

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
УКРАЇНИ ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій
К.Т.Н., доцент _____ /**ОКУШКО О.В.**/
(підпис)
« » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ

Турчик Костянтин Михайлович

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Аналіз втрат джерел у трифазних силових трансформаторах потужністю до 400 кВА»
затверджена наказом ректора НУБіП України від 26.09.2024 № 1665”С”
Термін подання завершеної роботи на кафедру 15. 05 . 2025
Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: Технічна документація.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Які види втрат виникають у трифазних силових трансформаторах?
2. Яка ефективність трансформаторів різних типів (сухі, масляні) в межах до 400 кВА?
3. Які економічні наслідки пов'язані з втратами електроенергії у трансформаторах?
4. Як впливає температура навколишнього середовища та внутрішнє нагрівання на втрати трансформатора?
5. Які заходи можна запропонувати для зниження втрат у трансформаторах середнього класу потужності?

Дата видачі завдання 26.09.2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ **Сорокін Д.С.**
(підпис) (ПІБ)
Завдання прийняв до виконання _____ **Турчик К.М.**
(підпис) (ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 62 с., 25 рис., 7 табл., 30 джерел.

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено аналіз втрат електроенергії в трифазних силових трансформаторах потужністю до 400 кВА. Розглянуто основні види втрат — у сталі, в обмотках, додаткові та магнітні втрати, а також їх залежність від режимів навантаження та температурних умов.

Зважаючи на широке застосування трифазних силових трансформаторів потужністю до 400 кВА, зокрема у локальних розподільчих мережах, промислових підприємствах та громадських об'єктах, постає актуальне завдання – вивчити природу та джерела втрат у таких трансформаторах. Їх аналіз дозволяє не лише оцінити технічний стан обладнання, а й визначити шляхи для оптимізації його роботи, зменшення енерговитрат та підвищення загальної ефективності енергосистеми.

Мета дослідження – Дослідити характер і величину втрат у трифазних силових трансформаторах потужністю до 400 кВА з метою підвищення їхньої енергоефективності та оптимізації режимів експлуатації шляхом виявлення основних джерел енергетичних втрат, аналізу конструктивних рішень та впровадження заходів щодо їх зменшення.

проведено дослідження над побудованою моделлю;

проаналізовано отримані результати та зроблені висновки , щодо якості побудованої моделі.

визначино ефективність створеного рішення.

Об'єкт дослідження – силовий трифазний трансформатор до 400 кВА .

Предмет дослідження – втрати в трансформаторі.

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1.....	10
1.1 Загальні відомості про перетворювачі до 400кВА.....	10
1.2 Сухі трансформатори	11
1.3 Конструкція та параметри трансформатора серії Trihal TRI04001064354980	14
1.4 Аналіз втрат трифазних силових трансформаторах до 400кВА.	21
1.4.1 Фізичні явища та їх природа в трансформаторах до 400кВА..	21
1.4.2 Визначення втрат трансформатора до 400кВА.....	23
1.5 Числові методи розрахунку	25
1.5.1 Метод скінченних елементів.....	25
1.5.2 Використання скінченноелементного аналізу.....	26
1.6 Висновки до розділу 1	28
Розділ 2.....	29
2.1 Загальні відомості.....	30
2.2 САD модель і дискретизація.	31
2.3 Фізична модель	34
2.4 Математичний апарат САЕ.	36
2.5 Початкові і граничні умови	39
2.6 Висновки до розділу 2.....	40
Розділ 3 Дослідження та його результати	41
3.1 Залежні і незалежні параметри моделі.....	41
3.2 Установки дослідження та розв'язувачі.....	43
3.3 Результати та їх аналіз	46
3.3.1 Аналіз втрат в сталі та розподілу магнітного потоку	46
3.3.2 Аналіз втрат в ярмових балках	47
3.4 Обчислення і порівняння результатів обрахунків	48
3.5 Підведення підсумків щодо проведеного дослідження.....	51
3.6 Висновки до розділу 3	51

