

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Електротехнічний факультет

(повне найменування інституту, факультету)

Електричні та електронні апарати

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему: Розробка та дослідження сухого трансформатора 1600 кВА для
комплектної трансформаторної підстанції

Виконав: студент(ка) VI курсу, групи Е-412м

Спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Електричні та електронні апарати

Домінов О.Д.

(прізвище та ініціали)

Керівник Андрієнко П.Д.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

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

Інститут, факультет Електротехнічний
Кафедра Електричні та електронні апарати
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Електричні та електронні апарати
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри д.т.н., професор
Андрієнко П.Д.

« _____ » 20 _____ року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Домінова Олександра Дмитровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема проєкту(роботи) Розробка та дослідження сухого трансформатора 1600 кВА для комплектної трансформаторної підстанції

Керівник проєкту (роботи) Андрієнко Петро Дмитрович, д.т.н., професор

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

Затверджені наказом закладу вищої освіти від «1» листопада 2023 року №407

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 03.12.2023

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Технічна документація на обладнання трансформатора 1600 кВА

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

1. Аналітичний розділ

2. Проєктно-конструкторський розділ

3. Розрахунково-дослідницький розділ

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

1. Комплектна трансформаторна підстанція складальне креслення (ФА1-1 лист);

2. Схема комплектної трансформаторної підстанції (ФА1 – 1
лист)

3.Трансформатор	ТСЗ-1600/10	складальне	креслення	(ФА1-1
лист);				

4. Креслення залежності параметрів трансформатора від повітряного зазору
(ФА1 – 1 лист)

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	Андрієнко П. Д., завідувач кафедри		

7. Дата видачі завдання «01» жовтня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Вступ	10.10.2023	
2	Аналітичний розділ	15.10.2023	
3	Проектно-конструкторський розділ	23.10.2023	
4	Розрахунково-дослідницький розділ	4.11.2023	
5	Висновки	20.11.2023	
6	Оформлення пояснювальної записки	22.11.2023	
7	Оформлення графічної частини	25.11.2023	

Студент(ка)

(підпис)

Домінов О.Д.
(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

Андрієнко П.Д.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 76 с., 27 рис., 10 табл., 9 джерел.

ТРАНСФОРМАТОР, КОМПЛЕКТНА ТРАНСФОРМАТОРНА ПІДСТАНЦІЯ, КОМПЛЕКТНИЙ РОЗПОДІЛЬЧИЙ ПРИСТРІЙ, СТРУМ, НАПРУГА, КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ, ПОВІТРЯНИЙ ЗАЗОР.

Актуальність проблеми.

В умовах економічної нестабільності в Україні, яка характеризується зростанням цін на енергоресурси та обладнання, а також дефіцитом коштів для їх закупівлі, очікується мінімальне зростання кількості нових електромережових об'єктів. У той же час, питання забезпечення надійного та якісного електропостачання постає особливо гостро. Ключову роль у вирішенні цього завдання грають розподільні мережі середньої напруги 10 кВ. Таким чином, знаходження шляхів та способів оптимізації їх роботи має ключове значення для підвищення ефективності використання енергоресурсів та зниження експлуатаційних витрат.

Актуальність дослідження впливу повітряного зазору на характеристики силового сухого трансформатора, як способів покращення роботи КТП, пов'язана з необхідністю підвищення ефективності, надійності та безпеки роботи електричних пристроїв, а також зменшення їх вартості та матеріаломісткості.

Економічні аспекти є одним із ключових факторів, що зумовлюють актуальність дослідження. Зниження матеріаломісткості трансформаторів призводить до зменшення витрат за їх виготовлення, що сприяє зниженню загальної вартості устаткування.

Підвищення ефективності є ще однією причиною актуальності дослідження. Оптимізація повітряного зазору в трансформаторі може покращити його характеристики, такі як ККД, втрати та навантаження на навколишнє середовище, що є важливим для забезпечення ефективності та

екологічної безпеки енергосистеми.

Зрештою, надійність та безпека роботи трансформаторів також важливі. Забезпечення оптимальних параметрів проміжку мінімізує ймовірність аварійних ситуацій, таких як перегрів або пробій ізоляції, що сприяє підвищенню надійності та безпеки електропостачання.

Мета і завдання дослідження.

Метою дипломної роботи є дослідження впливу повітряного зазору на характеристики силового сухого трансформатора, як способів підвищення ефективності роботи КТП.

Відповідно розв'язувалися наступні завдання:

- аналіз загальних відомостей про комплектну трансформаторну підстанцію та особливостей її експлуатації;
- вибір силового трансформатора та необхідної комутаційно-захисної апаратури;
- розрахунок силового трансформатора;
- визначення способів підвищення надійності та ефективності роботи силового трансформатора;
- дослідження впливу повітряного зазору на параметри сухого трансформатора.

Об'єкт дослідження – комплектна трансформаторна підстанція з сухим трансформатором.

Предмет дослідження – розробка і дослідження технічних заходів підвищення ефективності роботи трансформаторної підстанції.

Наукова новизна отриманих результатів:

- отримано залежність параметрів сухого трансформатора 1600 кВА 10/0.4 від повітряного зазору.

Практичне значення отриманих результатів.

Модернізація основних складових частин системи електропостачання трансформатора, дозволить виявити оптимальні параметри для проєктування та експлуатації трансформаторних підстанцій у різних умовах.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	7
1.1 Загальні відомості про комплектну трансформаторну підстанцію	7
1.2 Особливості обслуговування та експлуатації комплектної трансформаторної підстанції	14
2 ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	21
2.1 Розрахунок параметрів та вибір електричних апаратів.....	21
2.2 Побудова КТП	29
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	31
3.1 Порядок розрахунку сухого трансформатора з повітряним зазором 40 мм	32
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	76
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	77

ВСТУП

В умовах економічної нестабільності в Україні, яка характеризується зростанням цін на енергоресурси та обладнання, а також дефіцитом коштів для їх закупівлі, очікується мінімальне зростання кількості нових електромережових об'єктів. У той же час, питання забезпечення надійного та якісного електропостачання постає особливо гостро. Ключову роль у вирішенні цього завдання грають розподільні мережі середньої напруги 10 кВ. Таким чином, знаходження шляхів та способів оптимізації їх роботи має ключове значення для підвищення ефективності використання енергоресурсів та зниження експлуатаційних витрат.

Актуальність дослідження впливу повітряного зазору на характеристики силового сухого трансформатора, як способів покращення роботи КТП, пов'язана з необхідністю підвищення ефективності, надійності та безпеки роботи електричних пристроїв, а також зменшення їх вартості та матеріаломісткості.

Економічні аспекти є одним із ключових факторів, що зумовлюють актуальність дослідження. Зниження матеріаломісткості трансформаторів призводить до зменшення витрат за їх виготовлення, що сприяє зниженню загальної вартості устаткування.

Підвищення ефективності є ще однією причиною актуальності дослідження. Оптимізація повітряного зазору в трансформаторі може покращити його характеристики, такі як ККД, втрати та навантаження на навколишнє середовище, що є важливим для забезпечення ефективності та екологічної безпеки енергосистеми.

Зрештою, надійність та безпека роботи трансформаторів також важливі. Забезпечення оптимальних параметрів проміжку мінімізує ймовірність аварійних ситуацій, таких як перегрів або пробій ізоляції, що сприяє підвищенню надійності та безпеки електропостачання.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Загальні відомості про комплектну трансформаторну підстанцію

Втрата електроенергії являє собою значну проблему для світової економіки. Для передачі електроенергії на далекі відстані від місця виробництва до місця споживання необхідні сучасні підвищувальні та понижувальні трансформатори.

На сьогодні в Україні основними джерелами електроенергії є атомні, гідро- і теплові електростанції. Основну кількість електроенергії виробляють теплоелектростанції. Вони зазвичай розташовуються поблизу джерел палива. Міста можуть використовувати теплоелектроцентралі, що забезпечують місто не тільки електроенергією, а й гарячим водопостачанням і теплом.

Електроенергія від генератора передається на розподільчі пристрої електростанції. Потім відбувається трансформація енергії та подача електрики в лінію електропередачі високої напруги. Лінії електропередач, призначені для передавання електроенергії на великі дистанції, повинні мати високу пропускну спроможність, мінімальні втрати і включати дроти, опори, кріплення, кабелі захисту від блискавки, а також допоміжні пристрої. Для подальшого розподілу електроенергії розподільчі підстанції приєднуються до основних високовольтних ліній, які, своєю чергою, передають електроенергію на понижувальні підстанції.

Від понижувальної підстанції електрична енергія розподіляється лініями електропередач до трансформаторних підстанцій. Такі підстанції знижують напругу змінного струму з частотою 50 Гц і використовуються для подачі електроенергії в житлові будинки, окремі населені пункти або невеликі виробничі об'єкти. Із трансформаторної підстанції електрична енергія передається спеціально обраними провідниками на розподільні пункти в спеціальних приміщеннях (розподільні щити). Звідти електрична енергія подається на квартирний лічильник.

Трансформаторна підстанція - це електроустановка, призначена для зміни напруги і розподілу електричної енергії серед споживачів. Якщо підстанція виготовлена на заводі, вона називається комплектною трансформаторною підстанцією.

Комплектна трансформаторна підстанція являє собою підстанцію, що складається з трансформаторів і блокових пристроїв (КРУ і КРУН та інших елементів), які постачають або в зібраному вигляді, або у вигляді, повністю готовому до складання.

1.1.1 Конструкція КТП

Комплектна трансформаторна підстанція (КТП) складається з таких основних компонентів:

1. Високовольтне введення: це система, яка забезпечує введення високої напруги (зазвичай 6 кВ, 10 кВ або 35 кВ) від зовнішньої мережі до підстанції. Введення може бути повітряним або кабельним.

2. Силовий трансформатор: він служить для перетворення високої напруги на вході до нижчої напруги на виході (зазвичай 0,4 кВ), яка використовується для живлення споживачів. У КТП зазвичай використовуються сухі чи масляні трансформатори.

3. Розподільний пристрій низької напруги (РПНН): це система шин та комутаційних апаратів, які забезпечують розподіл електроенергії від силового трансформатора до споживачів.

4. Система захисту та автоматики: включає пристрої релейного захисту, що забезпечують безпеку експлуатації КТП і захист обладнання від аварійних режимів.

5. Система контролю та управління: включає вимірювальні прилади, індикатори стану обладнання та пристрої керування, які дозволяють контролювати та керувати роботою КТП.

6. Корпус: забезпечує захист обладнання від зовнішніх впливів та забезпечує необхідний ступінь безпеки для персоналу, який обслуговує КТП. Корпус може бути виготовлений з металу, бетону або композитних

матеріалів.

7. Система заземлення: забезпечує надійне з'єднання обладнання із заземлюючим контуром та запобігає виникненню небезпечних потенціалів на корпусах обладнання.

8. Кабельні з'єднання та шини: забезпечують електричний зв'язок між різними елементами КТП, такими як силовий трансформатор, розподільний пристрій та система заземлення.

9. Система вентиляції та кондиціювання: забезпечує підтримку необхідного температурного режиму всередині корпусу КТП для забезпечення надійної роботи обладнання та запобігання його перегріву.

Всі ці компоненти збираються та монтуються на заводі-виробнику у вигляді готових до встановлення блоків, що спрощує та прискорює процес монтажу та введення в експлуатацію КТП на місці встановлення.

1.1.2 Типи КТП

Існує кілька типів підстанцій 10/0,4 кВ, влаштування яких залежить від їхньої потужності, призначення та умов роботи.

Щоглові та стовпові підстанції:

У малих населених пунктах та дачних поселеннях для електропостачання споживачів зазвичай використовуються стовпові та щоглові трансформаторні підстанції, що мають такі переваги, як простота конструкції та зручність обслуговування.



Рисунок 1.1 – Стовпова підстанція[9]

Зокрема, стовпова трансформаторна підстанція зазвичай встановлюється прямо на стрижневій опорі ПЛ-10 (або ПЛ-6) або на окремій опорі типу СВ-105, СВ-110 та ін. Щогла трансформаторна підстанція відрізняється від стовпової тим, що вона розміщується між двома окремо стоячими опорами.

Влаштована стовпова (щогла) підстанція таким чином:

Безпосередньо на опорі встановлюють несучу раму із силовим трансформатором невеликої потужності (як правило, у діапазоні 16-160 кВА).

Над трансформатором встановлена рама із кріпленнями для високовольтних запобіжників типу ПКТ, що забезпечують захист трансформатора від надструму. Від запобіжників вниз йдуть дроти до введів високої напруги силового трансформатора, а вгору йдуть провідники до лінії живлення електропередач.

Для запобігання зхльостування проводів від запобіжників до ПЛ додатково кріпляться на опорних ізоляторах, встановлених на спеціальній траверсі. На ізоляторах цієї траверси також встановлюються розрядники або обмежувачі перенапруги для захисту від атмосферних та комутаційних перенапруг в електроенергетичній мережі.

Для зняття напруги та забезпечення видимого розриву в електроланцюзі на опорі можна додатково встановити високовольтний роз'єднувач. Він встановлюється у розрив дроту від ПЛ на окремій рамі. Привід цього роз'єднувача розташовується біля основи опори, з'єднуючись із самим роз'єднувачем за допомогою валу. Рукоятка приводу виконується знімною, а сам привод фіксується замком для запобігання проведенню операцій сторонніми особами.

Під силовим трансформатором встановлена шафа низької напруги (0,4кВ). Ця шафа підключена до введів низької напруги трансформатора. У цій шафі розміщуються комутаційні та захисні пристрої (рубильники, запобіжники або автомати), а також кабель для підключення споживачів.

Залежно від кількості споживачів та навантаження, можуть бути

декілька вихідних ліній, кожна з яких захищена окремим автоматичним вимикачем. Коли електропостачання споживачів відбувається повітряної лінії електропередачі, захист від перенапруги може бути виконана з використанням ОПН.

Комплектні трансформаторні підстанції (КТП):

Наступний тип – комплектні трансформаторні підстанції (КТП). Це готові рішення від виробників, які постачаються у зборі або окремими модулями для подальшої установки на місці.

КТП можуть бути різних потужностей та виготовлятися в металевому, бетонному чи сендвіч-панельному корпусі. Малопотужні підстанції виготовляються в металевому корпусі та найчастіше встановлюються у сільській місцевості, а також використовуються для енергопостачання тимчасових об'єктів (будівлі, охоронні пункти тощо).



Рисунок 1.2 – Комплектна трансформаторна підстанція[9]

Металева комплектна трансформаторна підстанція (КТП) у конструктивному плані має те саме обладнання, що і стовпові (щоглові)

підстанції, але всі елементи в даному випадку вмонтовані всередину металевого корпусу КТП. Зазначена підстанція встановлюється саме на попередньо підготовлений фундамент чи опорну конструкцію. З метою забезпечення зручності та безпеки в процесі експлуатації та обслуговування КТП, комутаційні пристрої та захисні апарати різної напруги встановлюються в окремі відсіки із замикаючими механізмами. Залежно від конкретної конструкції КТП силовий трансформатор може встановлюватися в окремий відсік або розташовуватися відкритим способом.

Корпус та металеві елементи КТП повинні бути заземлені для забезпечення безпеки експлуатації та формування системи заземлення електромережі. Більші КТП в бетонному корпусі або корпусі з сендвіч-панелей встановлюють, як правило, в житлових районах для подачі електроенергії на кілька багатоквартирних будівель або на ділянках з високим навантаженням.

Трансформаторна підстанція 10/0,4 кВ у спеціальній споруді:

Крім КТП, для постачання багатоквартирних будинків та інших груп споживачів нерідко застосовуються підстанції, розміщені у спеціалізованих будинках. Будівля підстанції 10/0,4 кВ будується за однотипним проєктом з урахуванням місцевих особливостей та рівня навантаження споживачів.

Така підстанція може оснащуватися одним або декількома силовими трансформаторами, які зазвичай знижують потужність до 1000 кВА.



Рисунок 1.3 – КТП у спеціальній споруді[9]

З метою безпеки та зручності обслуговування, розподільні пристрої високої та низької напруги розташовуються в різних кімнатах. Силовий трансформатор встановлюється окремо. У розподільчому пристрої 10 кВ розміщуються високовольтні вимикачі та запобіжники, роз'єднувачі та вкатний візок КРУ, що створюють видимий розрив безпеки між трансформатором та вимикачем. З боку низької напруги розміщується автоматичний вимикач та автоматичні вимикачі ліній споживачів. Для безпеки при обслуговуванні ліній 0,4 кВ також необхідний видимий розрив — для цього в ланцюзі встановлюють рубильники. Для захисту електричної мережі від перенапруг з боку ВН та ПН встановлюються розрядники або ОПН. При необхідності контролю напруги та навантаження на боці високої напруги встановлюються трансформатори струму та напруги, а на боці 0,4 кВ трансформатори струму.

Трансформаторні підстанції на підприємствах.

На великих підприємствах, де є значна кількість споживачів рівня 0,4 кВ, для організації розподілу електроенергії використовуються розподільчі установки 0,4 кВ в окремих будівлях або у виробничих приміщеннях. Розподільна система 0,4 кВ може здійснюватися на базі однієї або кількох панелей керування (щитів), які одержують енергію від одного або двох

джерел живлення (трансформаторів) 10/0,4 кВ.



Рисунок 1.4 – КТП на підприємствах[9]

Якщо необхідно забезпечити надійне та безперервне електроживлення споживача, то встановлюються два джерела електроживлення (трансформаторні підстанції). В результаті розподільний апарат поділяється на дві ділянки шин, кожна з яких приєднується до окремого сухого трансформатора. Між даними ділянками встановлюється автоматичний вимикач з моторним приводом або контактором, за допомогою включення якого виконується подача напруги на одну з ділянок при припиненні напруги подачі на одному з трансформаторів.

У розподільчому апараті, крім автоматичних перемикачів, можуть бути встановлені модульні перемикачі для полегшення обслуговування окремих ділянок системи розподілу. Для контролю за станом роботи обладнання на панелях встановлені сигнальні лампочки, вольтметри, амперметри та прилади обліку, а при необхідності і трансформатори струму. Крім цього, у щити 0,4 кВ можуть бути додатково встановлені різні системи захисту та автоматизації, наприклад, захист від короткого замикання та автоматика включення аварійної освітленості та ін.

