моделі та її чисельна реалізація

Математична модель, яку було запропоновано базується виключно на основоположних законах Ленцу і Кірхгофа. Вона враховує параметри мережі, до якої приєднується пропонуємий трансформатор струму. В електричне коло математичної моделі добавлено уявну обмотку, що моделює втрати у магнітопроводі і дозволяє побудувати петлю гистерезису, яку було розраховано у розділі 3.4.3. Електричне коло моделі зображено на рис.4.1.

Тут R_s і L_s – параметри мережі (ЛЕП), R_1 , L_1 , R_2 і L_2 – параметри первинної і вторинної обмотки відповідно, w_y і $R_y(B_m)$ – параметри уявної обмотки, які були розраховані у розділі 3.4.3, $E_{дж}$ – ЕРС джерела.

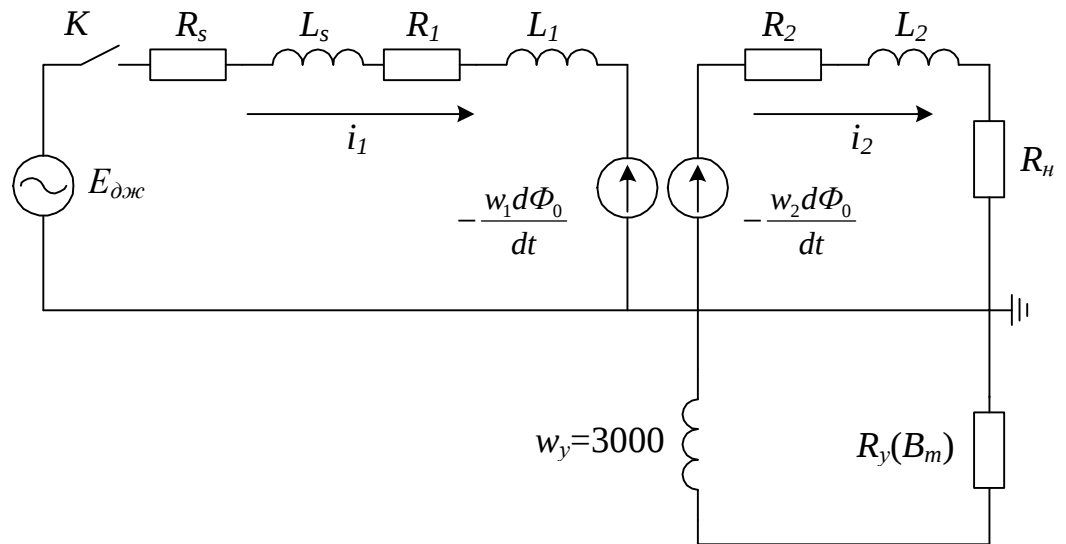


Рисунок 4.1 – Електричне коло математичної моделі релейної обмотки типу ТРҮ

З цієї схеми, постійна часу, яка є заданим параметром повинна визначатись як:

$$\tau = \frac{L_s + L_1}{R_s + R_1} = 0.08 \text{ с.} \quad (4.1)$$

Магнітне коло цієї моделі зображене на рис. 4.2.

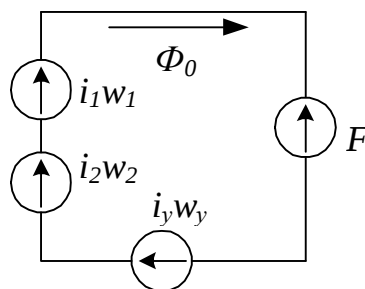


Рисунок 4.2 – Магнітне коло математичної моделі релейної обмотки типу ТРҮ трансформатора струму

Тут F – магніторушійна сила самоіндукції, що врівноважує ЕРС самоіндукції первинної і вторинної обмоток, яка визначається як:

$$F = H_m \cdot l_m + \frac{H_z \cdot h_z}{K_B(H_m)} = i_1 \cdot w_1 + i_2 \cdot w_2 + i_y \cdot w_y, \text{ A}, \quad (4.2)$$

де H_m – напруженість магнітного поля у феромагнетику, А/м;

l_m – довжина магнітного шляху у феромагнетику, м;

H_z – напруженість магнітного поля у зазорі:

$$H_z = \frac{B_m}{\mu_0}, \text{ А/м}; \quad (4.3)$$

де h_z – довжина магнітного зазору, м;

K_B – коефіцієнт випучування магнітного поля в області зазору, що є функцією від H_z .

На базі ВАТ «ВІТ» була приведена польова задача знаходження K_B , і визначення його залежності від H_z . Результати показали, що при H_z , що відповідає значенню індукції B_m від 0 до 2 Тл, при зазорі $h_z=2$ мм, коефіцієнт випучування магнітного поля K_B знаходиться у межах від 1.04 до 1.10. Розрахунок проводився в середовищі програми HLED, яку було розроблено безпосередньо на ВАТ «ВІТ». Також було змодельовано розподілення магнітного поля у зазорі, яке представлено на рис. 4.3. Тут видно, що магнітна індукція має більше значення на внутрішньому діаметрі магнітопроводу, ніж на зовнішньому що зумовлюється меншим магнітним опором з середини.

На рис. 4.4 зображено залежність $K_B=f(B_m)$ для зазору 2 мм.

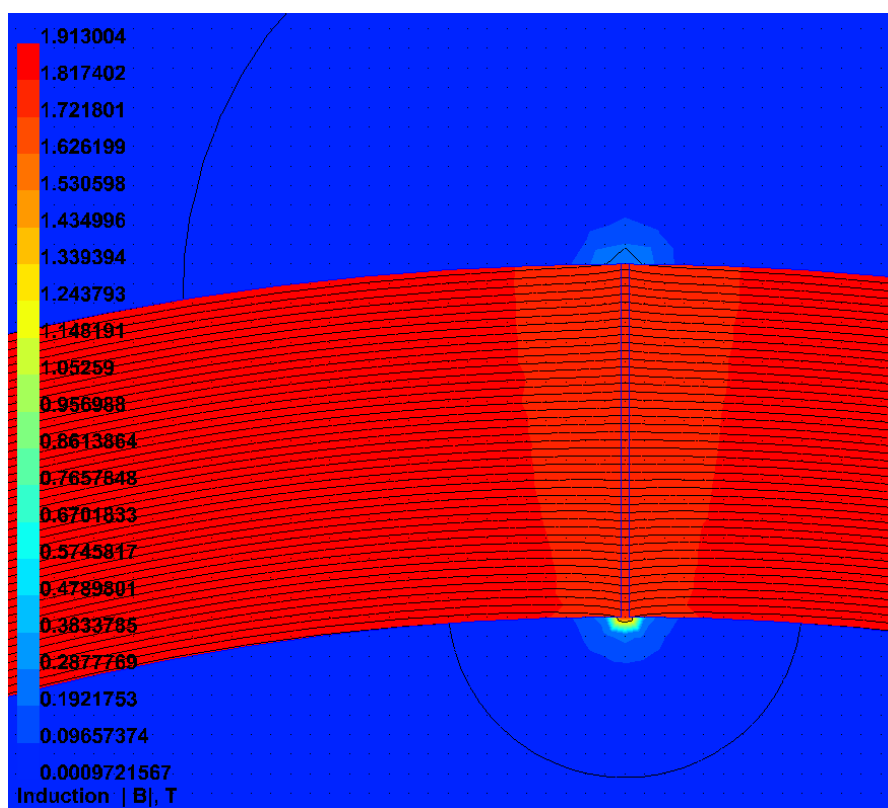


Рисунок 4.3 – Розподілення магнітної індукції у магнітопроводі із немагнітним зазором

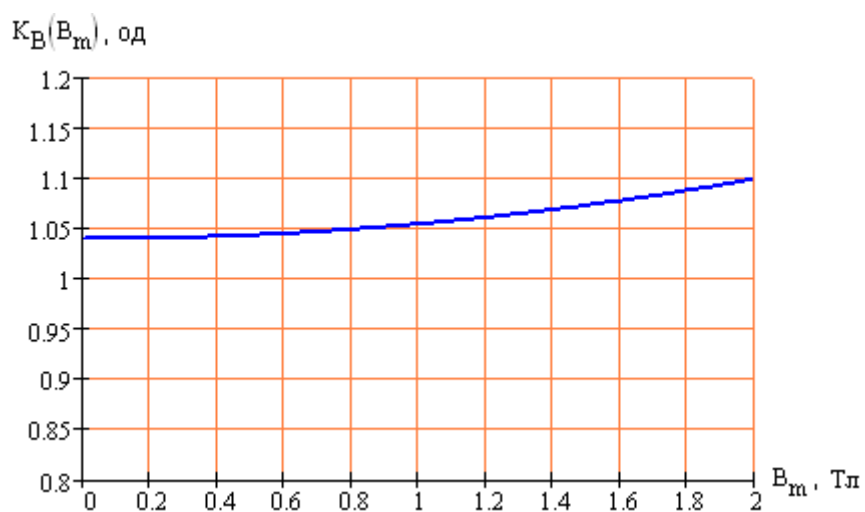


Рисунок 4.4 – Залежність коефіцієнту випучення магнітного поля в області зазору

4.2 Дослідження похибки релейної обмотки в номінальному режимі

Під номінальним режимом роботи трансформатору струму мають на увазі режим, що відповідають номінальній напрузі і значенню первинного струму від 20 до 120% значення номінального.

Тож для дослідження поведінки похибки релейної обмотки було спроектовано рівномірне збільшення первинного струму до амплітудного значення 4200 А.

При цьому було отримано осцилограму миттєвих значень первинного і приведенного вторинного струмів (у відношенні 1% від номінальних), а також значення миттєвої різниці цих струмів у номінальному значенні, яку зображено на рис. 4.5.