Розділ 4 Системи автоматизованого моніторингу втрат у трифазних трансформаторах	52
4.1 Актуальність моніторингу втрат.....	52
4.2 Архітектура системи моніторингу.....	52
4.3 Приклад побудови системи.....	53
4.4 Ефективність і економічна доцільність впровадження.....	53
4.5 Висновки до розділу 4.....	54
Розділ 5 Безпека праці.....	55
Висновки.....	58
Список використаних джерел.....	60

ВСТУП

Трифазні силові трансформатори відіграють ключову роль у системах розподілу електроенергії, забезпечуючи зміну рівнів напруги для ефективної передачі енергії. Особливо широке застосування мають трансформатори потужністю до 400 кВА — вони використовуються в промислових, комерційних і житлових електромережах, зокрема для підключення локальних навантажень, освітлювальних систем, електроприводів тощо.

У процесі експлуатації трансформаторів спостерігаються значні втрати електроенергії, що негативно впливає на їхню ефективність та загальні енергетичні витрати. Ці втрати поділяються на постійні — втрати в сталі, що виникають унаслідок гістерезису та вихрових струмів, і змінні — втрати в обмотках, спричинені електричним опором провідників. Додатково, існують механічні втрати, пов'язані з вібраціями, шумом і нагріванням конструктивних елементів трансформатора.

Сучасні вимоги до енергоефективності та зменшення викидів CO₂ вимагають оптимізації роботи трансформаторів, зокрема шляхом аналізу джерел втрат і впровадження нових технічних рішень. Саме тому дослідження втрат у трансформаторах потужністю до 400 кВА має практичне значення для покращення енергетичної ефективності всієї електричної системи.

Серед різноманітних методів математичного моделювання трансформаторного устаткування виділяють три групи. Перша – методи чисельного моделювання. Серед сучасних методів цієї групи переважаючими є методи скінченноелементного аналізу (СЕА). До другої групи відносять вдосконалені версії еквівалентних схем заміщення устаткування, Вони досить широко використовуються в промисловості завдяки їх простоті та здатності забезпечити надійні результати. Третю групу складають експериментальні

методи, які об'єднують дані вимірювання з аналітичними або іншими методами з метою забезпечення ефективності моделей для точного відтворення певних характеристик устаткування.

Про цьому можна виділити умовно дві основні групи розрахункових методів – аналітичні і чисельні. Перша група методів ґрунтується на формуванні крайових задач електромагнітного поля і теплопровідності, що допускають аналітичні розв'язки. До другої групи методів можна віднести чисельні методи, що ґрунтуються на використанні інтегральних рівнянь, скінченних різниць і скінченних елементів, граничних елементів, гібридних методів і т.п. Обидві групи методів широко застосовуються при розробці і проектуванні трансформаторного устаткування

Слід зазначити, що використання аналітичних методів дає можливість розробки комплексних оптимізаційних і перевірних розрахункових систем, у тому числі з врахуванням взаємопов'язаних електромагнітних, теплових, механічних процесів у складі систем автоматизованого проектування.

Беззаперечні переваги є у застосуванні чисельних методів для дослідження складних тривимірних, нелінійних розрахункових моделей трансформаторного устаткування, а у ряді випадків для мультифізичного аналізу, який дозволяє провести одночасно розрахунок електромагнітного поля, нагріву та механічних навантажень. Застосування сучасних систем скінченноелементного аналізу з розвиненими засобами візуалізації результатів дає можливість «побачити» розподіл магнітного поля, вихрового струму, поля температур і швидкостей охолодного середовища. Це в значній мірі сприяє кращому розумінню процесів та розробці ефективних проектних рішень для зниження показників, що перевищують нормовані значення.

Комерційні системи САЕ і промислові САПР доступні користувачам у вигляді готових програмно-методичних комплексів, в яких розрахункові методи «заховані» в обчислювальних програмах. У той же час ефективне застосування проектувальниками трансформаторного устаткування вказаних систем, а також, при необхідності, їх вдосконалення і подальшого розвитку, вимагає глибокого

вивчення і розуміння основних принципів, переваг, обмежень і можливих проблем використання.