1.2 Особливості обслуговування та експлуатації комплектної трансформаторної підстанції

1.2.1 Порядок встановлення

КТП встановлюється на залізобетонній основі, розміри якого в плані перевищують розмір основи КТП на 300 мм. Конструкція основи та відсіпання під нього проєктуються відповідно до інженерно-геологічної ситуації в районі встановлення КТП. Шинні перемички встановлювати через дверцята шафи, після монтажу ретельно перевірити всі контактні з'єднання. Вантажно-розвантажувальні роботи КТП проводити за спеціально передбачені на підставі місця строкування. При встановленні КТП орієнтувати її так, щоб датчик фотореле (розташований над дверима відсіку РУНН) у темний час доби був захищений від короткочасного влучення світла фар автотранспорту або інших джерел світла, які можуть спричинити хибне спрацювання фотореле. Кінцеві опори, для підключення КТП з повітряним вводом ВН, щоб уникнути руйнування прохідних ізоляторів від сумарного навантаження на проводи ПЛ-6 (10) кВ, повинні встановлюватися на відстані не більше 6 м від КТП.

1.2.2 Підготовка до роботи

Перед введенням в експлуатацію новозмонтованої КТП необхідно виконати пуско-налагоджувальні роботи відповідно до вимог ПУЕ силами організації, що спеціалізується на проведенні даних робіт. При підготовці КТП до роботи необхідно провести її огляд і переконатися у відсутності видимих несправностей. Перед включенням КТП у роботу, у разі потреби, мають бути проведені роботи, передбачені для періодичного обслуговування.

Під час підготовки КТП до роботи необхідно:

- встановити повітряні введення ВН (для підстанції з повітряним введенням);
- зачистити фарбу на швелери основи КТП та підключити (методом зварювання) заземлюючий контур;
- встановити та закріпити силовий трансформатор, підключити до нього силові шини ВН та ПН;

- підготувати трансформатор до включення відповідно до його експлуатаційної документації;
- перевірити та, у разі потреби, підтягнути всі болтові з'єднання в місцях підключення комутаційної апаратури до шин у відсіках ВН та РУНН;
- встановити високовольні запобіжники та підключити КТП до ліній 6 (10) та 0,4 кВ.
- Закрити всі двері КТП.

1.2.3 Заходи безпеки

При монтажі, налагодженні та експлуатації КТП повинні дотримуватися "Правила техніки безпеки при експлуатації електричних станцій та підстанцій". До обслуговування КТП допускається електротехнічний персонал, який вивчив пристрій КТП, інструкцію з її експлуатації та справжній паспорт, які пройшли атестацію та перевірку знань вимог безпеки, що мають групу з електробезпеки не нижче 4 та мають відповідні посвідчення. Під час експлуатації КТП усі її двері, що мають замки, повинні бути закриті на ключ. Ремонтні роботи в КТП можуть проводитися при повністю знятій напрузі та увімкнених ножах заземлення з боку ВН. Для зняття високої напруги з вступних пристроїв КТП без навантаження, необхідно передбачати встановлення роз'єднувачів на кінцевих опорах ліній живлення (роз'єднувачі в комплект поставки КТП не входять).

1.2.4 Технічне обслуговування

Профілактичні роботи з перевірки обладнання та апаратів КТП проводити відповідно до вимог ПУЕ не рідше одного разу на три місяці. При проведенні профілактичних оглядів особливу увагу приділяти стану дугогасних контактів вимикачів та роз'єднувачів. Допустима кількість відключень вимикачів навантаження без заміни дугогасних вкладишів та контактів визначається ступенем зношування вкладишів та ступенем обгорання рухомих та нерухомих дугогасних контактів, які не повинні перевищувати граничні значення, встановлені в експлуатаційній документації на вимикач навантаження. Дугогасні контакти опилити

напилком, зачистити дрібним наждачним папером, промити бензином. Наявність мастила на дугогасних контактах не допускається. Після коротких замикань необхідно оглянути роз'єднувачі, при необхідності провести ремонт із заміною зношених чи пошкоджених деталей та вузлів. Обслуговування фотореле зводиться до підтримки в чистому стані скла фоторезистора та видалення пилу з корпусу реле. Обслуговування силового трансформатора проводити відповідно до вимог експлуатаційної документації на нього.

1.2.5 Аварійні ситуації

На об'єктах із трансформаторними підстанціями можуть виникати різні надзвичайні ситуації, що здатні спричинити вибухи, пожежі та відключення електропостачання. Причини вибуху трансформатора різноманітні. Одними з найчастіших є удари блискавок, які можуть спричинити перевантаження трансформаторів. Також пошкодження кабелів або обладнання на інших ділянках електромережі може призвести до надходження надмірної кількості електроенергії в трансформатор і, як наслідок, його вибуху.

Трансформатори обладнані захисними ланцюгами, призначеними для захисту системи в разі стрибків напруги. Однак ці захисні пристрої активуються до 60 мілісекунд і можуть виявитися недостатньо швидкими для запобігання вибуху трансформатора. Крім цього, знос і корозія протягом часу можуть знижувати міцність ізоляції дроту або інших компонентів трансформатора, підвищуючи ймовірність його відмови. Незалежно від причини - чи то корозія ізоляції, чи то удар блискавки - результат буде негативним. Тому має бути передбачено встановлення грозозахисту і високовольтних вимикачів для високого і низького боку. У разі вибуху трансформатора відбувається переривання електропостачання житлових будинків або підприємств, пов'язаних із ним. Електричні аварійні служби повинні замінити пошкоджене обладнання, попередньо відключивши вхідну лінію електроживлення для запобігання додаткових пошкоджень. Залежно від ступеня пошкодження, аварійні служби можуть тимчасово відключити

інші електричні служби поблизу з метою запобігання навантаженню на електромережу під час заміни пошкодженого трансформатора.

Аварійні ситуації на КТП можуть виникати внаслідок помилок персоналу (технологічних порушень, зумовлених людським фактором), неякісного ремонту на КТП (ослаблення контактів проводів або наявності виробничих дефектів), несправності системи захисту трансформаторної підстанції, неправильного заземлення, а також перенапруги в мережі.

Технічне обслуговування має плануватися з урахуванням фактичного стану. Несправності, пов'язані з обмотками, ймовірно, є основною причиною серйозних відмов. Поломки прохідних ізоляторів у більшості випадків призводять до серйозних наслідків на зразок вибуху або пожежі. Мінімізація ризику загоряння в трансформаторі являє собою багатоступеневий процес. На першому етапі необхідно мінімізувати ймовірність відмови трансформатора через пожежу. На наступному етапі слід мінімізувати ймовірність відмови трансформатора шляхом вибору і специфікації компонентів високої якості з низьким рівнем ризику загоряння.

1.2.6 Периметральна огорода [3]

Відповідно до вимог ПУЕ 6, 7, п. 4.2.41: Територія трансформаторної підстанції (ПС) має бути огорожена зовнішнім парканом відповідно до вимог норм технологічного проектування ПС. На території ПС слід захищати ОРУ та силові трансформатори внутрішнім парканом висотою 1,6 м на відстані 950 мм від струмопровідних частин.

1.2.7 Консервація та розконсервація[2]

Перед відправкою КТП споживачеві з підприємства-виробника всі незабарвлені деталі КТП консервуються відповідно до ДСТУ 9.014, варіант захисту – ВЗ-4. Перед початком експлуатації КТП необхідно розконсервувати, дотримуючись наступного порядку:

- очистити підстанцію від пилу та бруду;
- зняти мастило із законсервованих поверхонь;
- перевірити, чи не ослаблені різьбові кріплення після транспортування;

- здійснити зовнішній огляд: наявність тріщин і великих сколів не допускаються, ретельно протерти поверхні ізоляторів ганчіркою, змоченою в бензині.

Якщо КТП зберігається понад шість місяців, її необхідно консервувати. Як консервуюче мастило рекомендується застосовувати мастило ПВК ДСТУ 19537

1.2.8 Упаковка, транспортування та зберігання

КТП може транспортуватися залізничним чи автомобільним транспортом, у своїй вона має бути надійно закріплена запобігання ушкоджень. КТП транспортується без загальної упаковки. Вводи, прохідні ізолятори, обмежувачі перенапруги, запобіжники та комплект металовиробів укладені та закріплені всередині корпусу КТП. Технічна документація знаходиться у відсіку РУНН. Силовий трансформатор транспортується окремо від КТП.

1.2.9 Умови експлуатації[2]

КТП призначена для експлуатації на відкритому повітрі за таких умов впливу:

- Висота над рівнем моря не більше 1000 м;
- Температура навколишнього повітря від мінус 45 °С до плюс 40 °С;
- кліматичне виконання У згідно з ДСТУ 15150-69;
- категорії розміщення 1 за ДСТУ 15543.1-89;
- довкілля - типу II за ДСТУ 15150-69);
- вітровий район I-V (БНтаП 2.01.07-85);
- сніговий район I-V (БНтаП 2.01.07-85);
- ожеледь район I-V (БНтаП 2.01.07-85);
- ступінь вогнестійкості – IV;
- сейсмостійкість – 6 балів за шкалою MSK-64;

- Навколишнє середовище невибухонебезпечне, що не містить струмопровідного пилу, агресивних газів і пар у концентраціях, що знижують параметри КТП у неприпустимих межах;

- Зовнішня ізоляція згідно з ДСТУ 9920-75 - категорія "А".

-Відносна вологість навколишнього повітря не більше 80% при температурі 20 °С КТП не призначені для роботи в умовах трясіння та вібрації.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Розрахунок параметрів та вибір електричних апаратів

Високовольтні електричні апарати вибираються за умовами тривалого режиму роботи і перевіряються за умовами коротких замикань. При цьому для апаратів проводиться:

- вибір за напругою;
- перевірка на електродинамічну стійкість;
- перевірка на термічну стійкість;
- вибір по виконанню (для зовнішньої або внутрішньої установки).

Вибору підлягають:

- основний силовий трансформатор;
- вимикачі на стороні вищої та нижчої напруг.

2.1.1 Вибір характеристик трансформатора

Відповідно до технічного завдання було задано технічні характеристики вибраного трансформатора ТСЗ - 1600/10, параметри наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Каталожні дані трансформатора

Параметри	Значення
Номінальна потужність, кВА	1600
Номінальна напруга на стороні ВН, кВ	10
Номінальна напруга на стороні НН, кВ	0,4
Напруга КЗ, %	6.5
Струм НХ, %	1.3
Втрати КЗ, кВт	13.9
Втрати НХ, кВт	2.8
Схема та група з'єднань обмоток	Д/Уn-11

При виборі пріоритет віддали трансформатору з природнім повітряним охолодженням. Так як вплив повітряного зазору на параметри сухого трансформатора є більш вираженим. Також із ряду інших факторів, таких як:

1. Менший розмір і вага: сухий трансформатор має менший об'єм і вагу в порівнянні з масляним трансформатором, так як не вимагає використання олії як ізолюючого та охолоджуючого середовища. Це полегшує транспортування, встановлення та обслуговування обладнання.

2. Безпека: відсутність олії робить сухий трансформатор безпечнішим в експлуатації, оскільки виключається можливість займання або вибуху олії, що може статися в масляних трансформаторах за певних умов.

3. Екологічність: відсутність олії також означає, що сухі трансформатори менш шкідливі для навколишнього середовища, оскільки вони не виробляють жодних токсичних викидів і не вимагають спеціального поводження з відпрацьованою олією.

4. Простота обслуговування: сухі трансформатори вимагають менше уваги та обслуговування порівняно з масляними трансформаторами, оскільки вони не вимагають регулярної перевірки рівня олії та її заміни.

5. Низькі втрати тепла: завдяки своїм конструктивним особливостям сухі трансформатори мають нижчі втрати тепла, що призводить до більш ефективного перетворення енергії та зниження витрат на електроенергію.

6. Стійкість до коливань температури: сухі трансформатори краще адаптуються до коливань температури, ніж масляні, завдяки своїй конструкції та здатності розсіювати тепло.

7. Стійкість до коротких замикань: сухі трансформатори здатні витримувати короткочасні навантаження без шкоди для свого функціонування, що може бути важливим у деяких додатках.

Визначення струмів проводиться для випадку установки на підстанції силового трансформатора наступному ступені потужності, тобто 1.6 МВА.

Максимальний струм на вищій стороні розраховується за формулою:

$$I_{\max_ВН} = \frac{1.4 \cdot S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}} ;$$

$$I_{\max_ВН} = \frac{1.4 \cdot 1.6 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 129.326 \text{ А},$$

де S_H – номінальна потужність трансформатора, Вт;

$U_{ВН}$ – номінальна напруга на стороні ВН, В.

Максимальний струм на нижчій стороні розраховуємо за формулою:

$$I_{\max_НН} = \frac{1.4 \cdot S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{НН}} ;$$

$$I_{\max_НН} = \frac{1.4 \cdot 1.6 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 0.4 \cdot 10^3} = 3.233 \cdot 10^3 \text{ А},$$

де $U_{НН}$ – номінальна напруга на стороні НН, В.

2.1.2 Розрахунок струмів короткого замикання

Електричні апарати та шини у розподільчих пристроях повинні проходити перевірку на стійкість до електродинамічних та теплових навантажень. Вимикачі (автоматичні та запобіжники) також перевіряються на відповідність відключаючої здатності. Ця перевірка проводиться з використанням розрахункової моделі короткого замикання, де визначаються точки короткого замикання та проводяться розрахунки струмів короткого замикання.

Для створення розрахункової моделі вибору апаратури та провідників для одного ланцюга вибирається режим, який передбачає наявність максимального струму короткого замикання. Точка короткого замикання вибирається таким чином, щоб при виникненні пошкодження в ній, через апаратуру або провідник, що вибираються, проходив максимальний струм.

Короткі замикання не завжди означають навмисне з'єднання двох точок ланцюга. Вони можуть виникати через різні причини, такі як пошкодження ізоляції, її пробіи через перенапруження і старіння, обрив, начерки та

з'єднання проводів повітряних ліній, помилки персоналу і так далі. Внаслідок короткого замикання виникають небезпечні струми в ланцюгах, здатні пошкодити елементи мережі. Тому важливо вживати заходів щодо запобігання коротким замиканням та мінімізації їх наслідків.

Розглянемо випадок трифазного короткого замикання на шинах підстанції. Даний вид короткого замикання є найбільш важким, тому що супроводжується протіканням значних струмів КЗ.

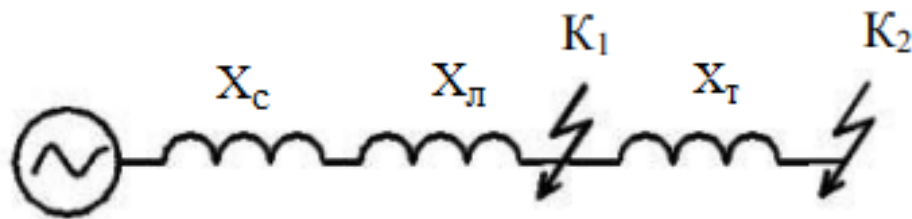


Рисунок 2.1 - Схема заміщення в режимі короткого замикання.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані

Параметри	Значення
Потужність короткого замикання, МВА	100
Базова напруга, кВ	10
Питомий індуктивний опір, Ом/км	10
Довжина лінії, км	0,3
ЕРС системи джерела	1

Опір системи:

$$X_c = \frac{U_6^2}{S_{к.з}}$$

$$X_c = \frac{10^2}{100} = 1 \text{ Ом}$$

де U_6 – базова напруга, кВ;

$S_{к.з}$ – потужність короткого замикання, МВА.

Опір лінії:

$$X_l = X_0 L$$

$$X_l = 0,4 \cdot 0,3 = 0,12 \text{ Ом}$$

де X_0 – питомий індуктивний опір, Ом/км;

L – довжина лінії, км.

Опір трансформатора:

$$X_T = \frac{x_T \cdot U_6^2}{100 \cdot S_H}$$

$$X_T = \frac{6,5 \cdot 10^2}{100 \cdot 1,6} = 4,063 \text{ Ом}$$

де S_H – номінальна потужність трансформатора, Вт;

U_6 – базова напруга, кВ;

X_T – відносний опір трансформатора, який дорівнює напрузі к.з.

Результуючий опір для точки K1:

$$X_1 = X_c + X_L$$

$$X_1 = 1 + 0,12 = 1,12 \text{ Ом}$$

Струм короткого замикання в сталому режимі від системи в точці K1:

$$E_{\phi 1} = E_{дж} \frac{U_6}{U_{В.Н}}$$

$$E_{\phi 1} = 1 \cdot \frac{10}{10} = 1$$

$$I_{к.з1} = \frac{E_{\phi 1}}{X_1}$$

$$I_{к.з1} = \frac{1}{1,12} = 0,893 \text{ А}$$

де $E_{дж}$ – ЕРС системи джерела;

$U_{В.Н}$ – номінальна напруга на стороні ВН, В.

Ударний струм в точці K1:

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{K1} ;$$

$$i_{уд1} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 0,893 = 2,273 \text{ кА},$$

де $K_{уд}$ – ударний коефіцієнт.

Результуючий опір для точки K2:

$$X_2 = X_c + X_T + X_L$$

$$X_2 = 1 + 4,063 + 0,12 = 5,183 \text{ Ом}$$

Струм короткого замикання в сталому режимі від системи в точці К2:

$$E_{\phi 1} = E_{\text{дж}} \frac{U_6}{U_{\text{н.н}}}$$

$$E_{\phi 2} = 1 \cdot \frac{10}{0,4} = 25$$

$$I_{\text{к.з2}} = \frac{E_{\phi 2}}{X_2}$$

$$I_{\text{к.з2}} = \frac{25}{5,183} = 4,824 \text{ А}$$

де $U_{\text{н.н}}$ – номінальна напруга на стороні НН, В.

Ударний струм в точці К₂:

$$i_{\text{уд2}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{К2}} ;$$

$$i_{\text{уд2}} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 4,824 = 12,28 \text{ кА.}$$

2.1.3 Вибір розподільчого пристрою високої напруги

Розподільчий пристрій високої напруги вибирається за умовами:

$$U_{\text{н}} \geq U_{\text{уст.}};$$

$$10 = 10 \text{ кВ};$$

$$I_{\text{відкл}} \geq i_{\text{уд1}};$$

$$20 > 2,272 \text{ кА};$$

$$I_{\text{н}} \geq i_{\text{max_вн}};$$

$$630 > 129,326 \text{ А},$$

де $U_{\text{н}}$ - номінальна напруга КРУ, кВ;

$U_{\text{уст.}}$ - усталена напруга мережі, кВ;

$I_{\text{відкл}}$ - максимальний струм відключення вимикача, кА;

$i_{\text{уд1}}$ - ударний струм в точці К1, кА;

$I_{\text{н}}$ - номінальний струм КРУ, А;

$i_{\text{max_вн}}$ - максимальний струм на вищій стороні, А.