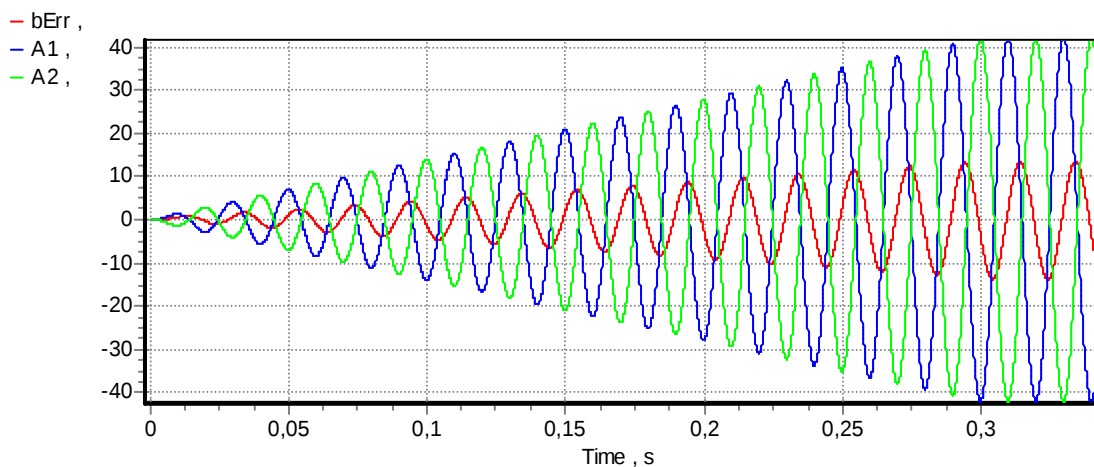


Рисунок 4.5 – Осцилограма приведених струмів і миттєвої похибки у номінальному режимі

На рис. 4.6 показано отримане миттєве значення магнітної індукції у осерді розрахованого магнітопроводу, на тому самому проміжку, що відповідає рис. 4.5. Значення індукції приведені у мТл.

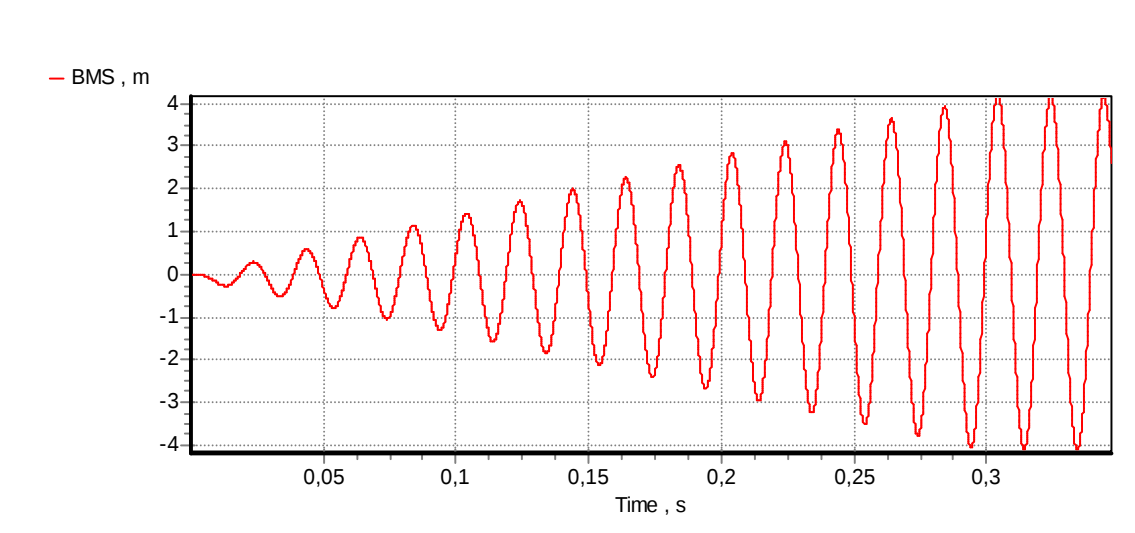


Рисунок 4.6 – Осцилограма індукції у магнітороводі при номінальному режимі

А на рис. 4.7 зображена петля гістерезису, яка відповідає втратам в уявній обмотці, що кратні втратам у магнітопроводі.

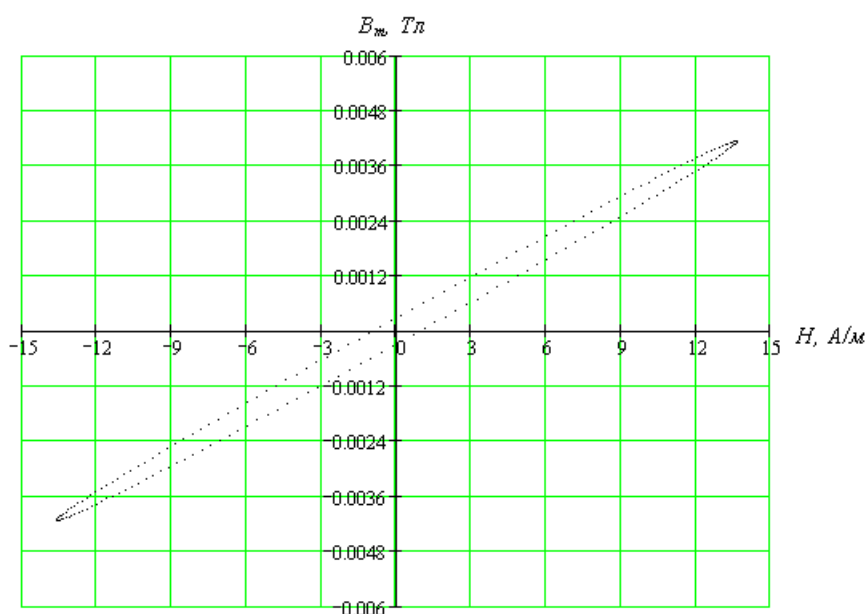


Рисунок 4.7 – Петля гістерезису у номінальному режимі

Як видно з рис. 4.7, при отриманих розрахункових параметрах, у номінальному режимі, умова про 10% значення залишкового магнітного потоку виконується, навіть із залишком.

На рис. 4.8 зображено значення миттєвої різниці струмів у допустимих

межах 1%.

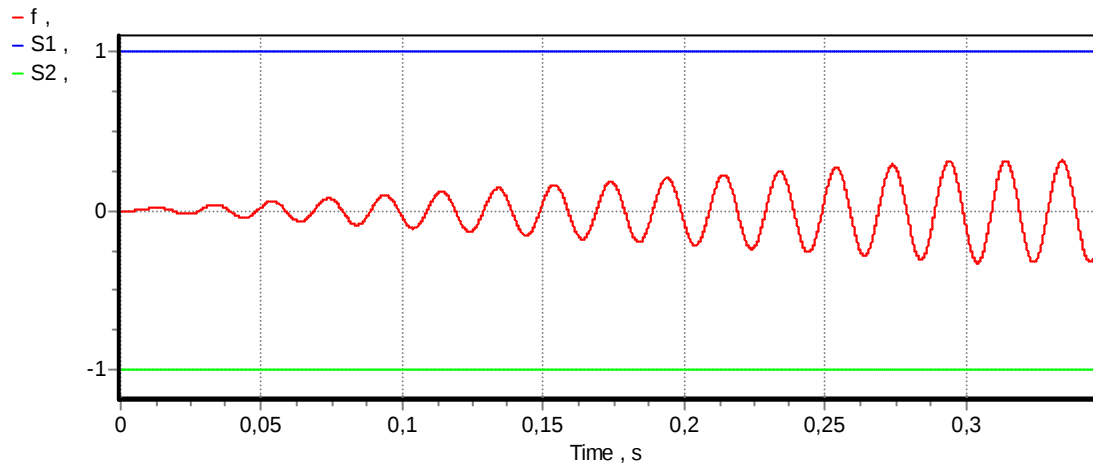


Рисунок 4.8 – Миттєве значення струмової похибки у номінальному режимі у допустимих межах

На рис. 4.9 зображена миттєва кутова похибка релейної обмотки. Значення кутової похибки на осцилограмі вимірюється у хвилинах. Також на осцилограмі зображено допустимі межі кутової похибки, які не регламентуються для перехідних режимів КЗ. Тож подальше дослідження кутових похибок припиняється.

З осцилограм можна зробити висновок, що спроектована релейна обмотка повністю відповідає вимогам МЕК, які для неї висуваються. Тож можна переходити до подальших досліджень, зокрема у режимі КЗ, заданої кратності.

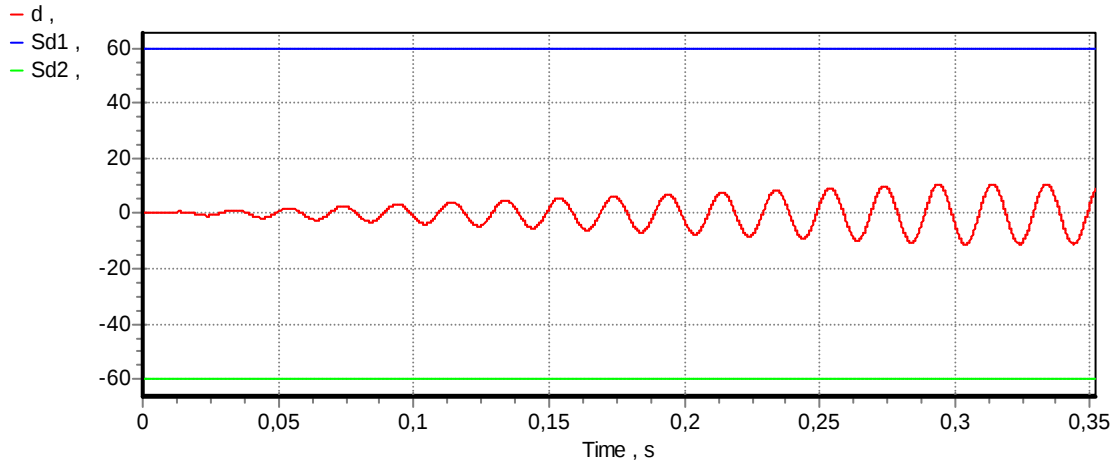


Рисунок 4.9 – Миттєве значення струмової похибки у номінальному режимі у допустимих межах

4.3 Дослідження похибки релейної обмотки в режимі номінального КЗ

Під номінальним режимом КЗ розуміють збільшення первинного струму до струму заданої кратності із заданої константою часу.

Кратність струму КЗ і константа часу розраховуються із специфіки місцевості і лінії ЛЕП, яку захищає трансформатор струму. При розрахунку також враховуються тип і марку системи релейного захисту, а також наявність в ній АПВ.