У роботі використано розробки і дослідження, у тому числі спільні, які проведено багатьма фахівцями підприємств, Всеукраїнського інституту трансформаторобудування, Всесоюзного електротехнічного інституту, Інститутів математики, електродинаміки, технічної теплофізики НАН України. Ці результати представляються, з вдячністю, в розділах цієї роботи. Це такі фахівці (в алфавітному порядку): Барбарицька М.С., Басс О.М., Буруза В.Л., Бікі М.А., Боднар В.В., Борю Н.В., Бунін А.Г., Вороненко В.І., Григоров І.Б., Дробишевський О.О., Жук В.В., Зіновкін В.М., Калайда Г.І., Каналюк В.Л., Карасьов В.В., Кирилов В.М., Кобилецький А.А., Кокошин С.С., Круковський П.Г., Конторович Л.Н., Кравченко А.М., Лазарєв В.Ш., Лейтес Л.В., Лур'є О.І., Мاستрюков Л.О., Манькін Е.А., Михайловський Ю.О., Морозов Д.М., Панібратець А.М., Пуйло Г.В., Рассальський П.Г., Родіонов В.Г., Савченко А.І., Сисуненко О.І., Татчуткин О.Л., Уколов С.В., Фурман Я.І., Хублоров Н.Н., Ціер Г.І., Черноготський В.М., Швідлер А.Б., Шафір Ю.Н., Шинкаренко О.В., Шифрін Л.Н., Шишка Ю.І., Яцевський В.А. та ін.

Результати роботи вказаних фахівців впроваджено в практику промислового проектування у вигляді галузевих нормативних документів та у вигляді відомих САПР трансформаторів загального призначення (САПР ТОН). Трансформаторів і реакторів (САПР ТЕР).

Значний досвід конструювання, розрахункового проектування, заводських випробувань, дослідження, діагностики і моніторингу силового трансформаторного устаткування в експлуатації нині представлено а значному числі публікацій, галузевих і міжнародних нормативних документах.

РОЗДІЛ 1

1.1 Загальні відомості про перетворювачі.

Силовий трансформатор, чи перетворювач – це статичний електромагнітний пристрій, який має дві або більше обмотки і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї (первинної) системи змінного струму в іншу (вторинну) систему змінного струму. Трансформатор дозволяє змінювати частоту, кількість фаз, форму вихідної напруги. Трифазні силові трансформатори потужністю до 400 кВА належать до класу розподільчих трансформаторів, які широко застосовуються в енергетичних системах для живлення малих промислових об'єктів, адміністративних будівель, освітлювальних мереж, житлових районів, сільських господарств тощо. Їх головна функція — перетворення рівня напруги з метою забезпечення ефективного транспортування електроенергії та її безпечного використання на місцях.

Основні характеристики:

- **Номінальна потужність:** до 400 кВА
- **Тип струму:** змінний трифазний
- **Номінальна напруга:** зазвичай первинна — 6, 10 або 20 кВ; вторинна — 400 В
- **Частота:** 50 Гц
- **Тип охолодження:** сухе (типу AN) або масляне (ONAN)
- **Матеріал обмоток:** мідь або алюміній

Класифікація:

1. За типом охолодження:

- Сухі трансформатори (з литою ізоляцією) — переважно використовуються в приміщеннях з підвищеними вимогами до пожежної безпеки.
- Масляні трансформатори — традиційні, з високою здатністю до тепловідведення, часто застосовуються на відкритому повітрі.

2. За призначенням:

- Трансформатори загального призначення — для живлення стандартних споживачів.
- Спеціалізовані трансформатори — для живлення технологічного обладнання, з нестандартними параметрами навантаження.

Основні втрати:

Втрати енергії в трансформаторах до 400 кВА поділяються на:

- **Втрати в сталі (холостого ходу):** виникають у магнітопроводі при наявності напруги навіть без навантаження.
- **Втрати в обмотках (навантаження):** спричинені протіканням струму через обмотки трансформатора.
- **Додаткові втрати:** включають втрати в з'єднувальних елементах, струми в конструкційних частинах, вихрові струми тощо.