На стороні високої напруги обираємо для встановлення комплектний розподільчий пристрій типу КРУ-СВЭЛ-К-1.3, параметри

наведені в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Каталожні дані КРУ-СВЭЛ-К-1.3

Параметри	Значення
Номинальна напруга, кВ	10
Номинальный ток, А	630
Номинальный ток отключения выключателя, кА	20
Струм електродинамічної стійкості, кА	51
Струм термічної стійкості, кА	20
Габаритні розміри комірки, мм: - ширина - глибина - висота	650 1000 2000
Маса комірки, кг	Не більше 700

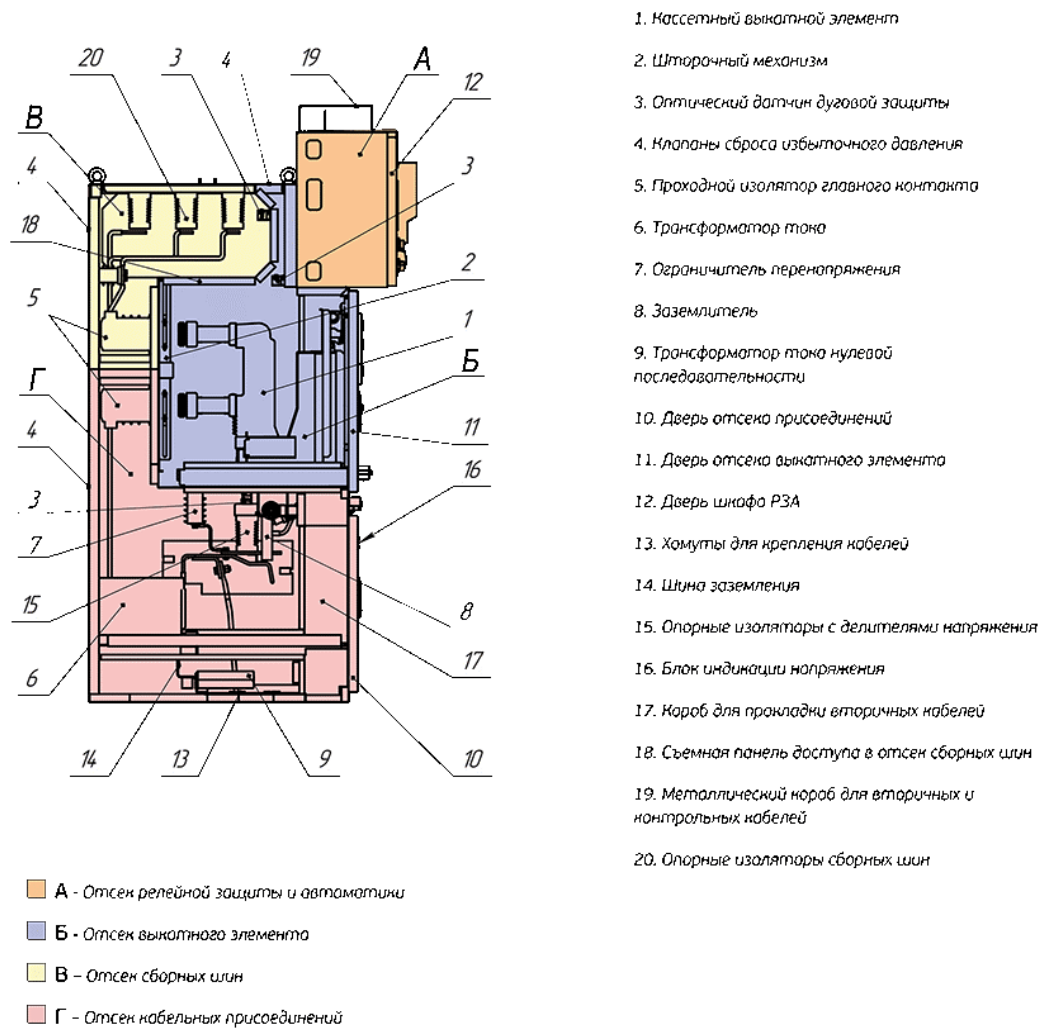


Рисунок 2.2 – Креслення КРУ-СВЭЛ-К-1.3[5]

2.1.4 Вибір розподільчого пристрою низької напруги

Розподільчий пристрій низької напруги вибирається за умовами:

$$U_{н.щ} \geq U_{н.м.};$$

$$0,4 = 0,4 \text{ кВ};$$

$$I_{відкл} \geq i_{уд2};$$

$$187 > 12,28 \text{ кА};$$

$$I_n \geq i_{max_нн};$$

$$4000 > 3233 \text{ А},$$

де $U_{н.щ}$ - номінальна напруга ГРЩ, кВ;

$U_{н.м.}$ - напруга мережі після трансформації, кВ;

$I_{відкл}$ - максимальний струм відключення вимикача, кА;

$i_{уд2}$ - ударний струм в точці К2, кА;

I_n - номінальний струм ГРЩ, А;

$i_{max_нн}$ - максимальний струм на вищій стороні, А.

На стороні низької напруги обираємо для встановлення головний розподільчий щит типу ГРЩ-ШВ-01-4000, параметри наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Каталожні дані ГРЩ-ШВ-01-4000

Параметри	Значення
Номінальна напруга, кВ	0,4
Номінальний струм, А	4000
Номінальний струм відключення вимикача, кА	187
Наскрізний струм к.з. кА/1 сек	85
Номінальний струм відхідних ліній, А	5 ліній по 400
Габаритні розміри комірки, мм	
ширина	1000
глибина	800
висота	2000



Рисунок 2.3 – Креслення ГРІЦ-ШВ-01-4000[7]

2.2 Побудова КТП

КТП 10/0,4 кВ складається з 3-х блоків: силового сухого трансформатора із захисним коробом (ТСЗ-1600/10), розподільчого пристрою високої напруги 10 кВ (КРУ-СВЭЛ-К-1.3) та розподільчого пристрою низької напруги 0,4 кВ (ГРІЦ-ШВ-01-4000). Усі 3 блоки для безпеки розташовані в різних розділених кімнатах. Введення 0,4 кВ від силового трансформатора та висновки ліній 0,4 кВ з шафи виконуються ізольованими проводами, що прокладаються в коробах. КТП має кабельний (підземний) спосіб підключення з сторони ВН та НН.

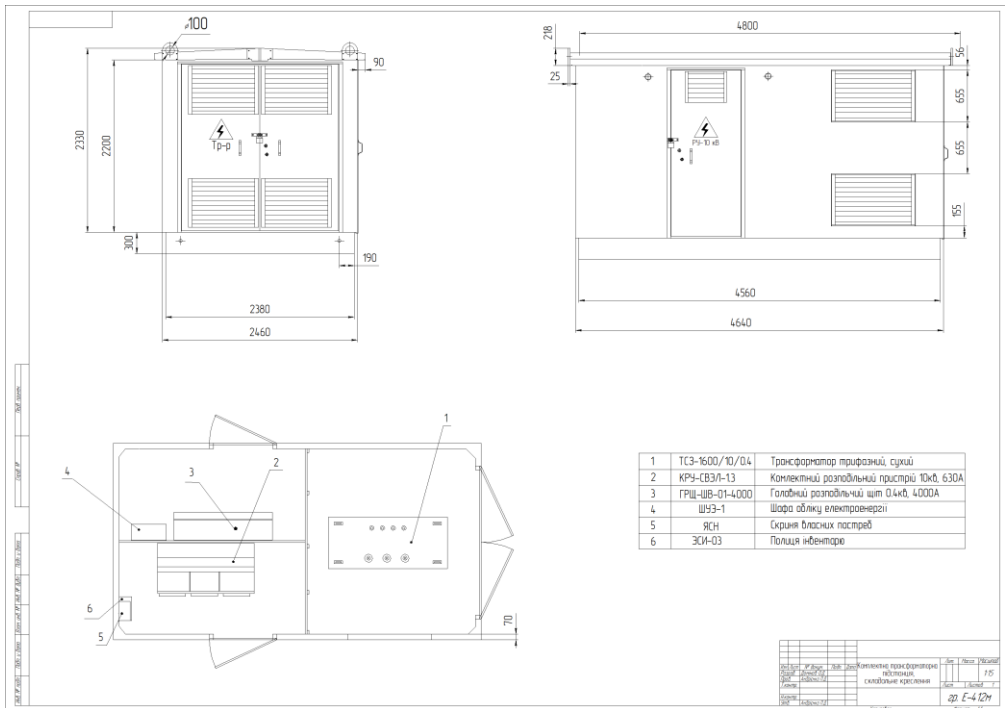


Рисунок 2.4 – Креслення КТП

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

У сучасному світі, де технології відіграють ключову роль розвитку економіки та суспільства, трансформатори є одними з основних елементів електроенергетичних систем. Вони забезпечують передачу та розподілення електроенергії, а також перетворення напруги та струму. Важливим елементом трансформатора є повітряний зазор.

Повітряний зазор є простором, заповненим повітрям, яке розділяє первинну і вторинну обмотки трансформатора. Його основне призначення – забезпечити ізоляцію між обмотками, запобігти короткому замиканню та знизити втрати на вихрові струми. Однак, повітряний зазор також впливає на параметри трансформатора, такі як коефіцієнт трансформації, втрати та рівень шуму.

Повітря є менш досконалим ізолюючим і охолодним середовищем, ніж трансформаторна олія. Тому в сухих трансформаторах доводиться всі ізоляційні проміжки та охолоджуючі канали робити більшими, а електромагнітні навантаження активних матеріалів допускати меншими, ніж у олійних трансформаторах. Внаслідок цього маса та вартість активних матеріалів у сухих трансформаторах виявляються суттєво вищими, ніж в олійних.

Дослідження впливу повітряного зазору на параметри трансформатора дозволяє оптимізувати конструкцію трансформаторів, знизити втрати, покращити їхню ефективність та виявити оптимальні параметри проєктування та експлуатації трансформаторів у різних умовах.

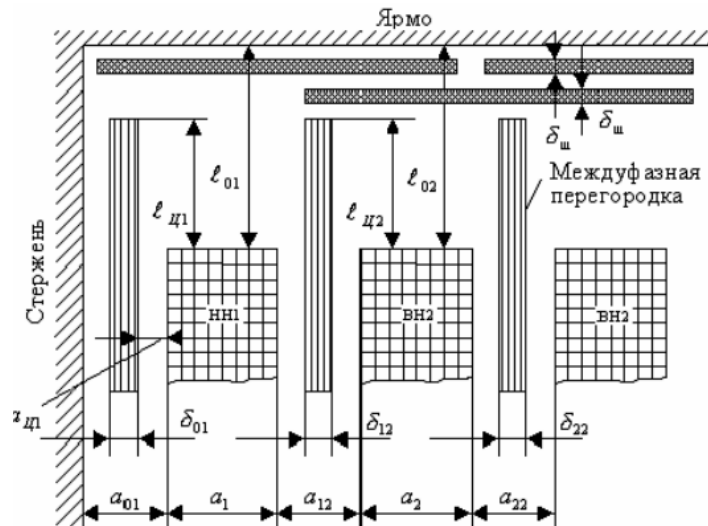


Рисунок 3.1 - Головна ізоляція обмоток ВН та НН[6]

В даному дослідженні розглядається вплив ізоляційного (повітряного) зазору (α_{12}) між обмотками ВН та НН, розмірами 20, 30 та 40 мм, на параметри сухого силового трансформатора потужністю 1600 кВА.

Було здійснено розрахунок для трансформатора з повітряними зазорами розмірами 20 мм, 30 мм і 40 мм, відповідно. Наведено порядок розрахунку сухого трансформатора з повітряним зазором 40 мм.

3.1 Порядок розрахунку сухого трансформатора з повітряним зазором 40 мм

3.1.1 Розрахунок основних електричних величин

Розрахунок трансформатора слід починати з встановлення основних електричних параметрів, а саме: потужності однієї фази та одного стрижня, номінальних значень струмів на сторонах високої (ВН) та низької (НН) напруги, фазових струмів та напруг.

Розрахунок лінійних та фазних напруг та струмів обмоток:

Потужність однієї фази:

$$S_{\phi} = \frac{S}{m};$$

$$S_{\phi} = \frac{1.6 \cdot 10^6}{3} = 5.333 \cdot 10^5 \text{ ВА},$$

де S - номінальна потужність трансформатора, ВА;

m - кількість фаз.

Потужність одного стрижня:

$$S' = S_{\phi}$$

$$S' = 533333,33 \text{ ВА}$$

Лінійний струм обмотки НН:

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_1}$$

$$I_1 = \frac{1,6 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 400} = 2309,401 \text{ А}$$

де U_1 - номінальні лінійні напруги обмотки НН, В.

Лінійний струм обмотки ВН:

$$I_2 = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_2}$$

$$I_2 = \frac{1,6 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot (1 \cdot 10^4)} = 92,376 \text{ А}$$

де U_2 - номінальні лінійні напруги обмотки ВН, В.

Фазний струм обмотки НН:

$$I_{\phi 1} = I_1;$$

$$I_{\phi 1} = 2309.401 \text{ А},$$

де I_1 - лінійний струм обмотки НН, А.

Фазний струм обмотки ВН:

$$I_{\phi 2} = \frac{I_2}{\sqrt{3}};$$

$$I_{\phi 2} = \frac{92.376}{\sqrt{3}} = 53.333 \text{ А},$$

де I_2 - лінійний струм обмотки ВН, А.

Фазна напруга обмотки НН:

$$U_{\phi 1} = \frac{U_1}{\sqrt{3}};$$

$$U_{\phi 1} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.94 \text{ В},$$

де U_1 - номінальні лінійні напруги обмотки НН, В.

Фазна напруга обмотки ВН:

$$U_{\phi 2} = U_2;$$

$$U_{\phi 2} = 10000 \text{ В},$$

де U_2 - номінальні лінійні напруги обмотки ВН, В.

Вибір випробувальних напруг обмоток:

Випробувальна напруга обмотки НН:

$$U_{\text{исп1}} = 3 \cdot 10^3 \text{ В}.$$

Випробувальна напруга обмотки ВН:

$$U_{\text{исп2}} = 24 \cdot 10^3 \text{ В}.$$

Основні ізоляційні відстані в активній частині:

$a'_{12} = 0.04 \text{ м}$ - ізоляційна відстань між обмотками ВН та НН;

$a_{01} = 0.010 \text{ м}$ - радіальна ізоляційна відстань між стрижнем та обмоткою НН;

$a'_{22} = 0.045 \text{ м}$ - міжфазна ізоляційна відстань між обмотками ВН різних фаз ;

$\Gamma'_0 = 0.05 \text{ м}$ - відстань обмотки ВН від нижнього ярма;

$\Gamma''_0 = 0.05 \text{ м}$ - відстань обмотки ВН від верхнього ярма з пресуючими кільцями.

Середня ізоляційна відстань:

$$l_0 = \frac{\Gamma'_0 + \Gamma''_0}{2};$$

$$l_0 = \frac{0.05 + 0.05}{2} = 0.05 \text{ м.}$$

Визначення конструктивних параметрів оптимізаційного розрахунку:

Ширина двох обмоток:

$$a_{o612} = k \cdot 10^{-2} \sqrt[4]{\frac{S'}{10^3}}$$

$$a_{o612} = 0.6 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[4]{\frac{5.333 \cdot 10^5}{10^3}} = 0.029 \text{ м,}$$

де S' - потужність одного стрижня трансформатора, ВА,

k - коефіцієнт, по табл. 3.3 [6], $k = 0,6$.

Ширина каналу розсіювання:

$$a_p = a'_{12} + a_{o612};$$

$$a_p = 0.04 + 0.029 = 0.069 \text{ м,}$$

де a'_{12} - ізоляційна відстань між обмотками ВН та НН, м.

Розрахунок активної та реактивної складових напруги короткого замикання:

Активна складова напруги короткого замикання:

$$u_a = \frac{P_k \cdot 10^3}{10 \cdot S};$$

$$u_a = \frac{1.39 \cdot 10^4 \cdot 10^3}{10 \cdot (1.6 \cdot 10^6)} = 0.869 \%,$$

де P_k - втрати короткого замикання, Вт;

S - номінальна потужність трансформатора, ВА.

Реактивна складова напруги короткого замикання:

$$u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2};$$

$$u_p = \sqrt{6.5^2 - 0.869^2} = 6.442 \%,$$

де u_k - напруга короткого замикання, %.

3.1.2 Розрахунок основних розмірів трансформатора

Магнітна система служить основою трансформатора, і вибір її основних розмірів разом із розмірами обмоток визначає головні розміри активної частини та габарити трансформатора загалом.

Вибір схеми, конструкції та технології виготовлення магнітної системи:

Обираємо плоску трифазну стрижньову шихтовану магнітну систему з косими стиками в середніх пакетах і прямими стиками на крайньому пакеті. Пресування стрижнів бандажами з склоленти і ярем - сталевими балками .

Вибір марки та товщини листів сталі та типу ізоляції пластин, індукції в магнітній системі:

Матеріал магнітної системи – холоднокатана електротехнічна сталь марки 3404 товщиною 0,35 мм.

Коефіцієнт заповнення сталлю:

$$k_c = k_z \cdot k_{кр};$$

$$k_c = 0.97 \cdot 0.82 = 0.795,$$

де $k_{кр}$ - нагрівостійкість ізоляційного покриття, по табл. 2.6 [6], $k_{кр} = 0.82$;

k_z - коефіцієнт заповнення, по табл. 2.3 [6], $k_z = 0.97$.

Індукція в стрижні:

$$B_c = 1.6 \text{ Тл.}$$

Індукція у ярмі:

$$B_y = \frac{B_c}{k_y};$$

$$B_y = \frac{1.6}{1.03} = 1.553 \text{ Тл,}$$

де k_y - коефіцієнт підсилення ярма, по табл. 8.6 [6], $k_y = 1.03$.

Індукція в зазорі на косому стику:

$$B'_z = \frac{B_c}{\sqrt{2}};$$

$$B'_z = \frac{1.6}{\sqrt{2}} = 1.131 \text{ Тл.}$$

Індукція в зазорі на прямому стику:

$$B''_3 = B_c;$$

$$B''_3 = 1.6 \text{ Тл.}$$

Питомі втрати в сталі, по табл. 8.7 [6]:

$p_c = 1.295 \text{ Вт/кг}$ – в стрижні магнітної системи;

$p_{\text{я}} = 1.198 \text{ Вт/кг}$ – в ярмі магнітної системи.

Питома намагнічувальна потужність, по табл. 8.17 [6]:

$q_c = 1.775 \text{ ВА/кг}$ – в стрижні магнітної системи;

$q_{\text{я}} = 1.564 \text{ ВА/кг}$ – в ярмі магнітної системи;

$q'_3 = 25100 \text{ ВА/м}^2$ – для зазорів на прямих стиках;

$q''_3 = 3000 \text{ ВА/м}^2$ – для зазорів на косих стиках.