У пункті 2.1 було розглянуто наявність двох існуючих режимів циклів КЗ. По завданню, релейна обмотка має забезпечити миттєву струмову похибку у допустимих межах в режимі одинарного (разового) намагнічення. Але доцільно буде виявити поведінку струмової похибки і у режимі подвійного намагнічення.

4.3.1 Режим одинарного намагнічення

Для режиму одинарного намагнічення було спроектовано стрибкоподібний імпульс, який подається на первинну обмотку.

Параметри моделі:

- $K_{ss} = 20$;
- $T_s = 80$ мс;
- $h_3 = 4$ мм;
- $R_H = 10$ Ом;
- включення у ноль ($\varphi = 0$).

При цьому були отримані наступні осцилограми.

На рис. 4.10 зображена осцилограма первинного і накладеного на нього приведенного вторинного струмів.

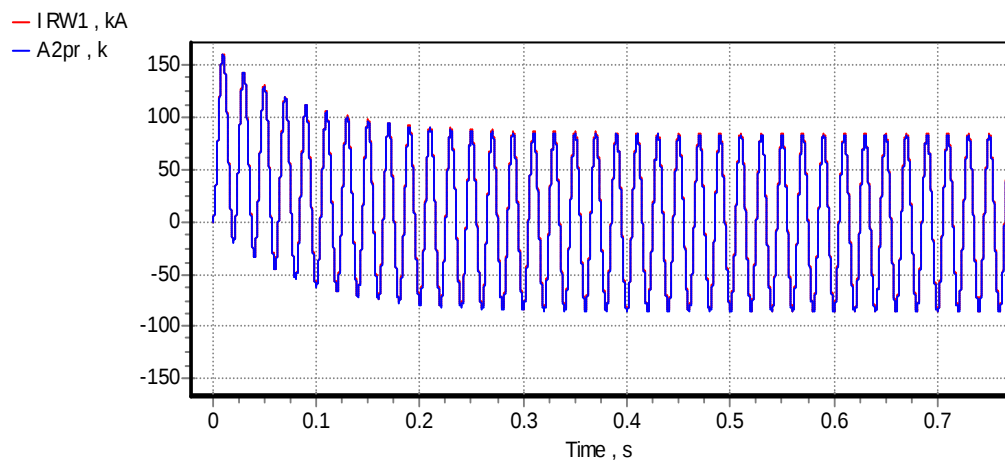


Рисунок 4.10 – Осцилограми первинного і накладеного на нього приведенного вторинного струмів у режимі номінального КЗ

На рис. 4.11 зображено магнітну індукцію у магнітопроводі, що відповідає цьому режиму. А на рис. 4.12 приведено петлю гістерезисну, яка відображає втрати, що відбуваються при цьому перехідному процесі.

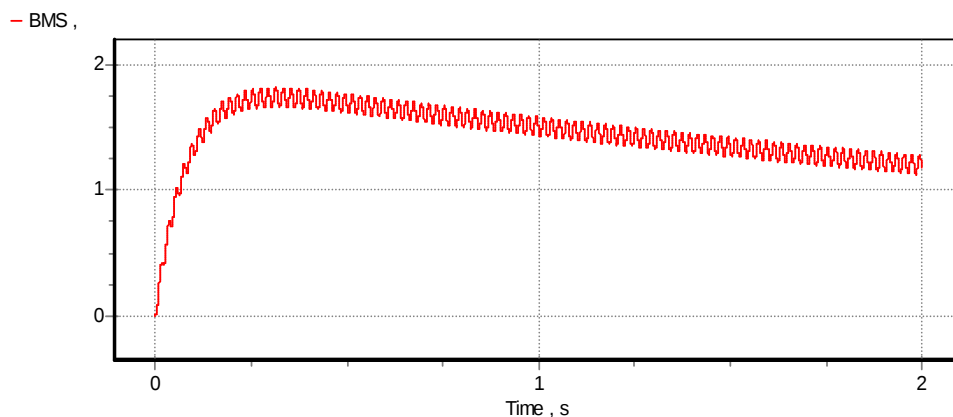


Рисунок 4.11 – Осцилограма магнітної індукції у режимі номінального КЗ одинарного намагнічення

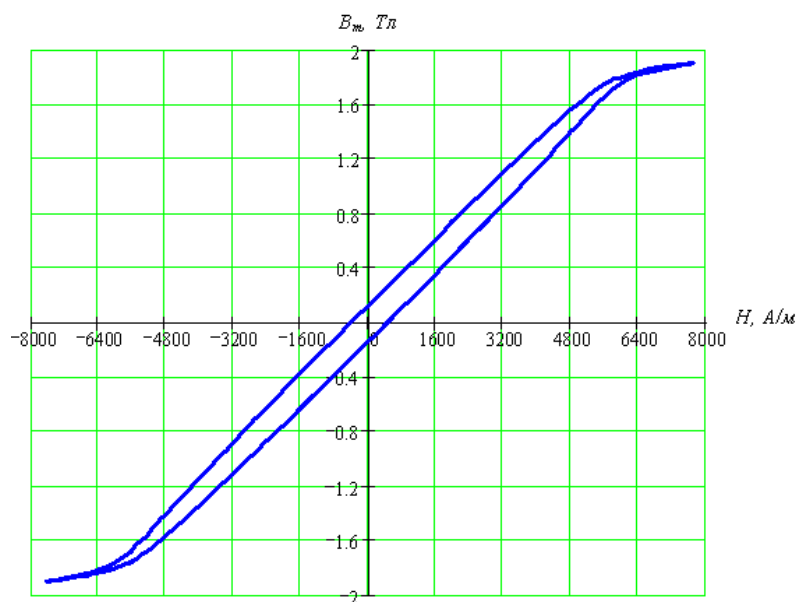


Рисунок 4.12 – Осцилограма петлі гистерезису у режимі номінального КЗ одинарного намагнічення

З осцилограм видно, що в режимі номінального КЗ індукція заходить в зону насичення, але умова дотриманості 10% залишкової індукції все одно виконується.

На рис. 4.13 зображено миттєву струмову похибку, яка відповідає цьому режиму перехідного процесу, а на рис. 4.14 зображено її ж у межах допустимих значень.

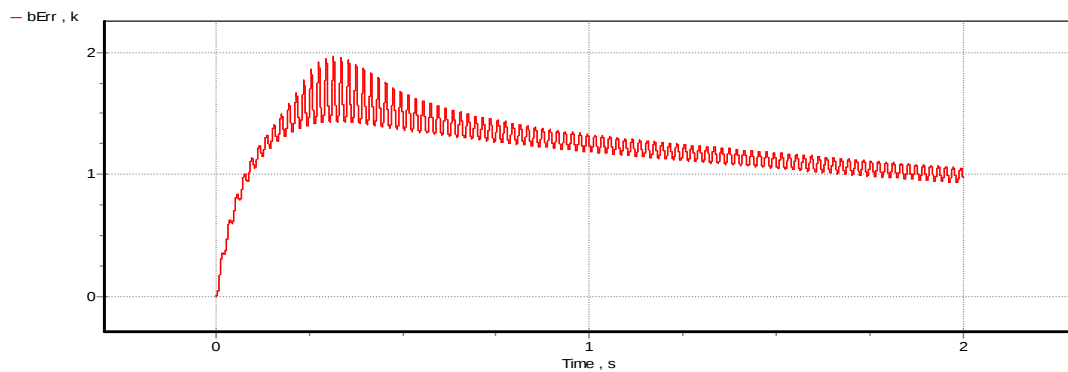


Рисунок 4.13 – Миттєва струмова похибка у режимі номінального КЗ
одинарного намагнічення

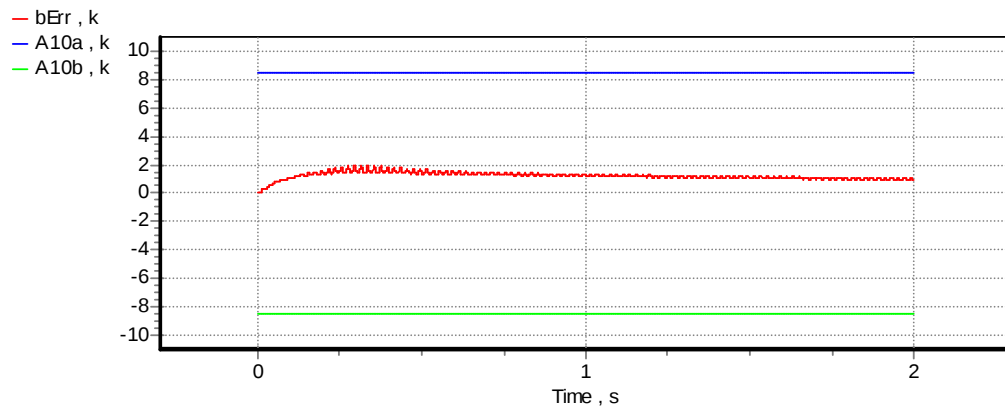


Рисунок 4.14 – Миттєва струмова похибка у межах допустимих значень
у режимі номінального КЗ одинарного намагнічення

За результатами осцилограм можна зробити висновок, що спроектована обмотка повністю відповідає усім вимогам, які до неї висувалися.

4.3.2 Режим подвійного намагнічення

Для режиму подвійного намагнічення є необхідність виявити час

безструмової витримки часу, якій відповідає часу витримки АПВ.

Для дослідження було спроектовано наступну модель:

- $K_{ss} = 20$;
- $T_s = 80$ мс;
- $h_3 = 4$ мм;
- $R_H = 10$ Ом;
- включення у ноль ($\varphi = 0$);
- $t' = 500$ мс;
- $t_{fr} = 500$ мс;
- $t'' = 500$ мс.

Впринципі, перша частина дослідів повторює попередній тому доцільніше використовувати модель подвійного намагнічення у будь-якому досліді..