В даній магістерській роботі ми розглянемо сухий тип трансформаторів до 400 кВА. Цей тип відрізняється своєю надзвичайною простотою, на відміну від своїх «рідких» аналогів. Звичайно, відмова від оливи, як зручного по багатьом причинам матеріалу (складно знайти інший матеріал, який так вдало поєднує свої як діелектричні, так і теплопровідні властивості), залишила свій слід. Але можливості у майбутньому, які ми здатні у подальшому отримати від сухих трансформаторів, за умови наявності розвитку в цій області, на мою думку, варті того. Для початку пояснимо трохи їх конструктивні особливості.

1.2 Сухі трансформатори

Сухі чи повітряні трансформатори – це вид перетворювачів, в яких магнітна система і дві чи більше обмоток не занурюють в масляний розчин, а охолоджуються за рахунок руху повітряних потоків. Вони більш прості і

– Можливість короткочасний перевантажень без помітних недоліків такого режиму роботи.

– Екологічність. Їх можна встановлювати на ділянках, які потребують підвищеної безпеки оточуючої середовища, в районах з джерелами водопостачання і підвищеними екологічними вимогами, поряд з атомними електростанціями, в метрополітені, тощо.

Як вже було сказано, через недосконалість діелектричних властивостей діелектрика, вони дещо програють. Так, перетворювачі, що мають однакові параметри роботи (показники номінальної напруги, струму і т.д.), но працюючі на різних діелектриках, будуть значно відрізнятися один від одного розмірами. Тому досить складно підібрати матеріал, що здатний конкурувати з трансформаторною оливою. Епоксидна смола, наприклад, має досить непогані властивості. Основні з них подані у таблиці 1.

Застосування епоксидної смоли у порівнянні з маслом

Таблиця 1

Вологостійкість	У трансформаторах сухого типу литих смол повна інкапсуляція первинної та вторинної обмотки епоксидною смолою запобігає проникненню вологи у обмотки. Литі ізоляції зі смоли забезпечує дуже хороший захист від несприятливих умов навколишнього середовища. Ці трансформатори можуть працювати без порушення роботи при 100% вологості.
Миттєвість включення	Завдяки високоякісному теплоізоляційному матеріалу, котушки не гігроскопічні і трансформатор можна включати безпосередньо без попереднього висушування навіть після тривалого перерви в роботі.
Стійкість до імпульсних напруг	На відміну від звичайних трансформаторів сухого типу, трансформатори з литою ізоляцією є кращими щодо здатності витримувати імпульсні напруги.

Стійкість до коротких замикань	Краща здатність витримувати короткі замикання порівняно з масляними та звичайними трансформаторами сухого типу завдяки епоксидуванню, посиленому скловолоконном.
Стійкий до перепадів температури	Використовуваний ізоляційний матеріал - це скловолокно, армоване епоксидною смолою класу 'F', яка витримує великі перепади температур.
Важко запалити та схильний до самозатухання	Лита ізоляція надає трансформатору чудову вогнестійкість разом в поєднанні зі здатністю до самогашенню.
Не потрібно технічного обслуговування	Завдяки інкапсуляції котушок з литою смолою обмотки котушок зафіксовані, тому їх не потрібно додатково стягувати, компенсуючі зусилля, що виникають під час коротких замикань. Також не потрібно перевіряти рівень масла та стан ізоляції оливи. Це призводить до економії витрат на обслуговування.
Ніяких витоків або скраплення масла	Оскільки трансформатори з литою ізоляцією суцільні, з'явилась можливість повністю уникнути проблем, пов'язаної з наповненими маслом трансформаторами, такими як витік масла та його розкрадання.
Займає менше місця	Ці трансформатори, як правило, менших розмірів і меншої ваги. Тому вартість будівництва та монтажу може бути зменшена шляхом установки трансформаторів сухого типу.