Розрахунок коефіцієнтів:

Коефіцієнт, що враховує відношення основних втрат в обмотках до втрат короткого замикання, по табл. 3.6 [6]:

$$k_d = 0.86.$$

Постійні коефіцієнти обмоток, по табл. 3.4, 3.5 [6]:

$$a = 1.75;$$

$$b = 0.23;$$

$$e' = 0.41.$$

Приймаємо, що коефіцієнт Роговського дорівнює:

$$k_p = 0.95;$$

Основний коефіцієнт:

$$A = 0.507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S' \cdot 10^{-3} \cdot a_p \cdot k_p}{f \cdot u_p \cdot B_c^2 \cdot k_c^2}};$$

$$A = 0.507 \cdot \sqrt[4]{\frac{5.333 \cdot 10^5 \cdot 10^{-3} \cdot 0.069 \cdot 0.95}{50 \cdot 6.442 \cdot 1.6^2 \cdot 0.795^2}} = 0.258.$$

Коефіцієнти A_1, A_2 :

$$A_1 = 5.663 \cdot 10^4 \cdot k_c \cdot A^3 \cdot a;$$

$$A_1 = 5.663 \cdot 10^4 \cdot 0.795 \cdot 0.258^3 \cdot 1.75 = 1350.677 \text{ кг},$$

$$A_2 = 3.605 \cdot 10^4 \cdot k_c \cdot A^2 \cdot l_0;$$

$$A_2 = 3.605 \cdot 10^4 \cdot 0.795 \cdot 0.258^2 \cdot 0.05 = 95.29 \text{ кг}.$$

Коефіцієнти B_1, B_2 :

$$B_1 = 2.4 \cdot 10^4 \cdot k_c \cdot k_{\text{я}} \cdot A^3 \cdot (a + b + e');$$

$$B_1 = 2.4 \cdot 10^4 \cdot 0.795 \cdot 1.03 \cdot 0.258^3 \cdot (1.75 + 0.23 + 0.41) = 805.218 \text{ кг},$$

$$B_2 = 2.4 \cdot 10^4 \cdot k_c \cdot k_{\text{я}} \cdot A^2 \cdot (a'_{12} + a'_{22});$$

$$B_2 = 2.4 \cdot 10^4 \cdot 0.795 \cdot 1.03 \cdot 0.258^2 \cdot (0.04 + 0.045) = 111.081 \text{ кг}.$$

Коефіцієнт C_1 :

$$C_1 = 1.27 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{S \cdot a^2}{k_d \cdot k_c^2 \cdot B_c^2 \cdot u_a \cdot A^2 \cdot 10^3};$$

$$C_1 = 1.27 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1.6 \cdot 10^6 \cdot 1.75^2}{0.86 \cdot 0.795^2 \cdot 1.6^2 \cdot 0.869 \cdot 0.258^2 \cdot 10^3} = 773.763 \text{ кг}.$$

Кратність ударного струму короткого замикання:

$$k_{\text{к.з}} = \sqrt{2} \cdot \frac{100}{u_{\text{к}}} \cdot \left[1 + e^{\left(\frac{-\pi \cdot u_a}{u_p} \right)} \right];$$

$$k_{\text{к.з}} = \sqrt{2} \cdot \frac{100}{6.5} \cdot \left[1 + e^{\left(\frac{-3.142 \cdot 0.869}{6.442} \right)} \right] = 36 ,$$

де $u_{\text{к}}$ - напруга короткого замикання, %;

u_a - активна складова напруги короткого замикання, %;

u_p - реактивна складова напруги короткого замикання, %.

Коефіцієнт приведення до механічних розтягувальних напруг:

$$M = 0.152 \cdot 10^{-6} \cdot k_{к.з}^2 \cdot k_d \cdot k_p \cdot \frac{p_k}{a \cdot A};$$

$$M = 0.152 \cdot 10^{-6} \cdot 36^2 \cdot 0.86 \cdot 0.95 \cdot \frac{1.39 \cdot 10^4}{1.75 \cdot 0.258} = 4.959 \text{ МПа.}$$

Розрахунок коефіцієнтів функції мети:

$$B = \frac{2}{3} \cdot \frac{A_2 + B_2}{B_1};$$

$$B = \frac{2}{3} \cdot \frac{95.29 + 111.081}{805.218} = 0.171,$$

$$C = \frac{A_1}{3 \cdot B_1};$$

$$C = \frac{1.351 \cdot 10^3}{3 \cdot 805.218} = 0.559,$$

$$D = k_{o.c} \cdot k_{и.р} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{C_1}{B_1};$$

$$D = 2.36 \cdot 1.13 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{773.763}{805.218} = 1.708,$$

де $k_{o.c}$ - ціновий коефіцієнт для сталі типу 3404, по табл. 3.7 [6], $k_{o.c} = 2.36$;

$k_{и.р}$ - коефіцієнт, $k_{и.р} = 1.13$.

Попередній розрахунок трансформатора:

$$x^5 + Bx^4 - Cx - D = 0 \quad (3.1)$$

$$x^5 + 0.171 \cdot x^4 - 0.559 \cdot x - 1.708 = 0$$

$$x = 1.154$$

За виразом 3.1 визначаємо значення β :

$$\beta = x^4$$

$$\beta = 1.78$$

де β - величина яка визначає відношення між діаметром та висотою обмотки;

x - величина, що відповідає мінімуму вартості активних матеріалів.

Для визначення маси активної сталі в трансформаторі необхідно розділити його магнітну систему на стрижні та ярма і підрахувати масу кожного елемента окремо.

Маса одного кута магнітної системи:

$$G_y = 0.492 \cdot 10^4 \cdot k_c \cdot k_{\text{я}} \cdot A^3 \cdot x^3;$$

$$G_y = 0.492 \cdot 10^4 \cdot 0.795 \cdot 1.03 \cdot 0.258^3 \cdot 1.154^3 = 106.261 \text{ кг.}$$

Маса сталі стрижнів:

$$G_c = \frac{A_1}{x} + A_2 \cdot x^2;$$

$$G_c = \frac{1.351 \cdot 10^3}{1.154} + 95.29 \cdot 1.154^2 = 1.297 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

Маса ярма:

$$G_{\text{я}} = B_1 \cdot x^3 + B_2 \cdot x^2;$$

$$G_{\text{я}} = 805.218 \cdot 1.154^3 + 111.081 \cdot 1.154^2 = 1.387 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

Площа перерізу стрижня:

$$\Pi_c = 0.785 \cdot k_c \cdot A^2 \cdot x^2;$$

$$\Pi_c = 0.785 \cdot 0.795 \cdot 0.258^2 \cdot 1.154^2 = 0.055 \text{ м}^2.$$

Площа зазору на прямому стику:

$$\Pi''_3 = \Pi_c;$$

$$\Pi''_3 = 0.055 \text{ м}^2.$$

Площа зазору на косому стику:

$$\Pi'_3 = \Pi_c \cdot \sqrt{2};$$

$$\Pi'_3 = 0.055 \cdot \sqrt{2} = 0.078 \text{ м}^2$$

Втрати холостого ходу:

$$P_x = k_{\text{п.д}} \cdot p_c \cdot (G_c + 0.5 \cdot k_{\text{п.у}} \cdot G_y) + k_{\text{п.д}} \cdot p_{\text{я}} \cdot (G_{\text{я}} - 6 \cdot G_y + 0.5 \cdot k_{\text{п.у}} \cdot G_y);$$

$$P_x = 1.15 \cdot 1.295 \cdot (1.297 \cdot 10^3 + 0.5 \cdot 10.18 \cdot 106.261) + \\ + 1.15 \cdot 1.198 \cdot (1.387 \cdot 10^3 - 6 \cdot 106.261 + 0.5 \cdot 10.18 \cdot 106.261) = 4.515 \cdot 10^3 \text{ Вт},$$

де $k_{п.д}$ - коефіцієнт додаткових втрат, по табл. 8.14 [6], $k_{п.д} = 1.15$;

$k_{п.у}$ - коефіцієнт, по табл. 8.13 [6], $k_{п.у} = 10.18$.

Намагнічувальна потужність:

$$n'_3 = 3;$$

$$n''_3 = 4;$$

$$Q'_x = k'_{т.д} \cdot k''_{т.д} \cdot q_c \cdot (G_c + 0.5 \cdot k_{т.у} \cdot k_{т.пл} \cdot G_y) \dots \\ + k'_{т.д} \cdot k''_{т.д} \cdot q_{\alpha} \cdot (G_{\alpha} - 4 \cdot G_y + 0.5 \cdot k_{т.у} \cdot k_{т.пл} \cdot G_y) \dots \\ + k''_{т.д} \cdot q''_3 \cdot n''_3 \cdot \Pi''_3;$$

$$Q'_x = 1.2 \cdot 1.07 \cdot 1.775 \cdot (1.297 \cdot 10^3 + 0.5 \cdot 42.45 \cdot 2 \cdot 106.261) \dots \\ + 1.2 \cdot 1.07 \cdot 1.564 \cdot (1.387 \cdot 10^3 - 4 \cdot 106.261 + 0.5 \cdot 42.45 \cdot 2 \cdot 106.261) \dots \\ + 1.07 \cdot (3 \cdot 10^3) \cdot 4 \cdot 0.055 = 2.494 \cdot 10^4 \text{ ВА},$$

де $k_{т.у}$ - коефіцієнт, що враховує збільшення намагнічувальної потужності в кутах на прямому та косому стиках, по табл. 8.20 [6], $k_{т.у} = 42.45$;

$k'_{т.д}, k''_{т.д}$ - коефіцієнти, що враховують вплив відпалення та габариту магнітної системи, $k'_{т.д} = 1.2, k''_{т.д} = 1.07$;

$k_{т.пл}$ - коефіцієнт, що враховує ширину другого пакету магнітної системи, по табл. 8.21 [6], $k_{т.пл} = 2$.

Діаметр стрижня - це один з основних розмірів трансформатора. Другий важливий розмір трансформатора - висота його обмоток. Як правило, висота обох обмоток однакова. Третій ключовий розмір трансформатора - це середній діаметр витка двох обмоток, або діаметр осьового каналу між обмотками, що пов'язує діаметр стрижня з радіальними розмірами обмоток і осьового зазору між ними.

Діаметр стрижня магнітної системи:

$$d = A \cdot x;$$

$$d = 0.258 \cdot 1.154 = 0.298 \text{ м}.$$

Середній діаметр фази трансформатора:

$$d_{12} = a \cdot A \cdot x;$$

$$d_{12} = 1.75 \cdot 0.258 \cdot 1.154 = 0.521 \text{ м.}$$

Висота обмотки:

$$l = \frac{\pi \cdot d_{12}}{\beta};$$

$$l = \frac{3.142 \cdot 0.521}{1.776} = 0.921 \text{ м.}$$

Подвоєний радіальний розмір обмотки ВН:

$$D_{a2} = b \cdot d;$$

$$D_{a2} = 0.23 \cdot 0.298 = 0.068 \text{ м.}$$

Відстань між висями стрижнів сусідніх фаз:

$$C = d_{12} + a'_{12} + D_{a2} + a'_{22};$$

$$C = 0.521 + 0.04 + 0.068 + 0.045 = 0.674 \text{ м.}$$

3.1.3 Дослідження впливу коефіцієнта β на основні розміри

Для подальшого розрахунку слід визначити оптимальний параметр β . Цей параметр визначає співвідношення між діаметром і висотою обмоток. У разі варіювання β у широкому діапазоні оптимальним значенням буде те, яке забезпечує мінімальну вартість трансформатора. Різним значенням β відповідають різні співвідношення між масою активних матеріалів - металу обмоток і сталі магнітопроводу. Менші значення β відповідають меншій масі сталі та більшій масі металу обмоток. Збільшення β призводить до збільшення маси сталі та зменшення маси металу обмоток. Таким чином, вибір значення β істотно впливає не тільки на співвідношення розмірів трансформатора, але також на співвідношення мас різних матеріалів і, отже, на вартість виробу. Крім того, зміна параметра β впливає на технічні характеристики трансформатора: втрати, струм холостого ходу, механічні властивості і термічну стійкість обмоток, а також габаритні розміри пристрою.

Весь розрахунок, починаючи з визначення маси сталі магнітної системи,

для шести різних значень β (від 1.2 до 3.2) проводиться у формі табл. 3.1

Таблиця 3.1 Попередній розрахунок трансформатора типу ТСЗ-1600/10 з плоскою шихтованою магнітною системою і алюмінієвими обмотками.

β	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2
$x = \frac{4}{\sqrt{\beta}}$	1,047	1,125	1,189	1,245	1,294	1,337
$x_2 = \sqrt{(\beta)^2}$	1,095	1,265	1,414	1,549	1,673	1,789
$x_3 = \sqrt{(\beta)^3}$	1,147	1,423	1,682	1,928	2,165	2,393
$A_{1x} = \frac{A_1}{x}$	$1,29 \cdot 10^3$	$1,201 \cdot 10^3$	$1,136 \cdot 10^3$	$1,085 \cdot 10^3$	$1,044 \cdot 10^3$	$1,01 \cdot 10^3$
$A_{2x} = A_2 \cdot x_2$	104,385	120,534	134,761	147,623	159,451	170,46
$G_c = A_{1x} + A_{2x}$	$1,395 \cdot 10^3$	$1,321 \cdot 10^3$	$1,271 \cdot 10^3$	$1,233 \cdot 10^3$	$1,204 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^3$
$B_{1x3} = B_1 \cdot x_3$	923,207	$1,146 \cdot 10^3$	$1,354 \cdot 10^3$	$1,553 \cdot 10^3$	$1,743 \cdot 10^3$	$1,927 \cdot 10^3$
$B_{2x2} = B_2 \cdot x_2$	121,683	140,508	157,093	172,086	185,874	198,708
$G_{\text{я}} = B_{1x3} + B_{2x2}$	$1,045 \cdot 10^3$	$1,286 \cdot 10^3$	$1,511 \cdot 10^3$	$1,725 \cdot 10^3$	$1,929 \cdot 10^3$	$2,125 \cdot 10^3$
$G_{\text{ст}} = G_c + G_{\text{я}}$	$2,44 \cdot 10^3$	$2,608 \cdot 10^3$	$2,782 \cdot 10^3$	$2,958 \cdot 10^3$	$3,132 \cdot 10^3$	$3,306 \cdot 10^3$
$G_y = 69.067 \cdot x_3$	79,187	98,256	116,156	133,177	149,499	165,246
$1.489 \cdot G_c$	$2,077 \cdot 10^3$	$1,968 \cdot 10^3$	$1,892 \cdot 10^3$	$1,836 \cdot 10^3$	$1,792 \cdot 10^3$	$1,758 \cdot 10^3$
$1.378 \cdot G_{\text{я}}$	$1,44 \cdot 10^3$	$1,772 \cdot 10^3$	$2,082 \cdot 10^3$	$2,376 \cdot 10^3$	$2,657 \cdot 10^3$	$2,928 \cdot 10^3$
$6.327 \cdot G_y$	500,984	621,624	734,87	842,551	945,816	$1,045 \cdot 10^3$
$P_x = 1.489 \cdot G_c + 1.378 \cdot G_{\text{я}} + 6.327 \cdot G_y$	$4,018 \cdot 10^3$	$4,361 \cdot 10^3$	$4,709 \cdot 10^3$	$5,055 \cdot 10^3$	$5,396 \cdot 10^3$	$5,731 \cdot 10^3$
$\text{Пс} = 0.041 \cdot x_2$	0,045	0,052	0,059	0,064	0,069	0,074
$2.279 \cdot G_c$	$3,179 \cdot 10^3$	$3,012 \cdot 10^3$	$2,896 \cdot 10^3$	$2,81 \cdot 10^3$	$2,743 \cdot 10^3$	$2,69 \cdot 10^3$
$2.008 \cdot G_{\text{я}}$	$2,098 \cdot 10^3$	$2,583 \cdot 10^3$	$3,035 \cdot 10^3$	$3,464 \cdot 10^3$	$3,873 \cdot 10^3$	$4,268 \cdot 10^3$
$169.946 \cdot G_y$	$1,346 \cdot 10^4$	$1,67 \cdot 10^4$	$1,974 \cdot 10^4$	$2,263 \cdot 10^4$	$2,541 \cdot 10^4$	$2,808 \cdot 10^4$
$5.199 \cdot 10^3 \cdot x_2$	$5,764 \cdot 10^3$	$6,655 \cdot 10^3$	$7,441 \cdot 10^3$	$8,151 \cdot 10^3$	$8,804 \cdot 10^3$	$9,412 \cdot 10^3$
Q_x	$2,45 \cdot 10^4$	$2,895 \cdot 10^4$	$3,311 \cdot 10^4$	$3,706 \cdot 10^4$	$4,083 \cdot 10^4$	$4,445 \cdot 10^4$
$i_0 = \frac{Q_x \cdot 1000}{10 \cdot S}$	1,531	1,809	2,069	2,316	2,552	2,778
$G_0 = \frac{C_1}{x_2}$	706,346	611,713	547,133	499,462	462,412	432,547
$1.03 \cdot G_0$	727,536	630,065	563,547	514,446	476,284	445,523
$G_{\text{np}} = 1.03 \cdot 1.03 \cdot G_0$	749,362	648,967	580,453	529,879	490,573	458,889
$G_{\text{кnp}} = k_{0,c} \cdot G_{\text{np}}$	$1,768 \cdot 10^3$	$1,532 \cdot 10^3$	$1,37 \cdot 10^3$	$1,251 \cdot 10^3$	$1,158 \cdot 10^3$	$1,083 \cdot 10^3$
$G_{a,c} = k_{0,c} \cdot G_{\text{np}} + G_{\text{ст}}$	$4,208 \cdot 10^3$	$4,139 \cdot 10^3$	$4,152 \cdot 10^3$	$4,208 \cdot 10^3$	$4,29 \cdot 10^3$	$4,389 \cdot 10^3$
$J_i = \sqrt{\frac{k_d \cdot p_k}{2.4 \cdot G_0}} \cdot 10^6$	$2,655 \cdot 10^6$	$2,853 \cdot 10^6$	$3,017 \cdot 10^6$	$3,158 \cdot 10^6$	$3,282 \cdot 10^6$	$3,393 \cdot 10^6$
$\sigma_p = M \cdot x_3$	5,685	7,054	8,339	9,561	10,733	11,864
$d = A \cdot x$	0,27	0,29	0,307	0,321	0,333	0,345
$d_{12} = a \cdot d$	0,472	0,507	0,537	0,562	0,584	0,603
$l = \frac{\pi \cdot d_{12}}{\beta}$	1,236	0,996	0,843	0,735	0,655	0,592
$C = d_{12} + a'_{12} + a'_{22} + b \cdot d$	0,619	0,659	0,692	0,72	0,745	0,768

На основі даних розрахованих у таблиці 3.1 було побудовано графіки залежностей 3.2-3.8.