На рис. 4.15 зображена осцилограма первинного і накладеного на нього приведенного вторинного струмів. На ній досить добре видно, що при повторному влюченні значення вторинного приведенного струму суттєво відрізняється від первинного, що збільшено на рис. 4.16. Цей момент пов'язується з тим, що під час відключення від первинного намагнічення у вторинній обмотці залишається велика кількість енергії, яка майже не розсіюється за такий короткий проміжок часу, що призводить до суттєвого спотворення вторинного струму у перші моменти повторного включення. Цей момент дуже гарно помітно на осцилограмі миттєвої похибки, яку зображено на рис. 4.17 і 4.18.

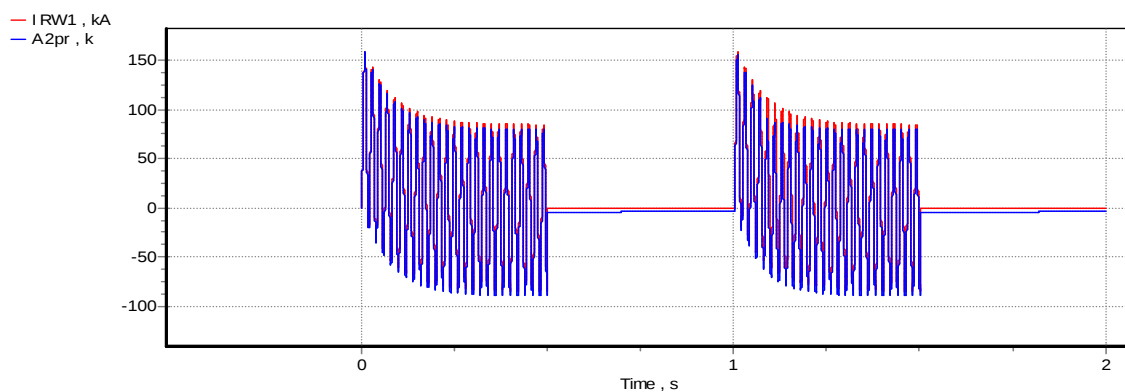


Рисунок 4.15 – Осцилограми первинного і накладеного на нього приведенного вторинного струмів у режимі номінального КЗ, подвійного намагнічення

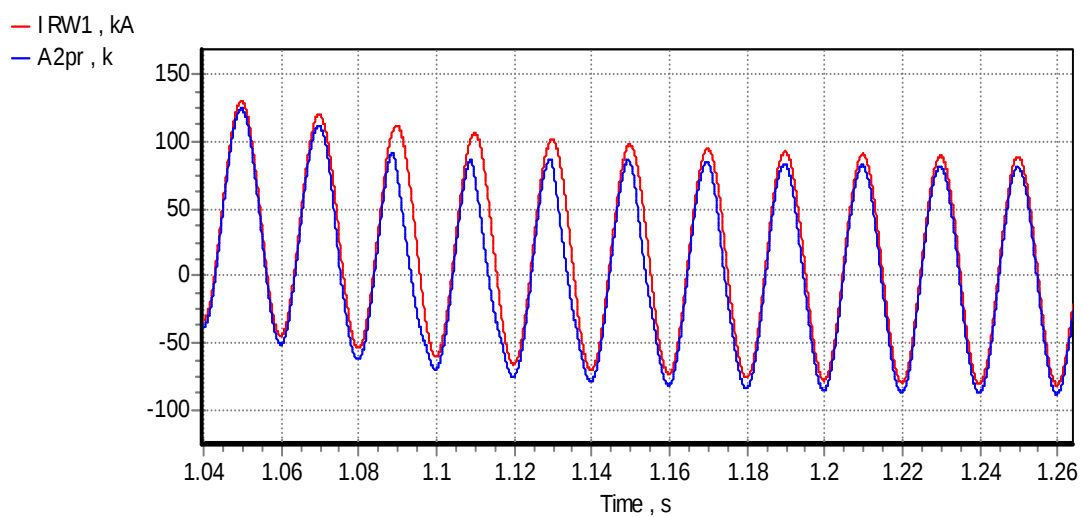


Рисунок 4.16 – Спотворення вторинного струму при повторному влюченні

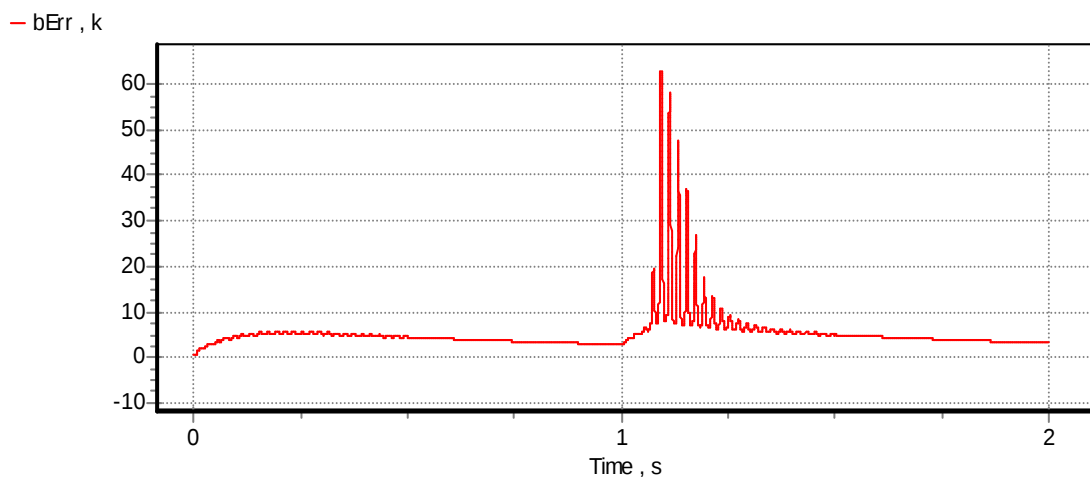


Рисунок 4.17 – Миттєва струмова похибка у режимі номінального КЗ подвійного намагнічення

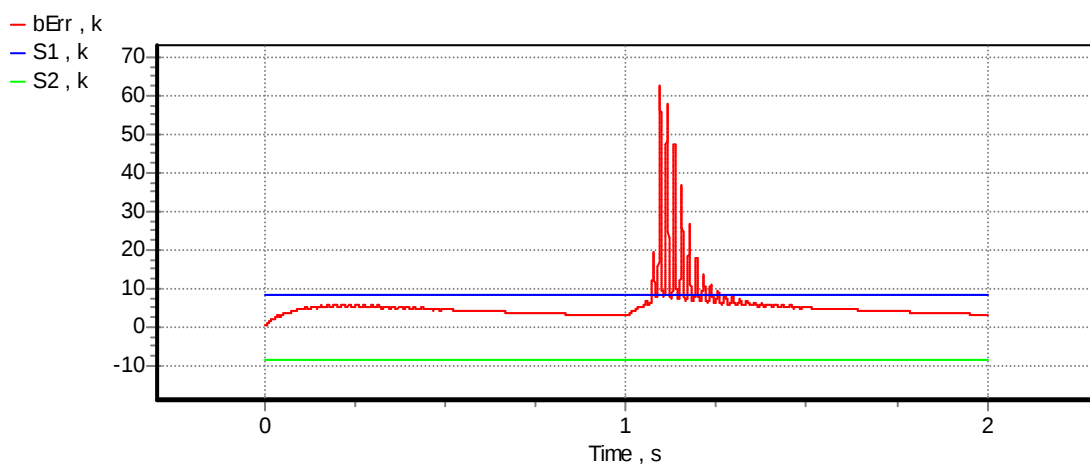


Рисунок 4.18 – Миттєва струмова похибка у межах допустимих значень у режимі номінального КЗ подвійного намагнічення

Як видно з рис. 4.18 при подвійному намагніченні струмова похибка виходить за межі допустимих значень. Це також підтверджує петля гістерезисну, зображена на рис. 4.19 і осцилограма магнітної індукції, зображена на рис. 4.20. На них видно, що індукція заходить у зону глибокого насичення, що і призводить до збільшення похибки.

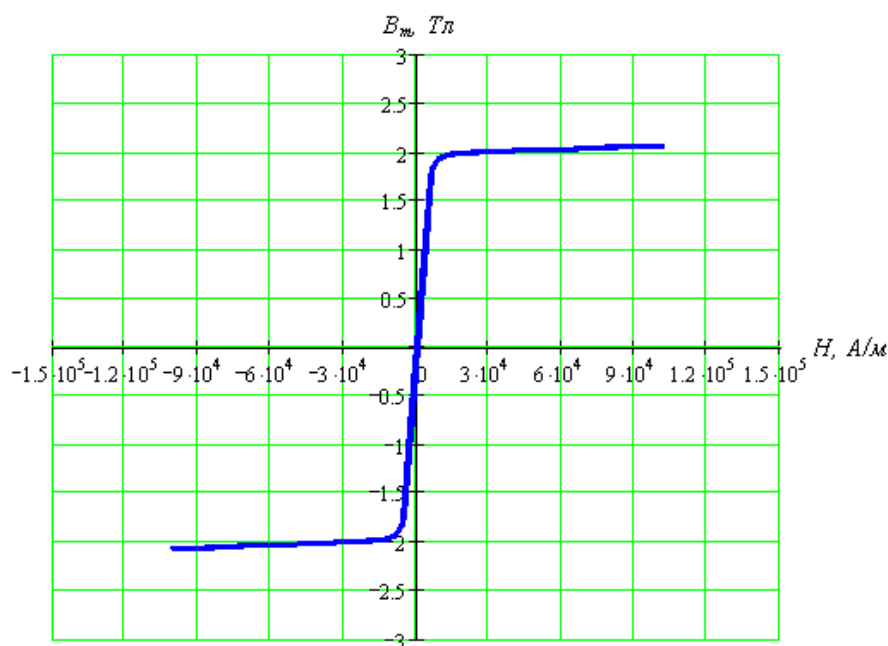


Рисунок 4.19 – Осцилограма петлі гистерезису у режимі номінального КЗ подвійного намагнічення

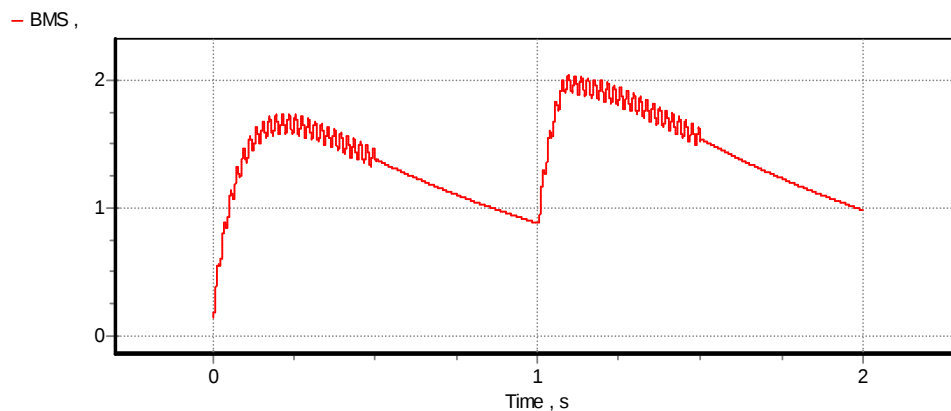


Рисунок 4.20 – Осцилограма магнітної індукції у режимі номінального КЗ подвійного намагнічення

Оскільки ставилася задача спроектувати релейну обмотку, яка працює у режимі одинарного намагнічення, то ніяких змін у розрахунках проводити не потрібно.