Економія вартості будівельних робіт	в Можна розмістити трансформатори поблизу центру навантаження. Цим трансформаторам не потрібно будівництво спеціальних огорож з або масляних ям, що зменшує загальні будівельні роботи.
Екологічно чисте	Оскільки в цих трансформаторах масло не використовується, то забруднення ґрунтових вод через витік масла в принципі неможливо.

1.3 Конструкція та параметри трансформатора серії Trihal TRI04001064354980.

Сухий трансформатор з литою ізоляцією серії Trihal призначений для експлуатації в розподільних мережах трифазного змінного струму частотою 50 Гц на номінальну напругу 6, 10 і 20 кВ. Трансформатори можуть бути розміщені як в окремих приміщеннях, так з іншим технологічним обладнанням.

Трансформатор виготовлений таким чином, щоб його можна було у подальшому переробити, тому його конструкція і матеріали що використовуються в деякій мірі простіші ніж у звичайного трансформатора. Зовнішній вигляд, який дозволяє скласти добре уявлення про типовий вигляд сухих трансформаторів, представлено на рис. 1.1

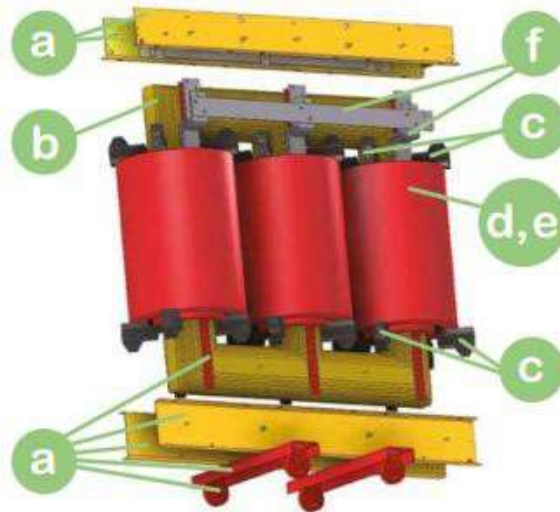


Рис.1.1. Спрощений вид сухого трансформатора з позначенням головних елементів

Компоненти та деякі пояснення до рис. 1.1 подані у таблиці 2.

Перелік базових частин трансформатора

Таблиця 2

Елементи	Компоненти	Вага	Коментування
a	Сталеві деталі	100-5000	Затискачі, валики
b	Ярмо	300-25000	Магнітна сталь
c	Пластикові деталі	30-250	Опорні клини
d	Епоксидна резина	100-3500	Ізоляція котушки
e	Провідники	30-5000	Алюміній або мідь
f	Бруски	20-100	Алюміній або мідь

Конструктивні особливості трансформаторів TRIHAL.

Якщо розглядати перетворювач більш детально, можна помітити декілька цікавих інженерних рішень, що були використані при його розробці.

Пожежобезпечність: завдяки використанню тригідрату алюмінію в епоксидній ізоляції, трансформатор має високі вогнезахисні властивості.

Низький рівень часткових розрядів: забезпечує тривалий термін служби та надійність.

Відповідність стандартам: IEC 60076-11, IEC 60076-16, CENELEC HD 538-1 S1, HD 464 S1, ГОСТ 11677-85.

Екологічність: відповідає вимогам ISO 14001 щодо охорони навколишнього середовища.

Цей трансформатор ідеально підходить для використання в промислових об'єктах, громадських будівлях, лікарнях та інших місцях, де важлива висока надійність та безпека електропостачання.