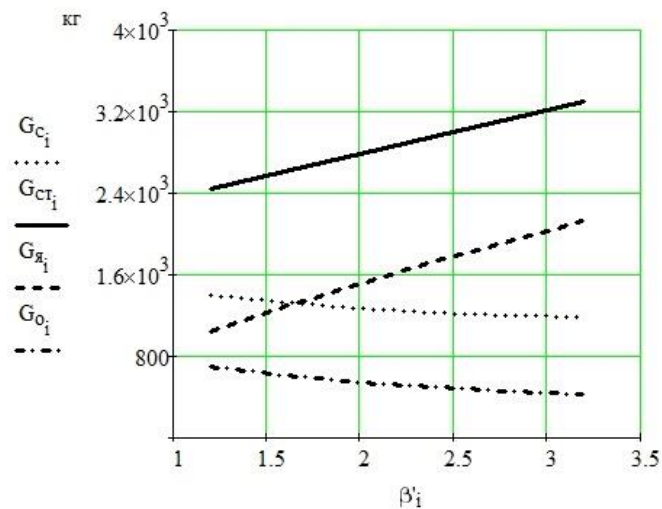


Рисунок 3.2 – Зміна маси сталі стрижнів G_C , ярем $G_Я$, магнітної системи $G_{СТ}$, та металу обмотки G_O зі зміною β .

На графіку 3.2 зображена залежність маси сталі стрижнів, ярем, магністрої системи та металу обмотки від β . При збільшенні β (з 1,2 до 3,2) збільшується маса магнітної системи (з 2 440 до 3 306 кг) і ярем (з 1 045 до 2 125 кг), та зменшується маса сталі стрижнів (з 1 395 до 1 180 кг) і металу обмотки (з 706 до 432 кг).

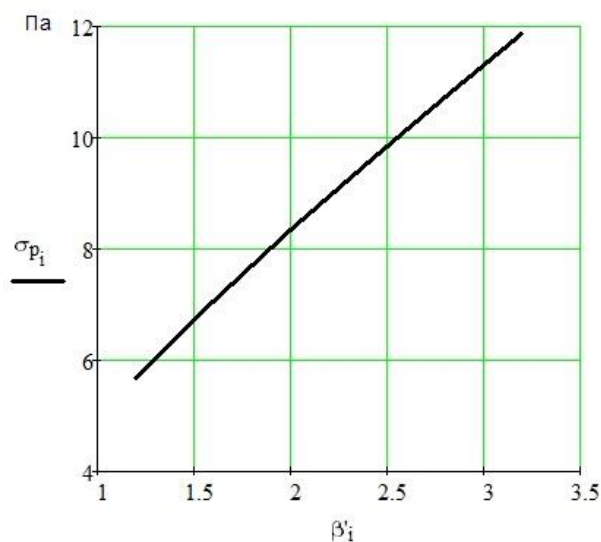


Рисунок 3.3 - Зміна механічної напруги обмотки зі зміною β .

На графіку 3.3 зображена залежність механічної напруги обмотки від β . При збільшенні β (з 1.2 до 3.2) механічна напруга обмотки збільшується (з 5.685 до 11.864 Па)

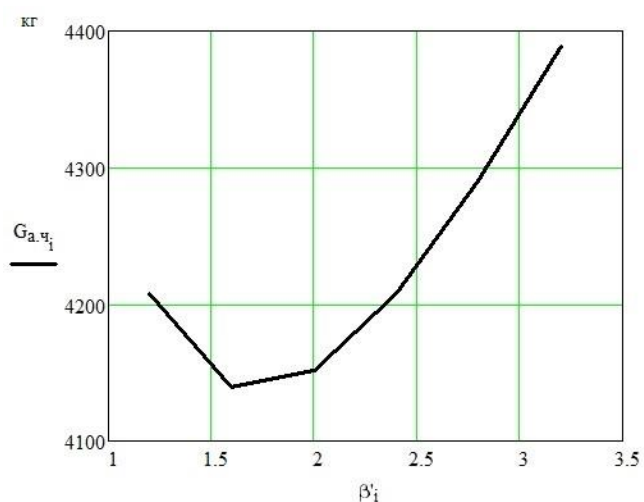


Рисунок 3.4 – Зміна маси активної частини зі зміною β .

На графіку 3.4 зображена залежність маси активної частини від β . При збільшенні β (з 1.2 до 3.2) маса активної частини збільшується (з 4 208 до 4 389 кг)

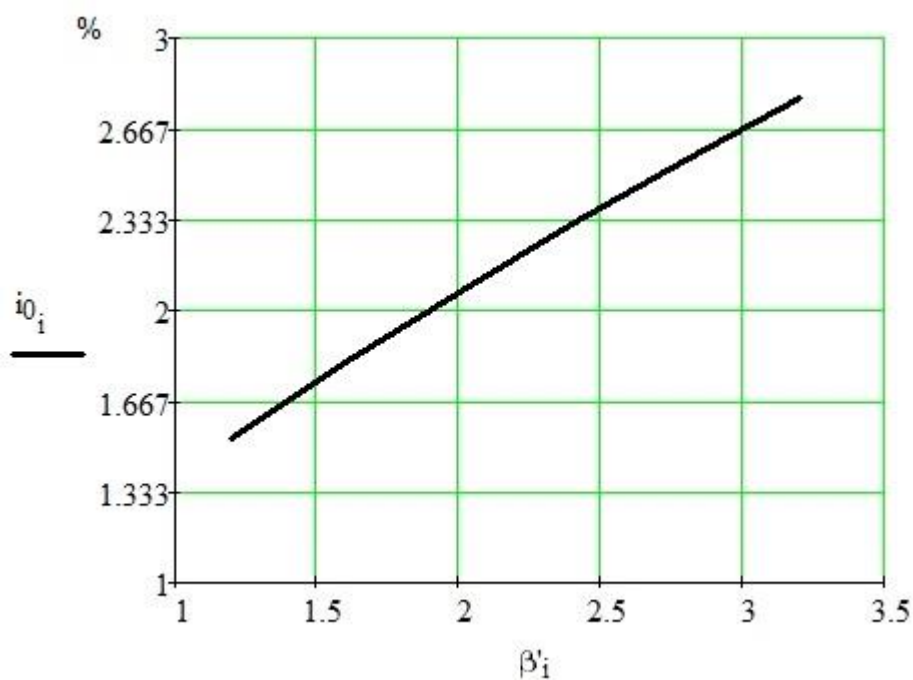


Рисунок 3.5 – Зміна струму неробочого ходу зі зміною β .

На графіку 3.5 зображена залежність струму неробочого ходу від β . При збільшенні β (з 1,2 до 3,2) струм неробочого ходу збільшується (з 1,531 до 2,778 %)

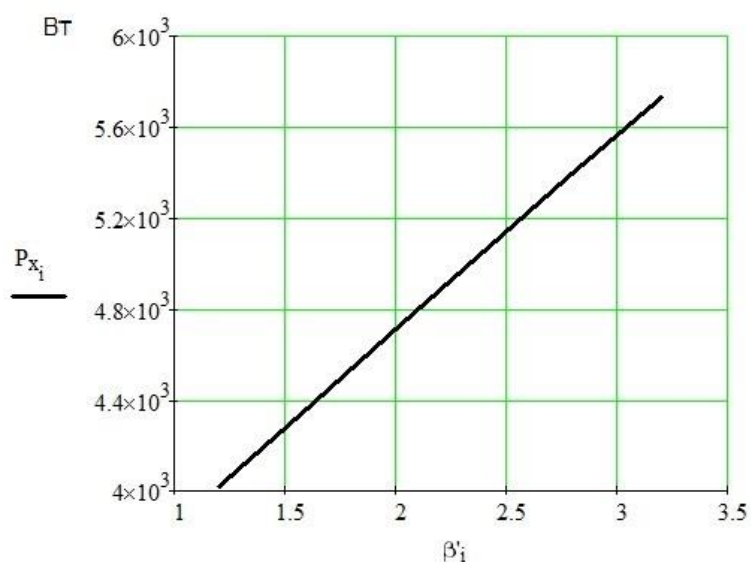


Рисунок 3.6 – Зміна втрат неробочого ходу зі зміною β .

На графіку 3.6 зображена залежність втрат неробочого ходу від β . При збільшенні β (з 1,2 до 3,2) втрати неробочого ходу збільшується (з 4 018 до 5 731 Вт)

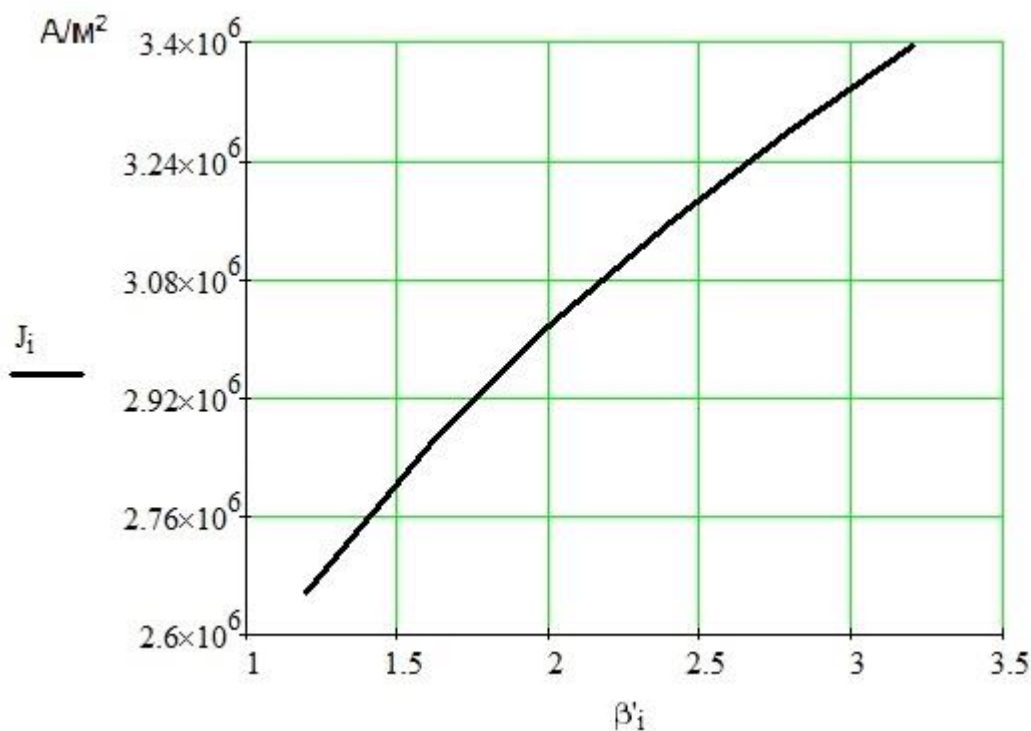


Рисунок 3.7 – Зміна густини струму зі зміною β .

На графіку 3.7 зображена залежність густини струму від β . При збільшенні β (з 1,2 до 3,2) густини струму збільшується (з $2,655 \cdot 10^6$ до $3,393 \cdot 10^6$ А/м²)

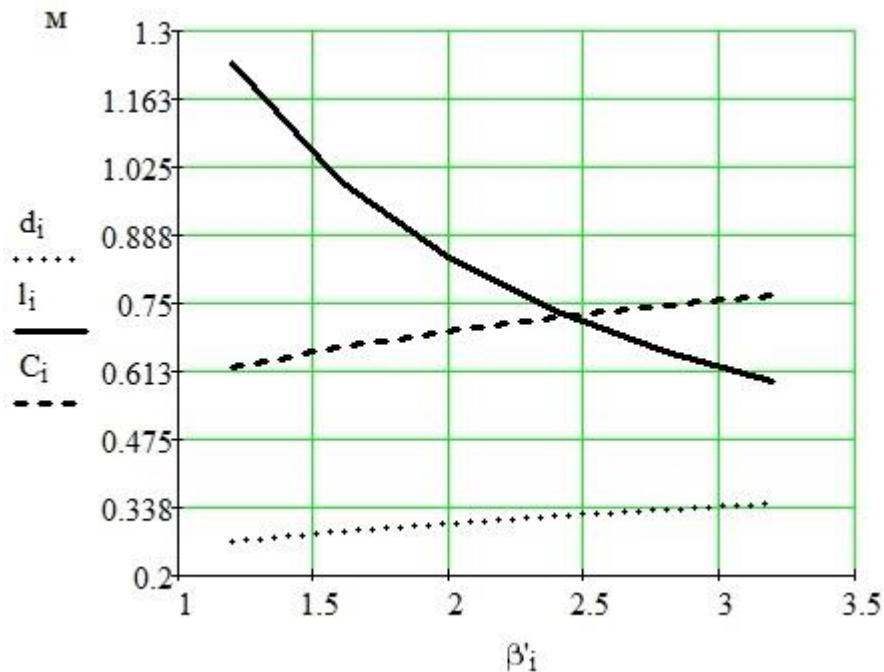


Рисунок 3.8 – Зміна основних розмірів – діаметр стрижня d , висота обмотки l , та відстань між осями стрижнів трансформатора C зі зміною β .

На графіку 3.8 зображена залежність діаметра стрижня, висоти обмотки та відстані між осями стрижнів від β . При збільшенні β (з 1,2 до 3,2) збільшується діаметр стрижня (з 0,27 до 0,345 м) і відстані між осями стрижнів (з 0,619 до 0,768 м), та зменшується висота обмотки (з 1,236 м до 0,592 м).

За графіком 3.2 видно, що оптимальним значенням коефіцієнта β за масою є 1.6. Але за графіком 3.8 зазначено, що оптимальним значенням коефіцієнта β за основними розмірами є 2.4.

Тому можна зробити висновок, що вибір оптимального значення β залежить від того, що в момент проєктування трансформатора є пріоритетнішим.

Вибір діаметру стрижня трансформатора та розрахунок розмірів магнітної системи.

Подальший розрахунок трансформатора проводитиметься при коефіцієнті $\beta = 2$. Значення коефіцієнта β буде залишатися постійним для розрахунку трансформатора с повітряними зазорами 20, 30 та 40 мм.

Визначення x :

$$x = \sqrt[4]{\beta};$$

$$x = \sqrt[4]{2} = 1.189,$$

де β - величина яка визначає відношення між діаметром та висотою обмотки.

Діаметр стрижня магнітної системи:

$$d = A \cdot x;$$

$$d = 0.258 \cdot 1.189 = 0.3 \text{ м},$$

де x - величина, що відповідає мінімуму вартості активних матеріалів.

Активний переріз стрижня:

$$\Pi_c = 0.785 \cdot k_c \cdot A^2 \cdot x^2;$$

$$\Pi_c = 0.785 \cdot 0.795 \cdot 0.258^2 \cdot 1.189^2 = 0.059 \text{ м}^2,$$

Середній діаметр обмоток:

$$d_{12} = a \cdot A \cdot x$$

$$d_{12} = 1.77 \cdot 0.258 \cdot 1.189 = 0.537 \text{ м}$$

Висота обмоток:

$$l = \frac{\pi d_{12}}{\beta}$$

$$l = \frac{3.142 \cdot 0.537}{2} = 0.843 \text{ м}.$$

Висота стрижня:

$$l_c = l + 2 \cdot l_0$$

$$l_c = 0.843 + 2 \cdot 0.05 = 0.943 \text{ м};$$

де l_0 - середня ізоляційна відстань, м.

Відстань між осями стрижнів:

$$C = d_{12} + a'_{12} + b \cdot d + a'_{22};$$

$$C = 0.537 + 0.04 + 0.23 \cdot 0.307 + 0.045 = 0.692 \text{ м},$$

де a'_{12} - ізоляційна відстань між обмотками ВН та НН, м;

a'_{22} - міжфазна ізоляційна відстань між обмотками ВН різних фаз, м.

Електрорушійна сила одного витка:

$$u_B = 4.44 \cdot f \Pi_c \cdot B_c;$$

$$u_B = 4.44 \cdot 50 \cdot 0.059 \cdot 1.6 = 20.846 \text{ В},$$

де B_c - індукція в стрижні.

3.1.4 Розрахунок обмоток

Зазвичай розрахунок обмоток трансформатора починається з НН, яка здебільшого розташовується біля трансформаторних стрижнів, між ВН і самим стрижнем.

Розрахунок обмотки НН:

Число витків:

$$w_1 = \frac{U_{\phi 1}}{u_B}$$

$$w_1 = \frac{230,94}{20,846} = 11,078 \text{ витків}$$

$$w_1 = 11 \text{ витків}$$

де $U_{\phi 1}$ - фазна напруга обмотки НН, В;

u_B - електрорушійна сила одного витка, В.

При попередньому розрахунку втрати холостого ходу виявилися вищими за задане значення (4400 замість 2800 Вт; $P_x > P_{nx}$). Для зменшення P_x приймаємо число витків $w_1 = 11$, що призведе до зниження розрахункової індукції і зменшення втрат холостого ходу з допомогою деякого збільшення маси металу обмоток. З цією ж метою зменшимо висоту обмоток з 0,843 до 0,7 відповідно довжину стрижня з 0,943 до 0,9 та масу сталі стрижня.

Напруга одного витка:

$$u_B = \frac{U_{\phi 1}}{w_1};$$

$$u_B = \frac{230.94}{11} = 20.995 \text{ В}.$$

Середня щільність струму в обмотках:

$$J_{\text{ср}} = 0.463 \cdot k_{\text{д}} \cdot \frac{P_{\text{к}} \cdot u_{\text{в}}}{\frac{S}{10^3} \cdot d_{12}} \cdot 10^4;$$

$$J_{\text{ср}} = 0.463 \cdot 0.86 \cdot \frac{1.39 \cdot 10^4 \cdot 20.995}{\frac{1.6 \cdot 10^6}{10^3} \cdot 0.537} \cdot 10^4 = 1.354 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2,$$

де d_{12} - середній діаметр обмоток, м;

$k_{\text{д}}$ - коефіцієнт, що враховує відношення основних втрат в обмотках до втрат короткого замикання;

$P_{\text{к}}$ - втрати короткого замикання, Вт;

$u_{\text{в}}$ - електрорушійна сила одного витка, В.

Переріз витка орієнтовно:

$$\Pi_{\text{в}} = \frac{I_{\phi 1}}{J_{\text{ср}}};$$

$$\Pi_{\text{в}} = \frac{2.309 \cdot 10^3}{1.354 \cdot 10^6} = 1.706 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

де $I_{\phi 1}$ - фазний струм обмотки НН, А.

Було обрано гвинтову двоходову обмотку з розмірами дроту (4.75x18) с перерізом одного провідника $84,6 \text{ мм}^2$ с кількістю паралельних дротів 20.