Проте, якщо повстане задача переводу такого трансформатору струму на режим подвійного намагнічення, то це буде виконуватися наступними

методами:

- а) збільшення активного перерізу осердя;
- б) збільшення часу безструмової витримки;
- в) зменшення навантаження вторинної обмотки.

Усі ці методи будуть представлені у наступних розділах.

4.4 Режим КЗ із включенням у фазу

З досвіду давно відомо, що найбільший струм КЗ можна отримати, коли КЗ відбувається при співпаданні максимуму амплітуди синусоїдальної складової і накладенням на нього аперіодичної складової струму КЗ.

Існує вираз, що КЗ припадає «на фазу».

Змоделюємо саме такий випадок.

Параметри моделі:

- $K_{ss} = 20$;
- $T_s = 80$ мс;
- $h_3 = 4$ мм;
- $R_n = 10$ Ом;
- включення «у фазу» ($\varphi = 90^\circ$).

Виведемо осцилограми магнітної індукції, яку зобразимо на рис. 4.21, а також осцилограму первинного, приведенного вторинного струмів і миттєвої струмової похибки, яку зобразимо на рис. 4.22. Причому зобразимо їх із попереднім включенням «у ноль», для більшої наглядності.

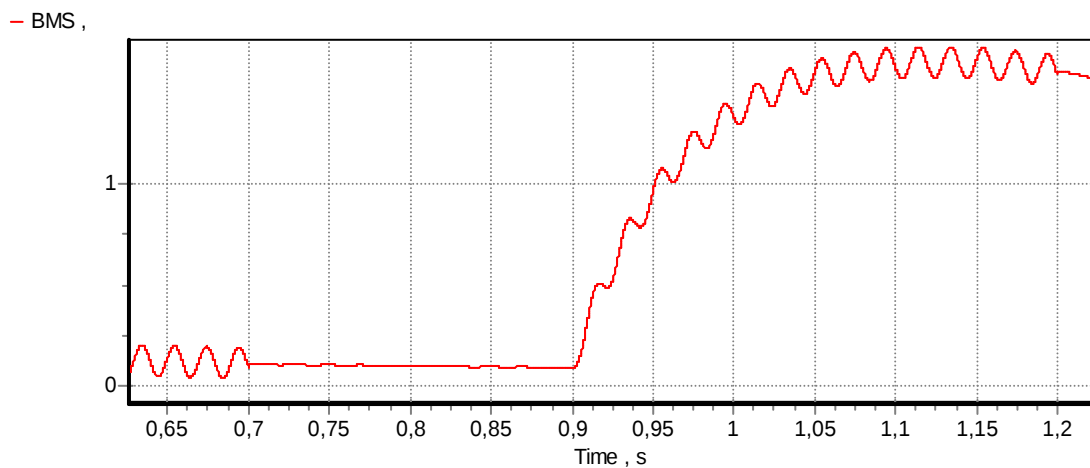


Рисунок 4.21 – Осцилограма магнітної індукції при включенні КЗ «у фазу»

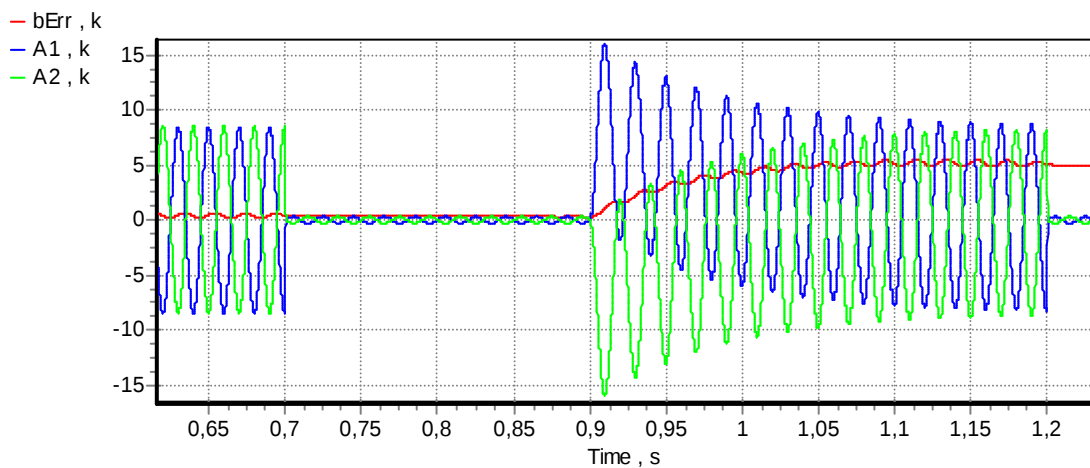


Рисунок 4.22 – Осцилограма первинного, приведенного вторинного струмів і миттєвої похибки у режимі включення КЗ «у фазу»

Тепер виведемо осцилограму миттєвої струмової похибки у межах допустимих значень (рис. 4.23).

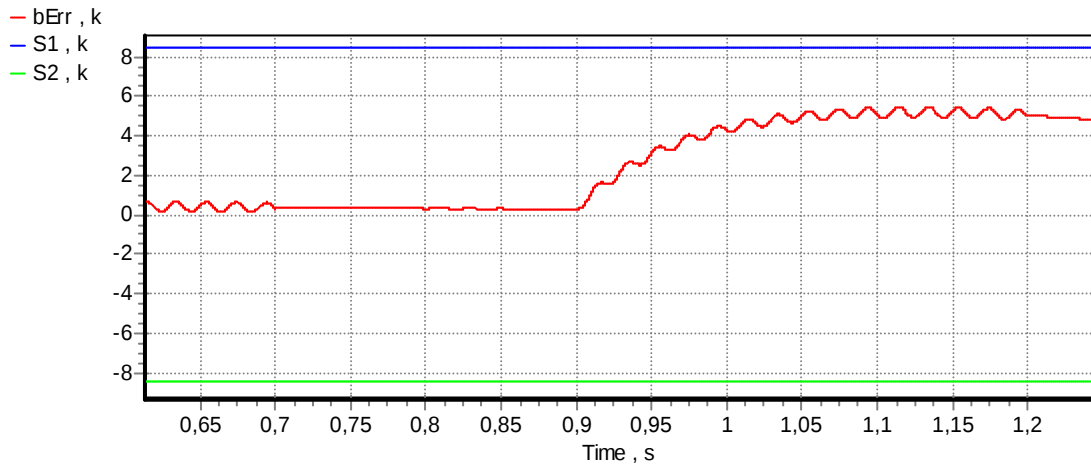


Рисунок 4.23 – Миттєва струмова похибка у межах допустимих значень у режимі включення КЗ «у фазу»

Як видно, миттєва струмова похибка збільшується приблизно у 5 разів, порівняно при включенні КЗ «у ноль», але все ж таки вона знаходиться у допустимих межах.

4.5 Варіювання параметрів

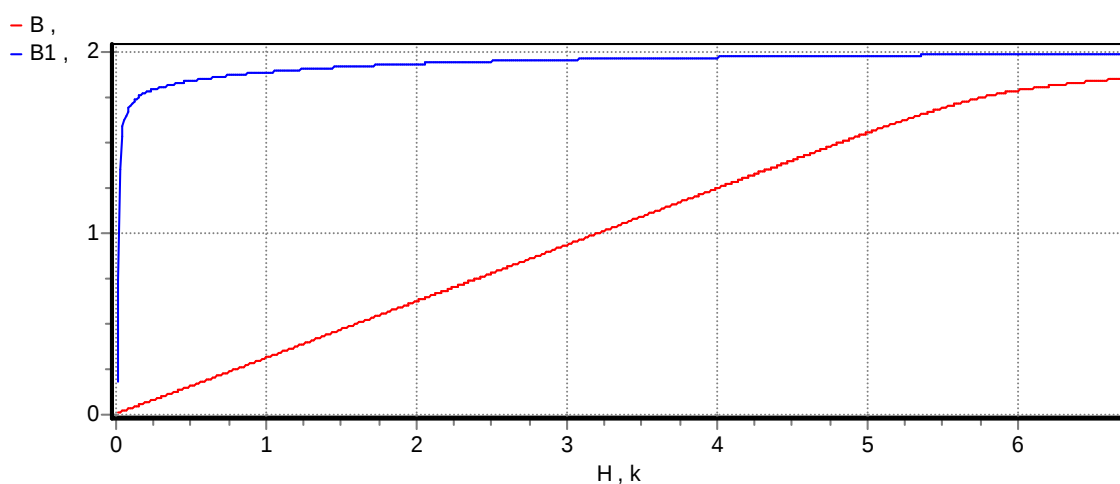
Оскільки у пункті 4.3.2 повстало питання, якими методами можна привести вже розрахований трансформатор до роботи у режимі подвійного намагнічення, то розглянемо безпосереднє варіювання параметрів трансформатору струму.

4.5.1 Варіювання немагнітного зазору магнітопроводу

Немагнітний зазор, який виконується у магнітопроводі трансформатору типу ТРУ взагалі необхідний для зменшення залишкового потоку у осерді.