Повний переріз витка паралельних проводів:

$$n_{\text{в1}} = 20;$$

$$a_1 = 4.75 ; \quad b_1 = 18;$$

$$a'_1 = a_1 + 0.5 ; \quad b'_1 = b_1 + 0.5;$$

$$a'_1 = 5.25 . \quad b'_1 = 18.5 .$$

$$\Pi'_1 = 84.6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Алюмінієвий провід марки АПБ:

$$\Pi_1 = n_{B1} \cdot \Pi'_1 ;$$

$$\Pi_1 = 20 \cdot 8.46 \cdot 10^{-5} = 1692 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Отримана густина струму:

$$J_1 = \frac{I_{\phi 1}}{\Pi_1};$$

$$J_1 = \frac{2.309 \cdot 10^3}{1.692 \cdot 10^{-3}} = 1.365 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Осьовий розмір витка:

$$h_{B1} = a'_1 \cdot 10^{-3};$$

$$h_{B1} = 5.25 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Осьовий розмір обмотки:

$$l_1 = 2 \cdot b'_1 \cdot 10^{-3}(w_1 + 1) + k \cdot h_{K1}(2w_1 + 1);$$

$$l_1 = 2 \cdot 18.5 \cdot 10^{-3}(11 + 1) + 0.95 \cdot 0.018(2 \cdot 11 + 1) = 0.837 \text{ м},$$

де h_{K1} - осьовий розмір охолоджувального каналу між витками,

$$h_{K1} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

k - коефіцієнт який враховує усадку міжкотушкових прокладок після сушіння та обпресування обмотки, $k = 0.95$.

Радіальний розмір обмотки:

$$a_{1\text{рад}} = \frac{n_{B1}}{2} \cdot a'_1 \cdot 10^{-3};$$

$$a_{1\text{рад}} = \frac{20}{2} \cdot 5.25 \cdot 10^{-3} = 0.053 \text{ м}.$$

Внутрішній діаметр обмотки:

$$D'_1 = d + 2a_{01};$$

$$D'_1 = 0.307 + 2 \cdot 0.01 = 0.327 \text{ м},$$

де a_{01} - радіальна ізоляційна відстань між стрижнем та обмоткою НН, м.

Зовнішній діаметр обмотки:

$$D''_1 = D'_1 + 2a_{1\text{рад}};$$

$$D''_1 = D'_1 + 2 \cdot 0.053 = 0.432 \text{ м},$$

де $a_{1\text{рад}}$ - радіальний розмір обмотки, м.

Середній діаметр обмотки:

$$D_{\text{ср1}} = \frac{D'_1 + D''_1}{2};$$

$$D_{\text{ср1}} = \frac{0.327 + 0.432}{2} = 0.379 \text{ м}.$$

Щільність теплового потоку на поверхні обмотки:

$$q_1 = \frac{172 \cdot J_1 \cdot I_{\phi 1} \cdot w_k \cdot k_{д.1}}{k_3 \cdot (b_1 \cdot 10^{-3} + a_{1\text{рад}})} \cdot 10^{-10};$$

$$q_1 = \frac{172 \cdot (1.365 \cdot 10^6) \cdot (2.309 \cdot 10^3) \cdot 0.5 \cdot 1.05}{0.97 \cdot (18 \cdot 10^{-3} + 0.053)} \cdot 10^{-10} = 416.22 \text{ ВА/м}^2,$$

де w_k - число витків у котушці, $w_k = 0.5$;

$k_{д.1}$ - коефіцієнт додаткових втрат у обмотці, $k_{д.1} = 1.05$;

J_1 - густина струму, А/м²;

k_3 - коефіцієнт заповнення кола.

Маса алюмінію обмотки:

$$G_{01} = 8.47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{\text{ср1}} \cdot w_1 \cdot \Pi_1;$$

$$G_{01} = 8.47 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 0.379 \cdot 11 \cdot (1.692 \cdot 10^{-3}) = 179.281 \text{ кг},$$

де $D_{\text{ср1}}$ - середній діаметр обмотки, м;

w_1 - число витків;

P_1 - повний переріз витка, m^2 .

Повна маса проводу:

$$G_{пр1} = 1.03 \cdot G_{01}$$

$$G_{пр1} = 1.03 \cdot 179.281 = 184.66 \text{ кг.}$$

Обираємо схему регулювання з виводом кінців всіх трьох фаз обмотки до одного трьохфазного перемикача. Контакти вимикача розраховуються на робочий струм 53,3 А. Найбільша напруга між контактами перемикача в одній фазі:

$$\text{Робоча напруга } U_{\phi 2} = U_{л} \text{ В;}$$

$$\text{Випробувальна напруга } 2.4 \cdot 10\% \cdot U_{\phi 2} = 2400 \text{ В.}$$

Розрахунок обмотки ВН:

Розрахунок ВН починається з визначення кількості витків, необхідні отримання номінального напруги всім відгалужень.

Число витків:

$$w_2 = \frac{U_{\phi 2}}{u_B};$$

$$w_2 = \frac{1 \cdot 10^4}{20.995} = 476.3 \text{ витків;}$$

$$w_{2H} = 476 \text{ витків,}$$

де $U_{\phi 2}$ - фазна напруга обмотки ВН, В;

u_B - електрорушійна сила одного витка, В.

Число витків на одному ступені регулювання:

$$U_2 \cdot \frac{2.5}{100} = 250 ,$$

$$w_p = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot u_B};$$

$$w_p = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 20.995} = 6.875 \text{ витків;}$$

$$w_p = 7 \text{ витків}.$$

Для п'яти ступенів:

Напруга ,В	Число витків на розгалуження
10500	$476 + 7 \cdot 2 = 490$
10250	$476 + 7 = 483$
10000	476
9750	$476 - 7 = 469$
9500	$476 - 7 \cdot 2 = 462$

Кількість витків:

$$w_2 = w_{2н} + 2 \cdot w_p;$$

$$w_2 = 476 + 2 \cdot 7 = 490 \text{ витків}.$$

Орієнтовна густина струму:

$$J_2 = 2 \cdot J_{ср} - J_1;$$

$$J_2 = 2 \cdot 1.354 \cdot 10^6 - 1.365 \cdot 10^6 = 1.342 \cdot 10^6 \text{ А} ,$$

де $J_{ср}$ - середня густина струму в обмотках, А/м²;

J_1 - густина струму, А/м².

Орієнтовний переріз витка:

$$\Pi'_2 = \frac{I_{\Phi 2}}{J_2};$$

$$\Pi'_2 = \frac{53.333}{1.342 \cdot 10^6} = 40 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Було обрано безперервну котушкову обмотку з прямокутного алюмінієвого дроту з розмірами дроту (3.15x13.2) с перерізом одного провідника 40 мм^2 .

Повний переріз витка паралельних проводів:

$$n_{B2} = 1;$$

$$a_2 = 3.15; \quad b_2 = 13.2;$$

$$a'_2 = a_2 + 0.5; \quad b'_2 = b_2 + 0.5;$$

$$a'_2 = 3.65 \quad b'_2 = 13.7 .$$

$$\Pi_2 = n_{B2} \cdot \Pi'_2;$$

$$\Pi_2 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 .$$

Щільність струму в обмотці:

$$J_2 = \frac{I_{\Phi 2}}{\Pi_2};$$

$$J_2 = \frac{53.333}{4 \cdot 10^{-5}} = 1.333 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 .$$

Число котушок на стрижні орієнтовно:

$$n_{\text{кат}2} = \frac{l_1 \cdot 10^3}{b'_2 + h'_{\text{к}2}};$$

$$n_{\text{кат}2} = \frac{0.837 \cdot 10^3}{13.7 + 10} = 35 \text{ котушок} ,$$

де $h'_{\text{к}2}$ - осьовий розмір радіального каналу, $h'_{\text{к}2} = 10 \text{ м}$;

l_1 - осьовий розмір обмотки, м.

Число витків в котушці орієнтовно:

$$w_{\text{кат}2} = \frac{w_2}{n_{\text{кат}2}};$$

$$w_{\text{кат}2} = \frac{490}{35} = 14 \text{ витків} .$$

Осьовий розмір обмотки:

$$l_2 = [b'_2 \cdot n_{\text{кат}2} + k \cdot h'_{\text{к}2} \cdot (n_{\text{кат}2} - 2) + h'_{\text{кр}}] \cdot 10^{-3};$$

$$l_2 = [13.7 \cdot 35 + 0.95 \cdot 10 \cdot (35 - 2) + 10] \cdot 10^{-3} = 0.803 \text{ м},$$

де $h'_{кр}$ - канал у місці розташування регулювальних витків обмоток ВН,

$$h'_{кр} = 10;$$

$n_{кат2}$ - число котушок на стрижні.

Радіальний розмір обмотки:

$$a_{p2} = a'_2 \cdot n_{в2} \cdot w_{кат2} \cdot 10^{-3};$$

$$a_{p2} = 3.65 \cdot 1 \cdot 14 \cdot 10^{-3} = 0.051 \text{ м}.$$

Внутрішній діаметр обмотки:

$$D'_2 = D''_1 + 2a'_{12};$$

$$D'_2 = 0.432 + 2 \cdot 0.04 = 0.512 \text{ м},$$

де D''_1 - зовнішній діаметр обмотки НН, м;

a'_{12} - ізоляційна відстань між обмотками ВН та НН, м.

Зовнішній діаметр обмотки:

$$D''_2 = D'_2 + 2a_{p2};$$

$$D''_2 = 0.512 + 2 \cdot 0.051 = 0.614 \text{ м}.$$

Середній діаметр обмотки:

$$D_{cp2} = \frac{D'_2 + D''_2}{2};$$

$$D_{cp2} = \frac{0.512 + 0.614}{2} = 0.563 \text{ м}.$$

Щільність теплового потоку на поверхні обмотки:

$$k_{д2} = (k_{д.1});$$

$$q_2 = \frac{172 \cdot J_2 \cdot I_{\Phi 2} \cdot k_{д2} \cdot w_p}{k_3 \cdot (b'_2 \cdot 10^{-3} + a_{p2})} \cdot 10^{-10};$$

$$q_2 = \frac{172 \cdot (1.333 \cdot 10^6) \cdot 53.333 \cdot 1.05 \cdot 7}{0.97 \cdot (13.7 \cdot 10^{-3} + 0.051)} \cdot 10^{-10} = 143.023 \text{ ВА/м}^2,$$

де w_p - число витків на одному ступені регулювання;

a_{p2} - радіальний розмір обмотки, м.

Маса алюмінію обмотки:

$$G_{02} = 8.47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{cp2} \cdot w_2 \cdot \Pi_2;$$

$$G_{02} = 8.47 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 0.563 \cdot 490 \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 280.238 \text{ кг.}$$

Повна маса проводу:

$$G_{np2} = 1.03 \cdot G_{02};$$

$$G_{np2} = 1.03 \cdot 280.238 = 288.645 \text{ кг.}$$

3.1.5 Розрахунок параметрів короткого замикання

Розрахунок втрат короткого замикання:

Втрати короткого замикання двообмоткового трансформатора - втрати, що виникають у трансформаторі під час номінальної частоти та встановлення в одній з обмоток номінального струму, за умови, що друга обмотка замкнута накоротко.

Основні електричні втрати в обмотці НН:

$$P_{осн1} = 12.75 \cdot 10^{-12} \cdot (J_1)^2 \cdot G_{01};$$

$$P_{осн1} = 12.75 \cdot 10^{-12} \cdot (1.365 \cdot 10^6)^2 \cdot 179.281 = 4258.364 \text{ Вт,}$$

де J_1 - густина струму, А/м²;

G_{01} - маса алюмінію обмотки, кг.

Додаткові втрати в обмотці НН:

$$m_1 = 28;$$

$$n_1 = 20;$$

$$\beta_1 = \frac{b_1 \cdot 10^{-3} \cdot m_1 \cdot k_p}{l_1};$$

$$\beta_1 = \frac{18 \cdot 10^{-3} \cdot 28 \cdot 0.95}{0.837} = 0.572,$$

$$k_{д1} = 1 + 0.037 \cdot 10^8 \cdot \beta_1^2 \cdot (a_1 \cdot 10^{-3})^4 \cdot \left(\frac{n_1}{2}\right)^2;$$

$$k_{д1} = 1 + 0.037 \cdot 10^8 \cdot 0.572^2 \cdot (4.75 \cdot 10^{-3})^4 \cdot \left(\frac{20}{2}\right)^2 = 1.062,$$

де n_1 - число провідників обмотки у напрямку, перпендикулярному до напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання;

m_1 - число провідників обмотки у напрямі, паралельному напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання;

a_1 - розмір провідника у напрямку, перпендикулярному лініям магнітної індукції поля розсіювання, м;

b_1 - розмір провідника у напрямі, паралельному лініям магнітної індукції поля розсіювання, м;

k_p - коефіцієнт приведення поля розсіювання;

l_1 - осьовий розмір обмотки, м.

Основні електричні втрати в обмотці ВН:

$$P_{осн2} = 12.75 \cdot 10^{-12} \cdot J_2^2 \cdot G_{02};$$

$$P_{осн2} = 12.75 \cdot 10^{-12} \cdot (1.333 \cdot 10^6)^2 \cdot 280.238 = 6352.05 \text{ Вт.}$$

Додаткові втрати в обмотці ВН:

$$m_2 = n_{кат2};$$

$$m_2 = 35 ;$$

$$n_2 = 14;$$

$$\beta_2 = \frac{b_2 \cdot 10^{-3} \cdot m_2 \cdot k_p}{l_2};$$

$$\beta_2 = \frac{13.2 \cdot 10^{-3} \cdot 35 \cdot 0.95}{0.803} = 0.547,$$

$$k_{д2} = 1 + 0.037 \cdot 10^8 \cdot \beta_2^2 \cdot (a_2 \cdot 10^{-3})^4 \cdot n_2^2;$$

$$k_{д2} = 1 + 0.037 \cdot 10^8 \cdot 0.547^2 \cdot (3.15 \cdot 10^{-3})^4 \cdot 14^2 = 1.021.$$

Довжина відводів НН:

$$l_{відв1} = 7.5 \cdot l_1;$$

$$l_{відв1} = 7.5 \cdot 0.837 = 6.28 \text{ м.}$$

Маса відводів НН:

$$\Pi_{відв1} = \Pi_1;$$

$$\Pi_{відв2} = \Pi_2;$$

$$G_{відв1} = l_{відв1} \cdot \Pi_{відв1} \cdot \gamma;$$

$$G_{відв1} = 6.28 \cdot (1.692 \cdot 10^{-3}) \cdot 2700 = 28.688 \text{ кг},$$

де γ - щільність металу відводів, $\gamma = 2700 \text{ кг/м}^3$.

Втрати у відводах НН:

$$P_{відв1} = 12.75 \cdot 10^{-12} \cdot J_1^2 \cdot G_{відв1};$$

$$P_{відв1} = 12.75 \cdot 10^{-12} \cdot (1.365 \cdot 10^6)^2 \cdot 28.688 = 681.42 \text{ Вт.}$$

Довжина відводів ВН:

$$l_{відв2} = 7.5 \cdot l_2;$$

$$l_{відв2} = 7.5 \cdot 0.803 = 6.022 \text{ м.}$$

Маса відводів ВН:

$$G_{відв2} = l_{відв2} \cdot \Pi_{відв2} \cdot \gamma;$$

$$G_{відв2} = 6.022 \cdot (4 \cdot 10^{-5}) \cdot (2.7 \cdot 10^3) = 0.65 \text{ кг.}$$

Втрати у відводах ВН:

$$P_{відв2} = 12.75 \cdot 10^{-12} \cdot J_2^2 \cdot G_{відв2};$$

$$P_{\text{відв2}} = 12.75 \cdot 10^{-12} \cdot (1.333 \cdot 10^6)^2 \cdot 0.65 = 14.743 \text{ Вт.}$$

Втрати у елементах конструкції:

$$P_6 = 10 \cdot k \cdot \frac{S}{10^3};$$

$$P_6 = 10 \cdot 0.025 \cdot \frac{1.6 \cdot 10^6}{10^3} = 400 \text{ Вт,}$$

де k – коефіцієнт, $k = 0.025$.

Повні втрати короткого замикання:

$$P_k = P_{\text{осн1}} \cdot k_{\text{д1}} + P_{\text{осн2}} \cdot k_{\text{д2}} + P_{\text{відв1}} + P_{\text{відв2}} + P_6;$$

$$P_k = 4.258 \cdot 10^3 \cdot 1.062 + 6.352 \cdot 10^3 \cdot 1.021 + 681.42 + 14.743 + 400 = 12104.349 \text{ Вт,}$$

$$\frac{12104.349}{1.39 \cdot 10^4} \cdot 100 = 87.082 \% \text{ заданого значення}$$

де $P_{\text{осн1}}, P_{\text{осн2}}$ - основні електричні втрати в обмотках ВН та НН, Вт;

$P_{\text{відв1}}, P_{\text{відв2}}$ - втрати у відводах ВН та НН, Вт;

$k_{\text{д1}}, k_{\text{д2}}$ - додаткові втрати в обмотках ВН та НН, Вт;

P_6 - втрати у елементах конструкції, Вт.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку втрат короткого замикання трансформатора с повітряним зазором розмірами 20, 30 та 40 мм

Розраховані параметри			Каталожні параметри
Ізоляційний (повітряний) зазор (a ₁₂)			
20 мм	30 мм	40 мм	
12.442 кВт	12.229 кВт	12.104 кВт	13.9 кВт

На основі даних записаних у таблиці 3.2 було побудовано числові та відсоткові графіки залежностей 3.9-3.10.



Рисунок 3.9 – Зміна втрат короткого замикання ($P_{к.з}$) зі зміною ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12})

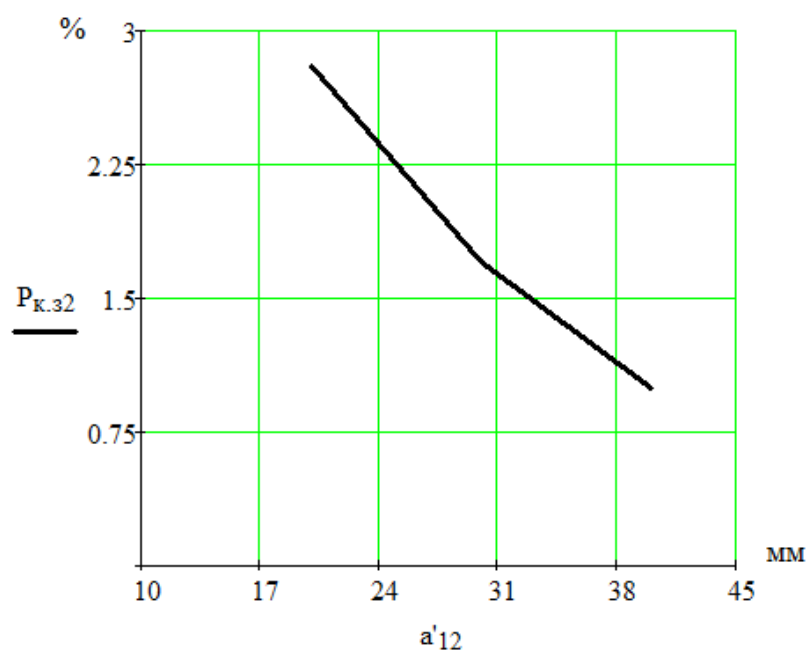


Рисунок 3.10– Відсоткова зміна втрат короткого замикання ($P_{к.з2}$) зі зміною ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12})

На графіках 3.9-3.10 зображена залежність втрат короткого замикання ($P_{к.з}$) від ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12}). При зменшенні зазору (з 40 до 20 мм) втрати короткого замикання збільшуються (з 12.104 до 12.442 кВт). Загалом втрати короткого замикання збільшились на 2,8 %.