Зрозуміло, що при збільшенні зазору залишковий потік буде зменшуватися, а основна крива намагнічування буде становитись більш лінійною на робочому проміжку і на проміжку робочого КЗ. Звичайно це приведе до збільшення активного перерізу магнітопроводу, але це дозволить знімати точні характеристики як і у номінальному режимі, так і в режимі робочого КЗ.

Для прикладу, на рис. 4.24 приведемо основні криві намагнічення магнітопроводу з відсутнім немагнітним зазором і розрахованого магнітопроводу з сумарним немагнітним зазором 4 мм.



синій колір – без зазору;

червоний колір – з сумарним немагнітним зазором 4 мм

Рисунок 4.24 – Основні криві намагнічення магнітопроводів

При цьому активний переріз магнітопроводу з зазором приблизно у 7 разів більший.

При збільшенні зазору похибка у режимі одинарного намагнічення зменшується, але у режимі подвійного намагнічення збільшується, що зображено на рис. 4.25 - 4.27.

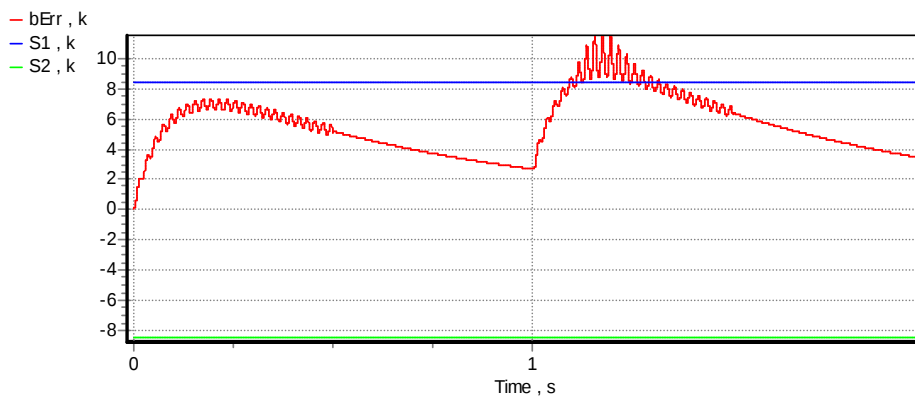


Рисунок 4.25 – Миттєва струмова похибка у допустимих межах
(сумарний зазор 6 мм)

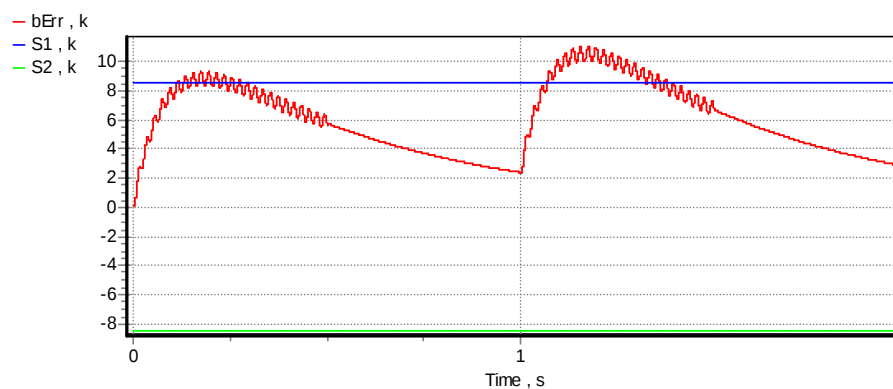


Рисунок 4.26 – Миттєва струмова похибка у допустимих межах
(сумарний зазор 8 мм)

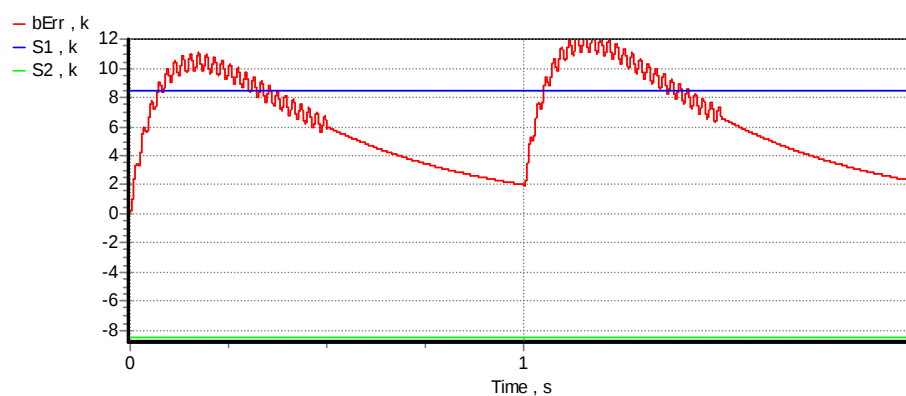


Рисунок 4.27 – Миттєва струмова похибка у допустимих межах
(сумарний зазор 10 мм)

Взагалі, величина немагнітного зазору регулює у більшій мірі лише величину залишкового магнітного потоку, а на похибку він відіграє лише

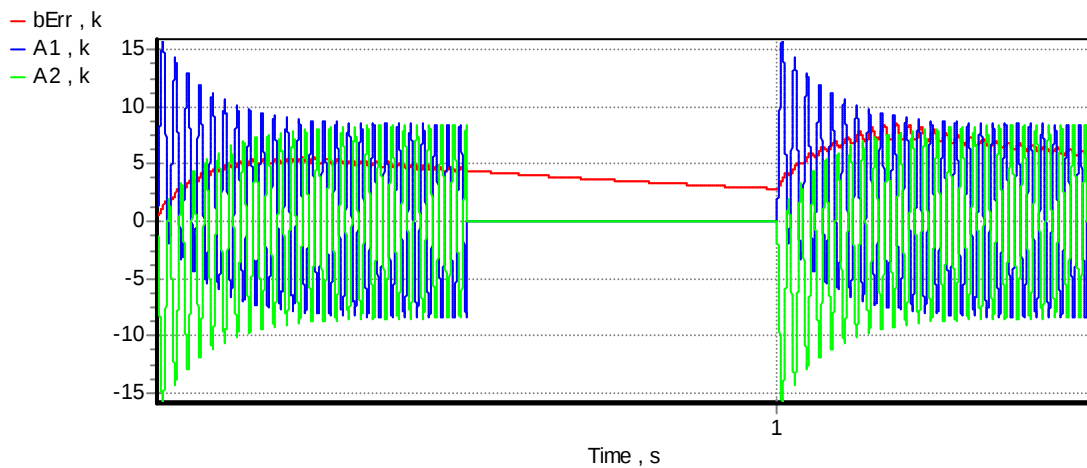
непрямий вплив.

4.5.2 Варіювання активного перерізу магнітопроводу

Варіювання активного перерізу магнітопроводу відіграє безпосередній вплив на похибку трансформатору струму.

Так збільшивши переріз магнітопроводу від 81 до 100 см², ми вже можемо використовувати розрахований трансформатор струму у режимі подвійного намагнічення, а значення похибок істотно знизяться, що дозволяє вийти на покращений клас точності трансформаторів струму.

Повторивши дослід пункту 4.3.2 для активного перерізу магнітопроводу 100 см² і отримаємо осцилограми, зображені на рис. 4.28 і 4.29.



Рисуно

к 4.28 – Осцилограма первинного, приведенного вторинного струмів і миттєвої похибки у режимі номінального КЗ, подвійного намагнічення ($S_a = 100 \text{ см}^2$)

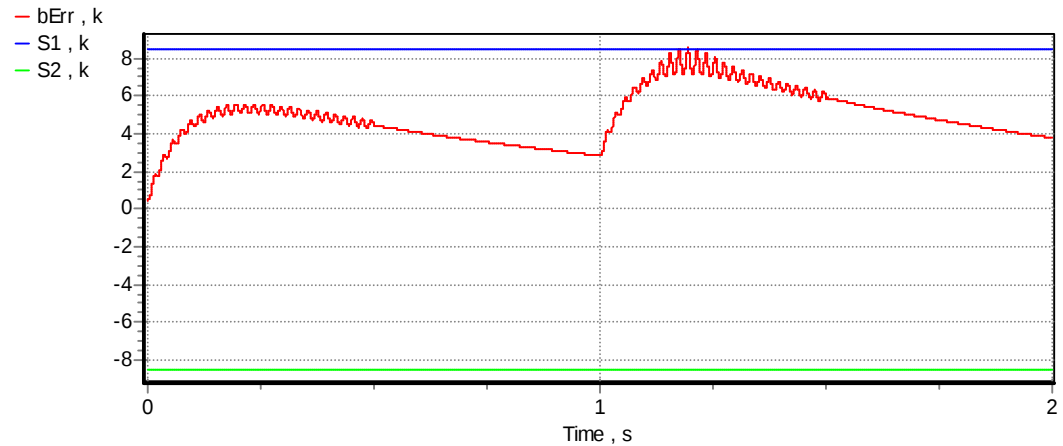


Рисунок 4.29 – Миттєва струмова похибка у допустимих межах
($S_a = 100 \text{ см}^2$)

Звичайно, збільшення активного перерізу магнітопроводу призводить до збільшення ваги і вартості активної частини, тому тут повстає питання оптимізації розрахунку трансформаторів струму такого типу і знаходження оптимальних розмірів і класів.

4.5.3 Варіювання активного навантаження релейної обмотки

Навантаження релейної обмотки відіграє чи не найважливішу роль при формуванні миттєвої струмової похибки трансформатору струму.

Змоделюємо режим подвійного намагнічення. Узявши два сусідніх значення активного навантаження із стандартного ряду навантажень (5 і 15 Ом), виведемо осцилограми первинного і приведенного вторинного струмів і миттєвої похибки, які зображено на рис. 4.30 і 4.31.

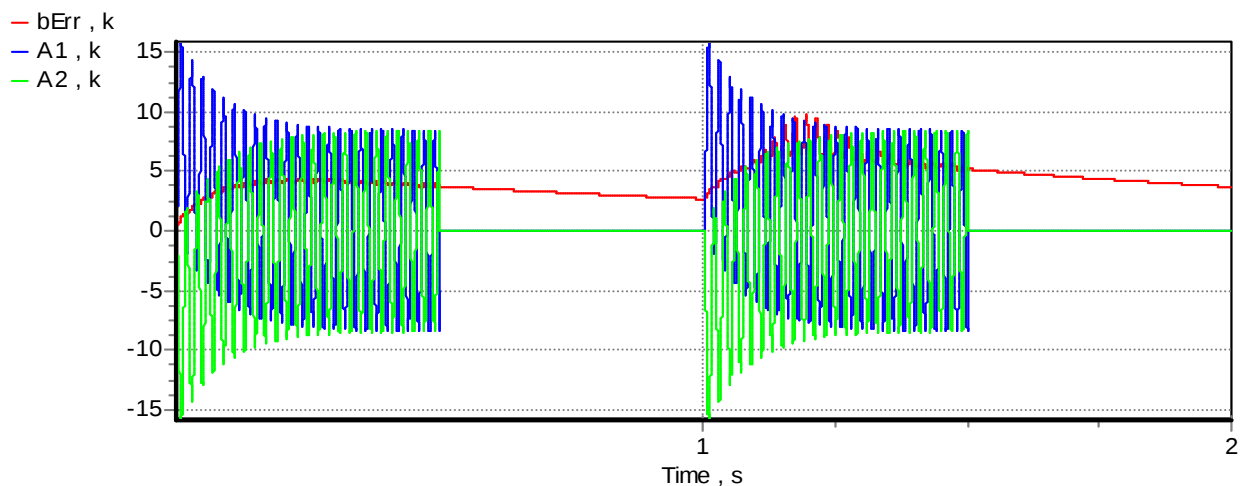


Рисунок 4.30 – Осцилограма первинного, приведенного вторинного струмів і миттєвої похибки у режимі номінального КЗ, подвійного намагнічення ($R_p = 5$ Ом)

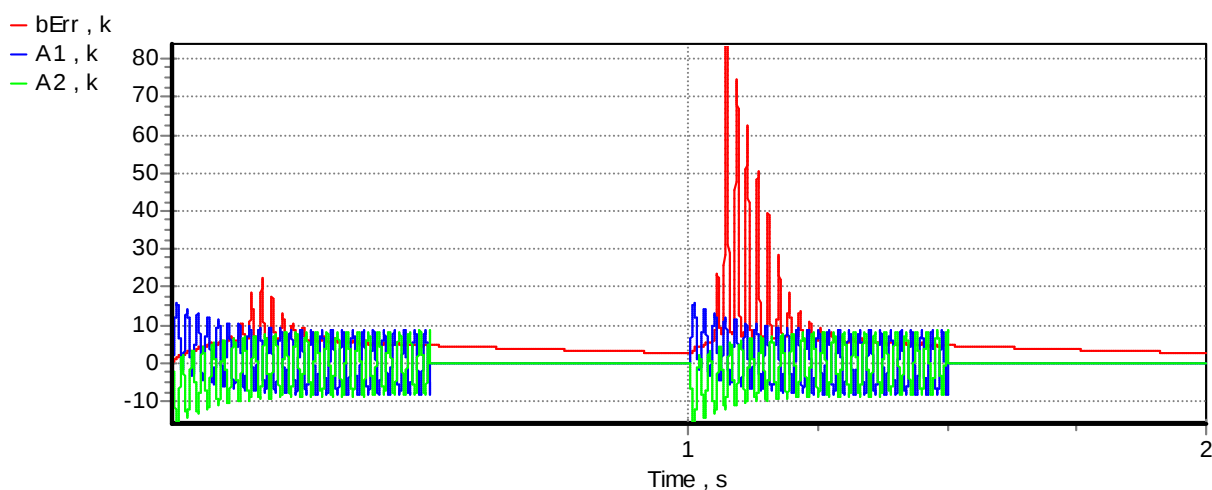


Рисунок 4.31 – Осцилограма первинного, приведенного вторинного струмів і миттєвої похибки у режимі номінального КЗ, подвійного намагнічення ($R_p = 15$ Ом)

На рис. 4.32 і 4.33 зображено миттєву струмову похибку у допустимих межах для різних значень навантажень.

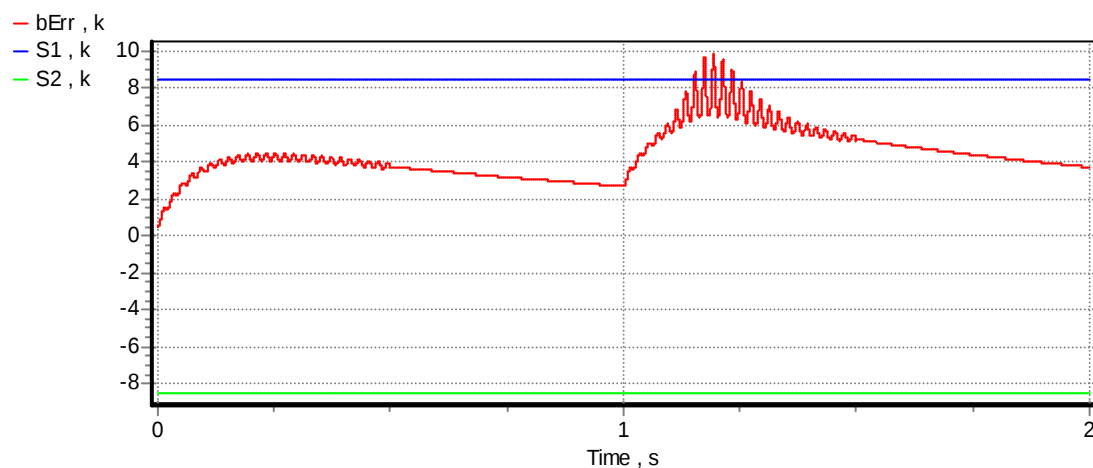


Рисунок 4.31 – Миттєва струмова похибка у допустимих межах ($R_p = 5 \text{ Ом}$)

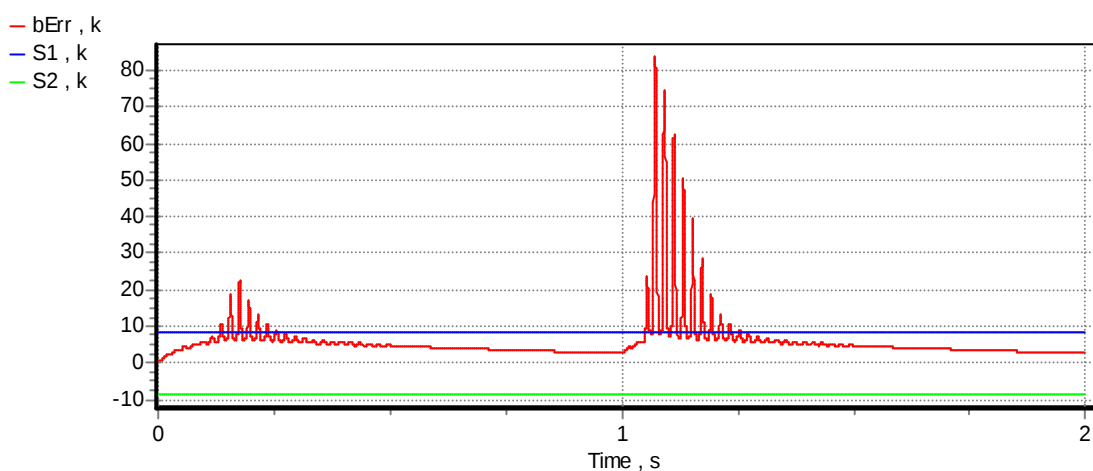
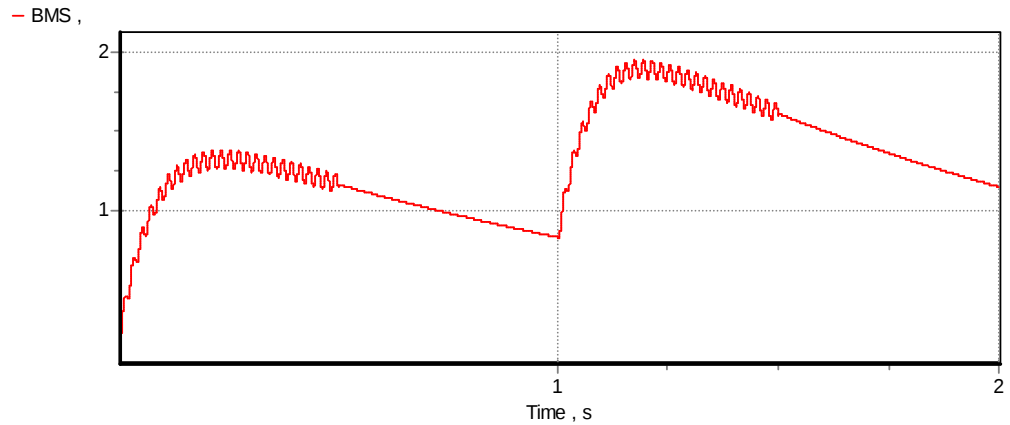
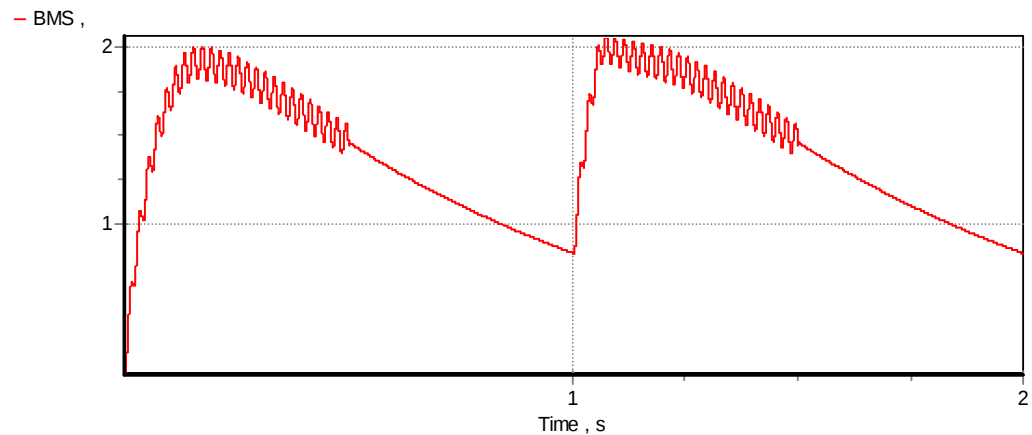


Рисунок 4.32 – Миттєва струмова похибка у допустимих межах ($R_p = 15 \text{ Ом}$)

На рис. 4.33 і 4.34 зображена магнітна індукція для різних значень навантажень.