Розрахунок напруги короткого замикання:

Напругою короткого замикання двообмоткового трансформатора називають напругу, приведену до заданої розрахункової температури, яку необхідно прикласти за номінальної частоти до виводів однієї з обмоток при короткозамкненій іншій обмотці для того, щоб в обох обмотках встановилися номінальні струми. Перемикач у цей момент має перебувати в положенні, що відповідає номінальній напрузі. Напруга короткого замикання визначає величину падіння напруги в трансформаторі, його зовнішню характеристику і значення струму короткого замикання.

Активна складова:

$$u_{a2} = \frac{P_k \cdot 10^3}{10S};$$

$$u_{a2} = \frac{1.21 \cdot 10^4 \cdot 10^3}{10(1.6 \cdot 10^6)} = 0.757 \text{ \%}.$$

Ширина каналу розсіювання:

$$a_{p1} = a_{1rad};$$

$$a_p = a'_{12} + \frac{a_{p1} + a_{p2}}{3};$$

$$a_p = 0.04 + \frac{0.053 + 0.051}{3} = 0.075 \text{ м}.$$

Коефіцієнт k_p , який враховує відхилення реального поля розсіювання від ідеальної моделі паралельного поля, викликане кінцевим значенням осьового розміру обмоток порівняно з їх радіальним розміром:

$$\sigma = \frac{a'_{12} + a_{p1} + a_{p2}}{\pi l};$$

$$\sigma = \frac{0.04 + 0.053 + 0.051}{3.14 \cdot 0.7} = 0.065 \text{ Па},$$

$$k_p = 1 - \sigma \cdot \left(1 - e^{\frac{-1}{\sigma}}\right);$$

$$k_p = 1 - 0.065 \cdot \left(1 - e^{\frac{-1}{0.065}}\right) = 0.935.$$

Реактивна складова:

$$k_q = 1;$$

$$u_{p2} = \frac{7.9 \cdot f \cdot S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p \cdot k_q}{u_B^2 \cdot 10^3} \cdot 10^{-1};$$

$$u_{p2} = \frac{7.9 \cdot 50 \cdot (5.333 \cdot 10^5) \cdot 2.013 \cdot 0.075 \cdot 0.935 \cdot 1}{20.995^2 \cdot 10^3} \cdot 10^{-1} = 6.703 \text{ \%}.$$

Напруга короткого замикання:

$$u'_K = \sqrt{u_{p2}^2 + u_{a2}^2};$$

$$u'_K = \sqrt{6.703^2 + 0.757^2} = 6.745 \text{ \%},$$

$$\frac{6.745}{6.5} \cdot 100 = 103.769 \text{ \% заданого значення}$$

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку напруг короткого замикання трансформатора с повітряним зазором розмірами 20, 30 та 40 мм

Розраховані параметри			Каталожні параметри
Ізоляційний (повітряний) зазор (a ₁₂)			
20 мм	30 мм	40 мм	
5.715 %	6.269 %	6.745 %	6.5%

На основі даних записаних у таблиці 3.3 було побудовано числові та відсоткові графіки залежностей 3.11-3.12.

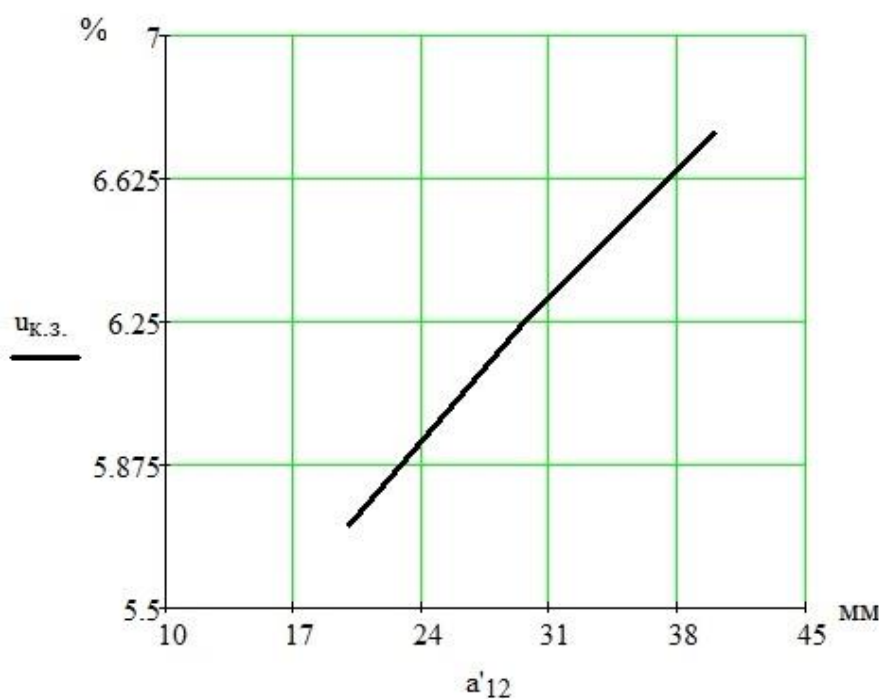


Рисунок 3.11 – Зміна напруги короткого замикання ($u_{к.з.}$) зі зміною ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12})

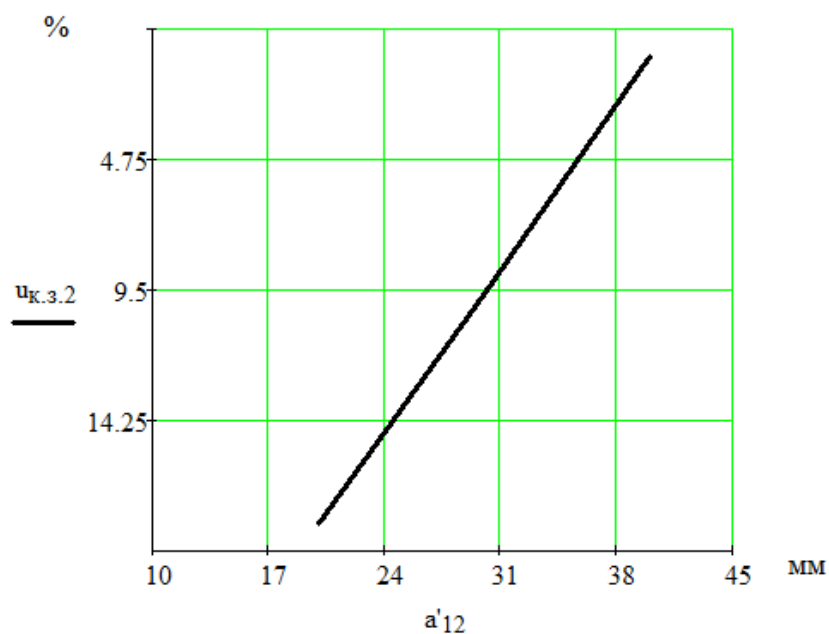


Рисунок 3.12 – Відсоткова зміна напруги короткого замикання ($u_{к.з.2}$) зі зміною ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12})

На графіках 3.1-3.12 зображена залежність напруги короткого замикання ($u_{к.з.}$) від ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12}). При зменшенні зазору (з 40 до 20 мм) напруга короткого замикання зменшується (з 6.745 до 5.715 %) Загалом напруга короткого замикання зменшилась на 18 %.

3.1.6 Розрахунок магнітної системи

Вибір розмірів пакетів та перерізів стрижнів та ярма:

Розміри пакетів вибрані для стержня діаметром 0,3 м без пресувальної пластини . Число ступенів в перерізі стрижня 8, в перерізі ярма 6.

Розміри пакетів в перерізі стрижня та ярма

№ пакета	Стержень, мм	Ярмо ,мм
1	295X28	295X28
2	270X37	270X37
3	250X18	250X18
4	230X13	230X13
5	215X8	215X8
6	175X18	175X36
7	135X12	
8	105X6	

Загальна товщина пакетів стержня (ширина ярма): 0,129 м;

Площа ступінчатої фігури перерізу стрижня: $\Pi_{\phi.c} = 657.2 \text{ см}^2$;

Площа ступінчатої фігури перерізу ярма: $\Pi_{\phi.я} = 675.2 \text{ см}^2$;

Об'єм кута магнітної системи: $V_Y = 16556 \text{ см}^3$.

$$V_Y = 16556 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$\Pi_{\phi.я} = 675.2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$\Pi_{\phi.c} = 657.2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Активний переріз стрижня:

$$\Pi_c = k_3 \cdot \Pi_{\phi.c};$$

$$\Pi_c = 0.97 \cdot 0.066 = 0.06375 \text{ м}^2.$$

Активний переріз ярма:

$$\Pi_{\text{я}} = k_3 \cdot \Pi_{\text{ф.я}};$$

$$\Pi_{\text{я}} = 0.97 \cdot 0.068 = 0.06549 \text{ м}^2.$$

Об'єм сталі магнітної системи:

$$V_{\text{Y.ст}} = k_3 \cdot V_{\text{Y}};$$

$$V_{\text{Y.ст}} = 0.97 \cdot 0.017 = 0.016 \text{ м}^3$$

Відстань між осями стрижнів:

$$C_2 = D''_2 + a'_{22};$$

$$C_2 = 0.614 + 0.045 = 0.659 \text{ м},$$

де D''_2 - зовнішній діаметр обмотки ВН, м;

a'_{22} - міжфазна ізоляційна відстань між обмотками ВН різних фаз, м .

Розрахунок мас стрижнів, ярем та маси сталі:

Маса сталі магнітної системи:

$$G_{\text{y}} = V_{\text{Y.ст}} \cdot \gamma_{\text{ст}};$$

$$G_{\text{y}} = 0.016 \cdot 7.65 \cdot 10^3 = 122.854 \text{ кг},$$

де $\gamma_{\text{ст}}$ - щільність трансформаторної сталі, $\gamma_{\text{ст}} = 7650 \text{ кг/м}^3$;

$V_{\text{Y.ст}}$ - об'єм сталі магнітної системи, м^3 .

Маса сталі ярма:

$$G''_{\text{я}} = 2 \cdot G_{\text{y}};$$

$$G''_{\text{я}} = 2 \cdot 122.854 = 245.708 \text{ кг},$$

$$G'_{\text{я}} = 2 \cdot \Pi_{\text{я}} \cdot 2 \cdot C \cdot \gamma_{\text{ст}};$$

$$G'_{\text{я}} = 2 \cdot 0.065 \cdot 2 \cdot 0.692 \cdot 7.65 \cdot 10^3 = 1.387 \cdot 10^3 \text{ кг},$$

$$G_{\text{я}} = G'_{\text{я}} + G''_{\text{я}};$$

$$G_{\text{я}} = 1.387 \cdot 10^3 + 245.708 = 1632.642 \text{ кг},$$

де C - відстань між осями стрижнів, м;

$\Pi_{\text{я}}$ - активний переріз ярма, м^2 .

Маса сталі стрижнів:

$$G'_c = 3 \cdot l_c \cdot \Pi_c \cdot \gamma_{ст};$$

$$G'_c = 3 \cdot 0.9 \cdot 0.064 \cdot 7.65 \cdot 10^3 = 1.317 \cdot 10^3 \text{ кг},$$

$$G''_c = 3(\Pi_c \cdot a_{1я} \cdot \gamma_{ст} - G_y);$$

$$G''_c = 3(0.064 \cdot 0.26 \cdot 7.65 \cdot 10^3 - 122.854) = 11.825 \text{ кг},$$

$$G_c = G'_c + G''_c;$$

$$G_c = 1.317 \cdot 10^3 + 11.825 = 1.329 \cdot 10^3 \text{ кг},$$

де $a_{1я}$ - ширина стикуючих пакетів ярма, $a_{1я} = 0.26$ м;

Π_c - активний переріз стрижня, м²;

l_c - висота стрижня, м.

Загальна маса сталі:

$$G_{ст} = G_{я} + G_c;$$

$$G_{ст} = 1.633 \cdot 10^3 + 1.329 \cdot 10^3 = 2.961 \cdot 10^3 \text{ кг}.$$

Розрахунок втрат неробочого ходу:

Принцип дії трансформатора в разі під'єднання однієї з його обмоток до джерела змінного струму і розімкнутості інших обмоток називається режимом холостого ходу. Втрати в трансформаторі, що виникають при цьому, за номінальних параметрів напруги на первинній стороні і частоти, називаються втратами холостого ходу. Ці втрати, що позначаються як P_x , містять магнітні втрати - втрати в активній складовій (сталі магнітного осердя, сталевій структурі), що виникають через часткове відхилення основного магнітного потоку, основні втрати на первинній обмотці внаслідок струму холостого ходу, а також втрати в ізоляції за рахунок діелектричного струму.

Індукція в стрижні:

$$B_c = \frac{u_B}{4.44 \cdot f \cdot \Pi_c};$$

$$B_c = \frac{20.995}{4.44 \cdot 50 \cdot 0.064} = 1.48 \text{ Тл},$$

де u_B - напруга одного витка, В.

Індукція в ярмі:

$$B_{я} = \frac{u_B}{4.44 \cdot f \cdot \Pi_{я}};$$

$$B_{я} = \frac{20.995}{4.44 \cdot 50 \cdot 0.065} = 1.44 \text{ Тл}.$$

Індукція на косому стику:

$$B_{\text{кос}} = \frac{B_c}{\sqrt{2}};$$

$$B_{\text{кос}} = \frac{1.483}{\sqrt{2}} = 1.05 \text{ Тл}.$$

Площа перерізу стрижня на косому стику:

$$\Pi_{\text{кос}} = \sqrt{2} \cdot \Pi_c;$$

$$\Pi_{\text{кос}} = \sqrt{2} \cdot 0.064 = 0.09 \text{ м}^2.$$

Питомі втрати для сталі стрижнів, по табл. 8.10 [6]:

$$B_c = 1.483 \text{ Тл};$$

$$p_c = 1.066 \text{ Вт/кг};$$

$$p_z = 826 \text{ Вт/кг}.$$

Питомі втрати для сталі ярм, по табл. 8.10 [6]:

$$B_{я} = 1.44 \text{ Тл};$$

$$p_{я} = 0.998 \text{ Вт/кг};$$

$$p_{z1} = 778 \text{ Вт/кг}.$$

Питомі втрати для сталі стиків, по табл. 8.10 [6]:

$$B_{\text{кос}} = 1.05 \text{ Тл};$$

$$p_{\text{кос}} = 0.475 \text{ Вт/кг};$$

$$P_{\text{кoc1}} = 345 \text{ Вт/кг}.$$

Втрати холостого ходу:

$$P_p = 4 \cdot \Pi_{\text{кoc}} \cdot P_{\text{кoc}} + 1 \cdot \Pi_c \cdot p_3 + 2 \cdot \Pi_{\text{я}} \cdot p_{31};$$

$$P_p = 4 \cdot 0.09 \cdot 0.475 + 1 \cdot 0.064 \cdot 826 + 2 \cdot 0.065 \cdot 778 = 154.737 \text{ Вт},$$

$$P_x = \left[k_{\text{п.р}} \cdot k_{\text{п.з}} \cdot \left[p_c \cdot G_c + p_{\text{я}} \cdot G'_{\text{я}} - 4 \cdot (p_{\text{я}} \cdot G_y) + \frac{p_c + p_{\text{я}}}{2} \cdot k_{\text{п.у}} \cdot G_y \right] + P_p \right] \cdot k_{\text{п.я}} \cdot k_{\text{п.п}} \cdot k_{\text{п.ш}};$$

$$P_x = \left[1.05 \cdot 1 \cdot \left[1.066 \cdot 1.329 \cdot 10^3 + 0.998 \cdot 1.387 \cdot 10^3 - 4 \cdot (0.998 \cdot 122.854) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1.066 + 0.998}{2} \cdot 10.18 \cdot 122.854 \right] + 154.737 \right] \cdot 1 \cdot 1.03 \cdot 1.05 = 4256.1 \text{ Вт},$$

$$\frac{4256.1}{2.8 \cdot 10^3} \cdot 100 = 152.004 \% \quad \text{заданного значения}$$

де $k_{\text{п.з}}$ - коефіцієнт врахування втрат при задирках, $k_{\text{п.з}} = 1$;

$k_{\text{п.п}}$ - коефіцієнт для врахування впливу пресування на втрати струму неробочого ходу, по табл. 8.12 [6], $k_{\text{п.п}} = 1.03$;

$k_{\text{п.р}}$ - коефіцієнт збільшення втрат при внутрішніх механічних напругах, $k_{\text{п.р}} = 1.05$;

$k_{\text{п.у}}$ - коефіцієнт збільшення втрат у кутах, по табл. 8.13 [6], $k_{\text{п.у}} = 10.18$;

$k_{\text{п.я}}$ - коефіцієнт для ярма з відношенням числа ступенів стрижня та ярма, $k_{\text{п.я}} = 1$;

$k_{\text{п.ш}}$ - коефіцієнт для врахування впливу пресування на втрати струму неробочого ходу, $k_{\text{п.ш}} = 1.05$.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку втрат неробочого ходу трансформатора с повітряним зазором розмірами 20, 30 та 40 мм

Розраховані параметри			Каталожні параметри
Ізоляційний (повітряний) зазор (a_{12})			
20 мм	30 мм	40 мм	
3.032 кВт	3.633 кВт	4.256 кВт	2.8 кВт

На основі даних записаних у таблиці 3.4 було побудовано числові та відсоткові графіки залежностей 3.13-3.14.