Рисунок 4.33 – Магнітна індукція ($R_p = 5 \text{ Ом}$)Рисунок 4.34 – Магнітна індукція ($R_p = 15 \text{ Ом}$)

З приведених діаграм можна зробити висновок, що миттєва струмова похибка, а також магнітна індукція у магнітопроводі пропорційна значенню активного навантаження релейної обмотки і досить суттєво.

Принаймні при зменшенні навантаження у 2 рази ми майже вийшли на режим подвійного навантаження, а при збільшенні у 1.5 рази не вписалися навіть у режим одинарного.

Це вказує на те, що при погодженні питань при замовленні ТС типу ТРУ необхідно дуже уважно відноситись до вибору навантаження.

ВИСНОВКИ

У першому розділі виконано огляд конструкції та вимоги до трансформатора струму для захисту працюючих в перехідних режимах його роботи. Розглянуті особливості визначення миттєвого значення струмової похибки, а також класи трансформаторів струму для захисту та їх вибір.

У другому розділі виконано електромагнітний розрахунок трансформатора струму ТОГ 110–II–II У, а саме: розрахунок і обґрунтування первинної обмотки, розрахунок електротермічної стійкості, розрахунок параметрів вторинної обмотки, розрахунок електродинамічної стійкості, розрахунок похибок трансформатора струму, розрахунок напруги на розімкнених кінцях вторинної обмотки, тощо.

В третьому розділі виконано розрахунок міцності корпусу та болтових з'єднань трансформатора струму ТОГ 110–II–II У.

В четвертому розділі проведено дослідження похибок релейної обмотки типу ТРУ у перехідних режимах роботи.

Для розрахунку миттєвих значень похибок релейної обмотки трансформатору струму на базі підприємства ВАТ «ВІТ» була запропонована і розроблена його математична модель, яку було реалізовано за допомогою програми розрахунку нелінійних електричних кіл NAP2, за допомогою вбудованого мови програмування. Програма вирішує нелінійні диференціальні рівняння методом Ньютона – Радсона. Математична модель дозволяє змодельовати метрологічні характеристики релейної обмотки трансформатору струму типу ТРУ і отримати осцилограми миттєвих значень необхідних величин у залежності від заданих параметрів. З результатів досліджень було отримано важливі залежності миттєвої струмової похибки у перехідних режимах від основних параметрів магнітної системи, були визначені шляхи покращення і погіршення характеристик.

Запропонована математична модель може використовуватися для дослідження будь-яких електричних і електромеханічних систем. Вона дозволяє отримувати вихідні діаграми будь-яких характеристик у залежності від вхідних параметрів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Adoniev M. M. Dovidnyk z rozrakhunku ta konstruiuvannia kontaknykh chastyn sylnostrumovykh elektrychnykh aparativ. M. Dovidnyk z rozrakhunku ta konstruiuvannia kontaknykh chastyn sylnostrumovykh elektrychnykh aparativ [Tekst] / M. M. Adoniev, V. V. Afanasiev. - Leninhrad: Enerhoatomizdat, 1988. - 384 s
2. Aleksandrov H. M. Proektuvannia elektrychnykh aparativ [Tekst]: Pidruchnyk dlia P 79 vuziv / H. M. Aleksandrov. - L.: Enerhoatomizdat, 1985. - 448 s.
3. Afanasiev V. V. Dovidnyk z aparativ vysokoi napruhy [Tekst] / V. V. Afanasiev, M. M. Adoniev, I. M. Bortnyk. - L.: Enerhoatomizdat, 1989. - 544 s.
4. Afanasiev V. V. Transformatory strumu [Tekst] / V. V. Afanasiev, M. M. Adoniev, V. M. Kybel ta in. - L.: Enerhoatomizdat, 1989. - 416 s.
5. Afanasiev V. V. Optyko-elektronni transformatory strumu [Tekst] / V. V. Afanasiev, V. P. Zubkov // Elektryka, 1970, 2, - S. 25-35.
6. Близняков О. В. Конспект лекцій дисципліни Основи теорії електричних Апаратів [Текст] / О. В. Близняков. // Національний університет «Запорізька політехніка». – С. 94.
7. Butkevych H. V. Zadachnyk z elektrychnykh aparativ [Tekst], navchalnyi posibnyk dlia vuziv / H. V. Butkevych, V. H. Dehtiar. - M.: Vyshcha shkola, 1987. - 232 s. - (2).
8. Hrechukhin V. M. Elektrychni transformatory strumu i napruhy. Stany, perspektyvy rozvytku ta vprovadzhennia na VRP 110-750 kV stantsii i pidstantsii system [Tekst] / V. M. Hrechukhin. // Visnyk IHEU. - 2006. - №4. - S. 5.
9. Kriuchkov I. P. Elektrychna chastyna elektrostantsii i pidstantsii [Tekst]: Dovidkovi dani dlia kursovoho ta dyplomnoho proektuvannia / I. P. Kriuchkov, M. M. Kuvshynskyi. - M.: Enerhiia, 1978. - 465 s.
10. Nikitenko, A. H. Prohramuvannia i zastosuvannia EOM u rozrakhunkakh

elektrychnykh aparativ [Tekst]: Navch. posibnyk dlia vuziv / A. H. Nikitenko, V. P. Hrinchenkov, O. M. Ivanchenko. - M.: Vyshch.shk., 1990. - 231 s.

11. Sakharov P. V. Proektuvannia elektrychnykh aparativ [Tekst] / P. V. Sakharov. - M.: Enerhiia, 1971. - 560 s.

12. Chunyaikhyn A. A. Aparaty vysokoi napruhy [Tekst] / A. A. Chunyaikhyn, M. A. Zhavoronkov. - M.: Enerhoatomizdat, 1985. - 432 s.

13. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.

14. Стандарт організації ВАТ "ФСК ЄЕС" Інструкція з вибору ізоляції електроустановок змінного струму класів напруги 6-750 кв. - М.: СТО56947007-29.240.068 - 2011. - 21 с.

15. Ізолятори всіх типів [Електронний ресурс] // Виробничо - торгова компанія ТОВ "ВТК "Енергомаш". - 2020. - Режим доступу: http://www.em.dn.ua/iz/steklo/izs_shtur.htm.

16. Ізолятори для ПЛ [Електронний ресурс] // Виробнича компанія "Астон-електротехніка". - 2016. - Режим доступу: <http://www.aston-e.ua/products/izolator/>.

17. Ізолятор полімерний [Електронний ресурс] // Форенерго виробниче об'єднання. - 2016. - Режим доступу: <https://www.uik.uaproductions/179/izolyatorpolimer/>.

18. Конструкція порцелянових і скляних ізоляторів - конструктивні елементи ізоляторів [Електронний ресурс] // Енергетика обладнання, документація - Режим доступу до ресурсу: <https://forca.ua/spravka/vvody-i-izolyatory/konstrukcii-farforovyh-i-steklyannyh-izolyatorov-2.html>.

19. Призначення та класифікація трансформаторів струму [Електронний ресурс] // Електричні мережі. - 2020. - Режим доступу: <https://leg.co.ua/info/podstancii/naznachenie-i-klassifikaciya-transformatorov-toka.html>.

20. Обмеження перенапруг [Електронний ресурс] // Електричні мережі. - 2020. - Режим доступу:

<https://leg.co.ua/knigi/oborudovanie/ogranichenieperenapryazheniy.html>.

21. Опис конструкції трансформаторів струму 110-150 кВ [Електронний ресурс] // Система електротехнічна компанія. - 2019. - Режим доступу: <http://eks.com.ua/opisanie-konstrukzii-transformatorov-toka-110-150-kv.html>

22. Виробництво та продаж ізоляторів фарфорових [Електронний ресурс] // Форенерго виробниче об'єднання. - 2016. - Режим доступу: <https://www.uik.ru/productions/179/farforizol/>.

23. Фарфор, полімер, скло - хто переможе [Електронний ресурс] // Енергетика і промисловість. - 2006. - Режим доступу: <https://www.eprussia.ru/epr/75/5217.htm>.

24. GLASS INSULATORS FOR 10–1150 kV OVERHEAD LINES AND SUBSTATIONS. // Global insulator group. – 2021. – С. 20.

25. GE Grid Solutions [Електронний ресурс] // COSI-CT Optical Current transformer. – 2016. – Режим доступу: [grid-ga-l3-cosi_ct-0907-2016_07-en.pdf](#)

26. INMR Enriching Technical Knowledge of T&D Professionals [Електронний ресурс] // Engineering Porcelain Post Insulators to Assist Digitalization at Substations. – 2021. – Режим доступу: <https://www.inmr.com/engineering-porcelain-post-insulators-to-assist-digitalization-at-substations/>

27. Buric M. Optical Fiber Sensor Technology Development and Field Validation for Distribution Transformer and Other Grid Asset Health Monitoring / M. Buric, P. Lu. // final. – 2020. – №4. – С. 68.

28. PORCELAIN INSULATORS FOR 0.22–110 kV OVERHEAD LINES AND SUBSTATIONS // Global insulator group. – 2020. – С. 32.

29. HIGH-VOLTAGE COMPOSITE INSULATORS GIG POLYMER // Global insulator group. – 2020. – С. 52.

30. RHM International [Електронний ресурс] // Go Paperless: A real High Voltage reliable Dry type insulation. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://rhmintl.com/technology/>

31. Проценко Р. О. Методичні вказівки "Основи проектування

високовольтної ізоляції" / Р. О. Проценко, О. С. Ільєнко. // Київ "Політехніка". – 2002. – С. 56.

32. Bul O.B. Metody rozrakhunku mahnitnykh system elektrychnykh aparativ: Mahnitni kola, polia i prohrama FEMM: Navch. posibnyk dlia stud. uchb. zakladiv / Oleh Boleslavovych Bul. - M.: Vydavnychyi tsentr "Akademiia, 2005. - 336 s.