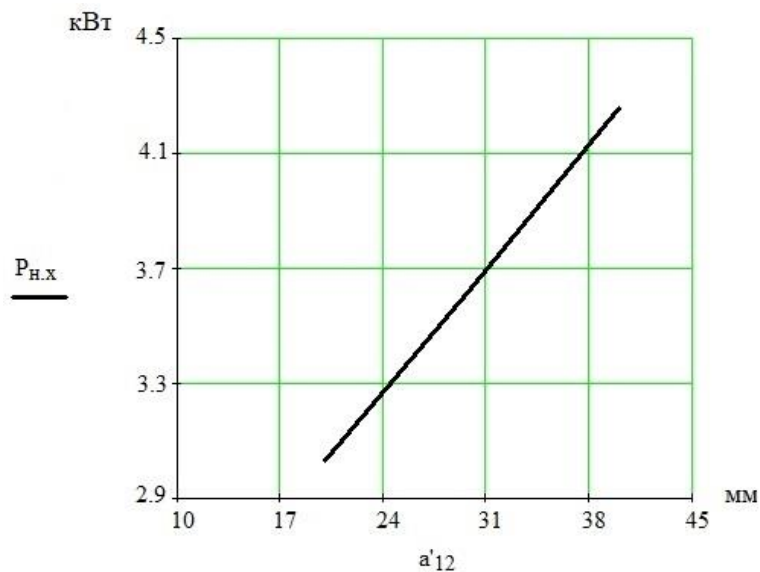


Рисунок 3.13 – Зміна втрат холостого (неробочого) ходу ($P_{н.х}$) зі зміною ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12})

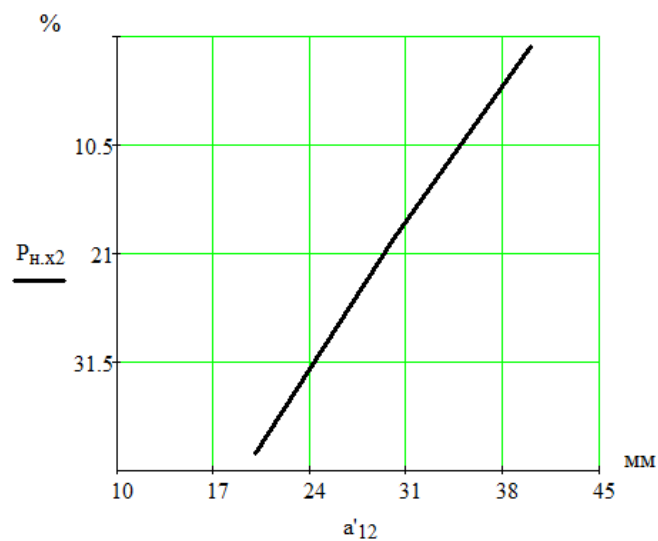


Рисунок 3.14 – Відсоткова зміна втрат холостого (неробочого) ходу ($P_{н.х2}$) зі зміною ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12})

На графіках 3.13-3.14 зображена залежність втрат холостого (неробочого)

ходу ($P_{н.х}$) від ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12}). При зменшенні зазору (з 40 до 20 мм) втрати холостого (неробочого) ходу зменшуються (з 4.256 до 3.032 кВт). Загалом втрати холостого (неробочого) ходу зменшились на 40 %.

Розрахунок струму неробочого ходу:

Струм первинної обмотки трансформатора, який виникає в умовах холостого ходу за номінальних значень синусоїдальної напруги і частоти, називається струмом холостого ходу. У процесі розрахунку струму холостого ходу трансформатора окремо визначають його активну та реактивну складові.

Питомі намагнічувальні потужності для сталі стрижнів, по табл. 8.17 [6]:

$$B_c = 1.483 \text{ Тл};$$

$$q_c = 1.276 \text{ Вт/кг};$$

$$q_{c.з} = 15560 \text{ Вт/кг}.$$

Питомі намагнічувальні потужності для сталі ярм, по табл. 8.17 [6]:

$$B_y = 1.44 \text{ Тл};$$

$$q_y = 1.168 \text{ Вт/кг};$$

$$q_{y.з} = 13480 \text{ Вт/кг}.$$

Питомі намагнічувальні потужності для сталі стиків, по табл. 8.17 [6]:

$$B_{кoc} = 1.05 \text{ Тл};$$

$$q_{кoc} = 0.548 \text{ Вт/кг};$$

$$q_{кoc1} = 1000 \text{ Вт/кг}.$$

Намагнічувальна потужність холостого ходу:

$$Q_p = 4 \cdot \Pi_{кoc} \cdot q_{кoc} + 1 \cdot \Pi_c \cdot q_{c.з} + 2 \cdot \Pi_y \cdot q_{y.з};$$

$$Q_p = 4 \cdot 0.09 \cdot 0.548 + 1 \cdot 0.064 \cdot 1.556 \cdot 10^4 + 2 \cdot 0.065 \cdot 1.348 \cdot 10^4 = 2.758 \cdot 10^3 \text{ ВА},$$

$$Q_x = \left[k_{т.р} \cdot k_{т.з} \cdot \left[q_c \cdot G_c + q_{я} \cdot G'_{я} - 4 \cdot (q_{я} \cdot G_y) + \frac{q_c + q_{я}}{2} \cdot k_{т.у} \cdot k_{т.пл} \cdot G_y \right] + Q_p \right] \cdot k_{п.я} \cdot k_{п.п} \cdot k_{п.ш};$$

$$Q_x = \left[1.18 \cdot 1 \cdot \left[1.276 \cdot 1.329 \cdot 10^3 + 1.168 \cdot 1.387 \cdot 10^3 - 4 \cdot (1.168 \cdot 122.854) + \right. \right.$$

$$\left. + \frac{1.276 + 1.168}{2} \cdot 42.45 \cdot 1.32 \cdot 122.854 \right] + 2.758 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 1.03 \cdot 1.05 = 1.722 \cdot 10^4 \text{ ВА},$$

де $k_{т.р}$ - коефіцієнт, що враховує вплив різання смуги рулони на пластини,

$$k_{т.р} = 1.18 ;$$

$k_{т.з}$ - коефіцієнт, що враховує вплив зрізання задирок, $k_{т.з} = 1$;

$k_{т.пл}$ - коефіцієнт, що враховує ширину пластин у кутах магнітної системи, по табл. 8.21 [6]: $k_{т.пл} = 1.32$;

$k_{т.я}$ - коефіцієнт, що враховує форму перерізу ярма, $k_{т.я} = 1.03$;

$k_{т.п}$ - коефіцієнт, що враховує пресування магнітної системи, $k_{т.п} = 1.05$;

$k_{т.ш}$ - коефіцієнт, що враховує перешихтування верхнього ярма, $k_{т.ш} = 1.05$;

$k_{т.у}$ - коефіцієнт, що враховує збільшення намагнічуючої потужності в вузлах магнітної системи, по табл. 8.20 [6], $k_{т.у} = 42.45$.

Струм неробочого ходу:

$$i_{01} = \frac{Q_x}{10 \cdot S \cdot 10^{-3}};$$

$$i_{01} = \frac{1.722 \cdot 10^4}{10 \cdot (1.6 \cdot 10^6) \cdot 10^{-3}} = 1.076 \text{ \%},$$

$$\frac{1.076 \cdot 100}{1.3} = 82.769 \text{ \% заданного значення}$$

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку струму неробочого ходу трансформатора с повітряним зазором розмірами 20, 30 та 40 мм

Розраховані параметри			Каталожні параметри
Ізоляційний (повітряний) зазор (a ₁₂)			
20 мм	30 мм	40 мм	
0,789 %	0,938 %	1,076 %	1.3%

На основі даних записаних у таблиці 3.5 було побудовано числові та відсоткові графіки залежностей 3.15-3.16.

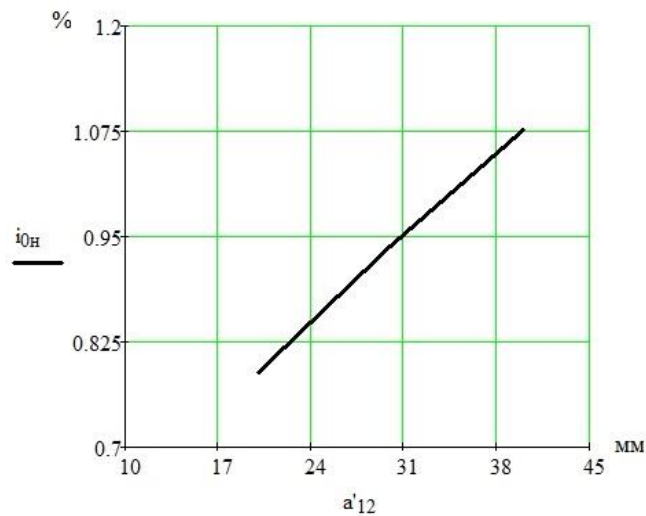


Рисунок 3.15 – Зміна струму холостого (неробочого) ходу (i_{0H}) зі зміною ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12})

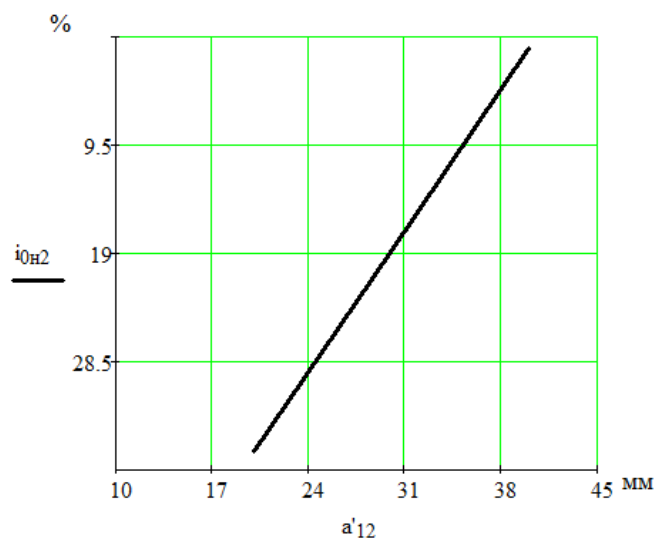


Рисунок 3.16 – Відсоткова зміна струму холостого (неробочого) ходу (i_{0H2}) зі зміною ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12})

На графіках 3.15-3.16 зображена залежність струму холостого (неробочого) ходу ($i_{0н}$) від ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12}). При зменшенні зазору (з 40 до 20 мм) струм холостого (неробочого) ходу зменшується (з 1,076 до 0,789 %) Загалом струм холостого (неробочого) ходу зменшився на 36%.

Активна складова струму неробочого ходу:

$$i_{01a} = \frac{P_x}{10 \cdot S \cdot 10^{-3}};$$

$$i_{01a} = \frac{4.256 \cdot 10^3}{10 \cdot (1.6 \cdot 10^6) \cdot 10^{-3}} = 0.266 \text{ \%}.$$

Реактивна складова струму неробочого ходу:

$$i_{01p} = \sqrt{i_{01}^2 - i_{01a}^2};$$

$$i_{01p} = \sqrt{1.076^2 - 0.266^2} = 1.043 \text{ \%}.$$

Розрахунок ККД трансформатора:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_k + P_x}{S + P_k + P_x} \right) \cdot 100;$$

$$\eta = \left(1 - \frac{1.21 \cdot 10^4 + 4.256 \cdot 10^3}{1.6 \cdot 10^6 + 1.21 \cdot 10^4 + 4.256 \cdot 10^3} \right) \cdot 100 = 98.988 \text{ \%}.$$

Таблиця 3.6 – Результати розрахунку ККД трансформатора с повітряним зазором розмірами 20, 30 та 40 мм

Ізоляційний (повітряний) зазор		
20 мм	30 мм	40 мм
99,044 %	99,016 %	98,988 %

На основі даних записаних у таблиці 3.6 було побудовано числові та відсоткові графіки залежностей 3.17-3.18.

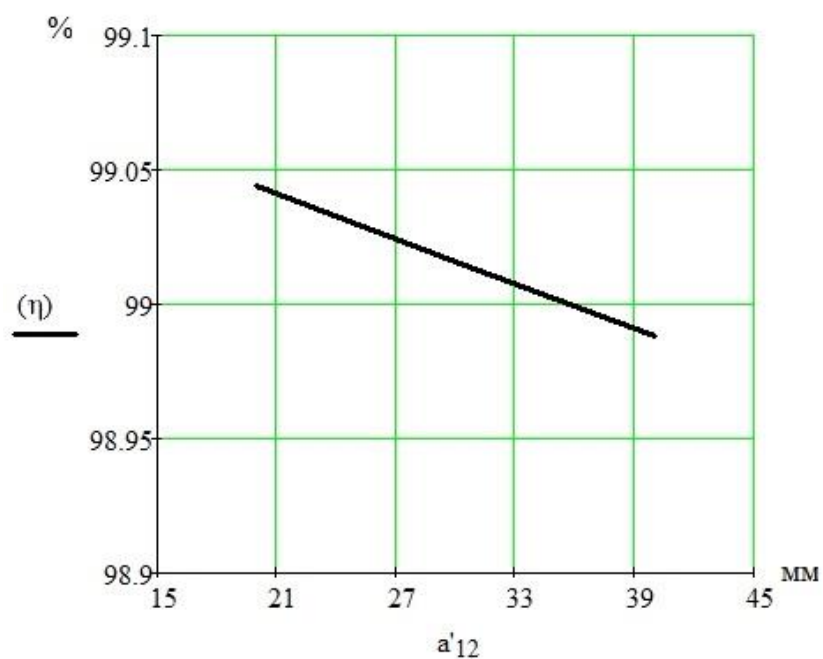


Рисунок 3.17 – Зміна ККД (η) зі зміною ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12})

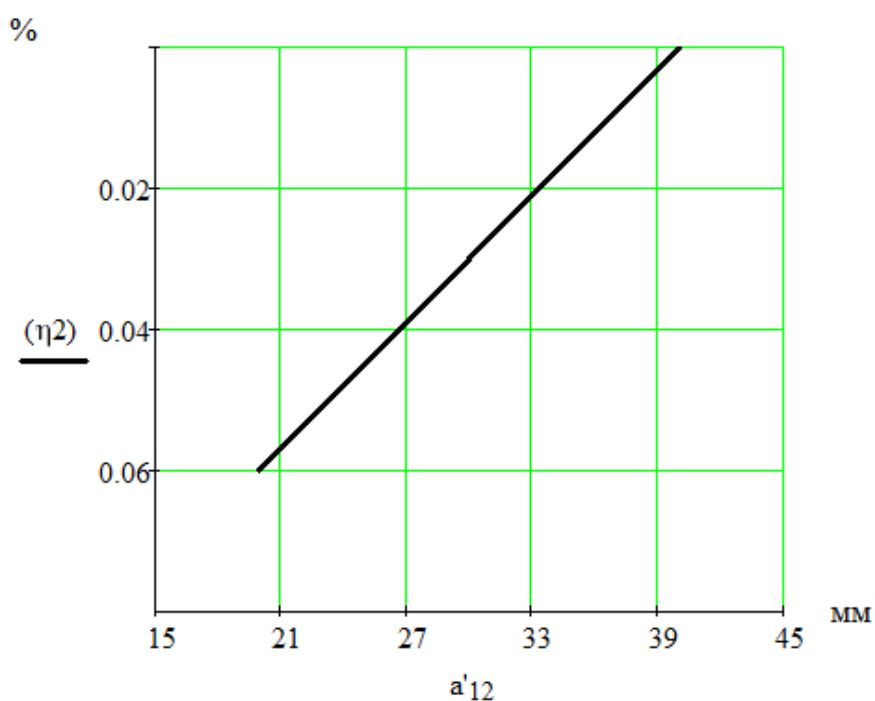


Рисунок 3.18 – Відсоткова зміна ККД (η_2) зі зміною ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12})

На графіках 3.17-3.18 зображена залежність ККД (η) від ізоляційного зазору між обмотками ВН і НН (a'_{12}). При зменшенні зазору (з 40 до 20 мм) ККД збільшуються (з 98.988 до 99.044 %). Загалом ККД збільшився на 0,06%.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Результатом виконання дипломної роботи стало вирішення практичного завдання – розрахунок основних параметрів та дослідження впливу повітряного зазору на характеристики силового сухого трансформатора, як способів підвищення ефективності роботи КТП.

Отримані наступні результати:

1. Проведено аналіз відомостей про комплектну трансформаторну підстанцію, особливостей її експлуатації та задано технічні характеристики трансформатора.

2. Розроблено електричну схему, схему КТП, схему заміщення електричної мережі, розраховано струми короткого замикання, відповідно до цих розрахунків, здійснено вибір низьковольтного та високовольтного електрообладнання.

3. Було здійснено розрахунок сухого трансформатора з повітряними зазорами розмірами 20 мм, 30 мм і 40 мм, відповідно. В ході розрахунку було встановлено, що параметри трансформатора залежать від коефіцієнта β , який суттєво впливає на характеристики. Проведено дослідження впливу повітряного (ізоляційного) проміжку на основні експлуатаційні параметри трансформатора, розраховані в ході дослідження при постійному коефіцієнті $\beta = 2$. За результатами розрахунків побудовано графіки залежностей.

За результатами дослідження встановлено, що із зменшенням зазору (з 40 до 20 мм) у сухому трансформаторі значно знижуються втрати холостого ходу (40%), величина струму холостого ходу (36%) та напруга короткого замикання (18%), хоча втрати при короткому замиканні трохи зростають (2.8%), що не є критичним.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Васи́леґа П.О. Електропостачання: Навчальний посібник. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с
2. Комплектні рішення в енергетиці: Комплектно-трансформаторні підстанції: Призначення, експлуатаційні характеристики, конструкція: Каталог. - Х., 2018. - 28 с.
3. Правила влаштування електроустановок - К.: Міненерговугілля України, 2017. - 617 с.
4. Rozhkova L.D., Kozulin V.S. Electroustatkuvannia stancij ta pidstancij: navch. [dla stud. Technikumiv]/ L.D. Rozhkova, V.S. Kozulin. – М.: Energoizdat, 1987. – 649 Р.
5. Комплектні рішення в енергетиці: Комплектні розподільні пристрої 6(10) кВ: Призначення, експлуатаційні характеристики, конструкція: Каталог. - Е., 2019. - 60 с.
6. Tyhkomirov P.M. Rozrakhunok transformatoriv: navch. [dla stud. VUZiv / P.M. Tihomirov. – М.: Energia, 1986. – 528 р.
7. Комплектні рішення в енергетиці: Головні розподільні щити "Імпульс" на струми до 4000А: Призначення, експлуатаційні характеристики, конструкція: Каталог. - Х., 2016. - 22 с.
8. Головний розподільчий щит 4000А [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://amk-electro.ru/grsch/grshch-4000a-vykat-avt/>
9. Влаштування трансформаторної підстанції 10 на 0,4 кВ [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://electricalschool.info/main/elsnabg/2140-kak-ustroena-transformatornaya-podstanciya-10-na-04-kv.html>