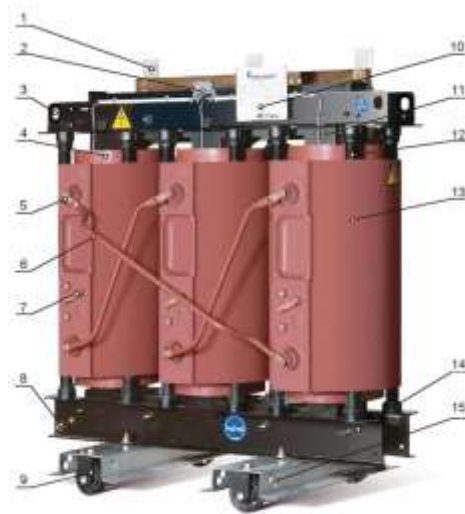


Рис.1.2. Вигляд сухого трансформатора серії Trihal

Сухий трансформатор з литою ізоляцією серії Trihal складається з наступних складових частин:

1 - контактний вивід низької напруги; 2 - пристрій теплового захисту; 3 - стропувальні отвори; 4 - обмотка низької напруги; 5 - контактний вивід високої напруги; 6 - сполучна шина; 7 – відпайки ПБЗ; 8 – контактна площадка заземлення; 9 - транспортні колеса; 10 - табличка електричних характеристик трансформатора; 11 - магнітопровід; 12 - розпірні клини; 13 - обмотка високої напруги; 14 - нижня ярмова балка; 15 - вушка для позовжнього і горизонтального переміщення.

Сухі трансформатори з литої ізоляції серії TRIAL виконуються в двох виконаннях.

– Відкрите виконання (без захисного корпусу, IP00 ступінь захисту):

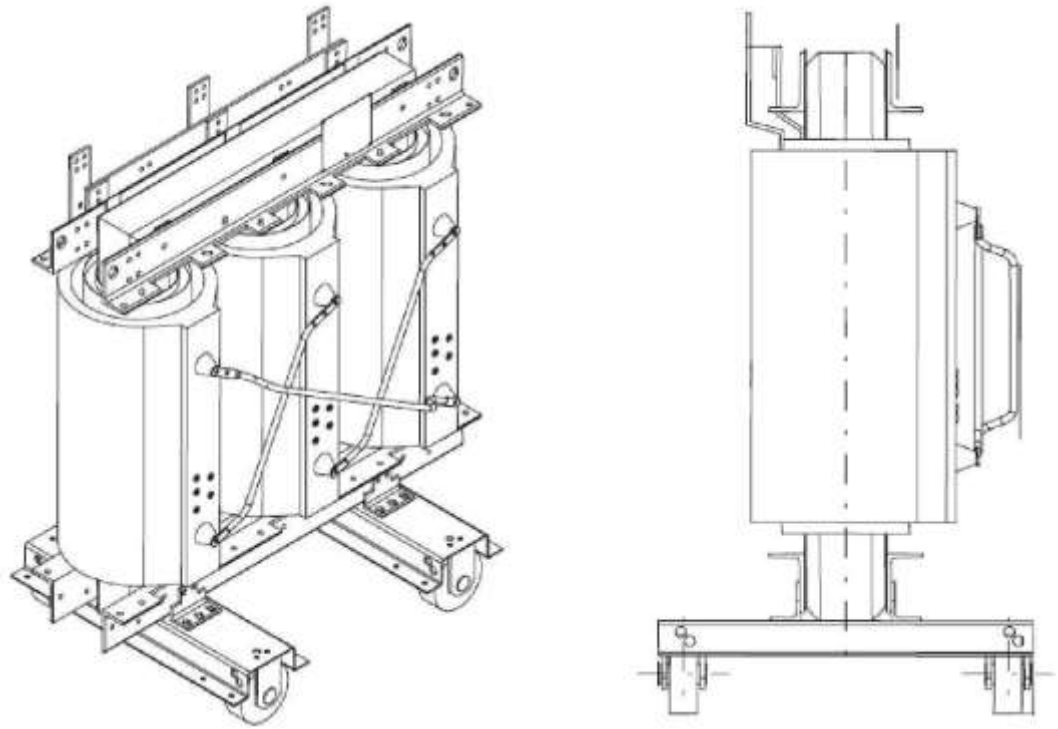


Рис. 1.3. Відкрите виконання

– У захищеному виконанні (в металевому корпусі, ступінь захисту IP31):

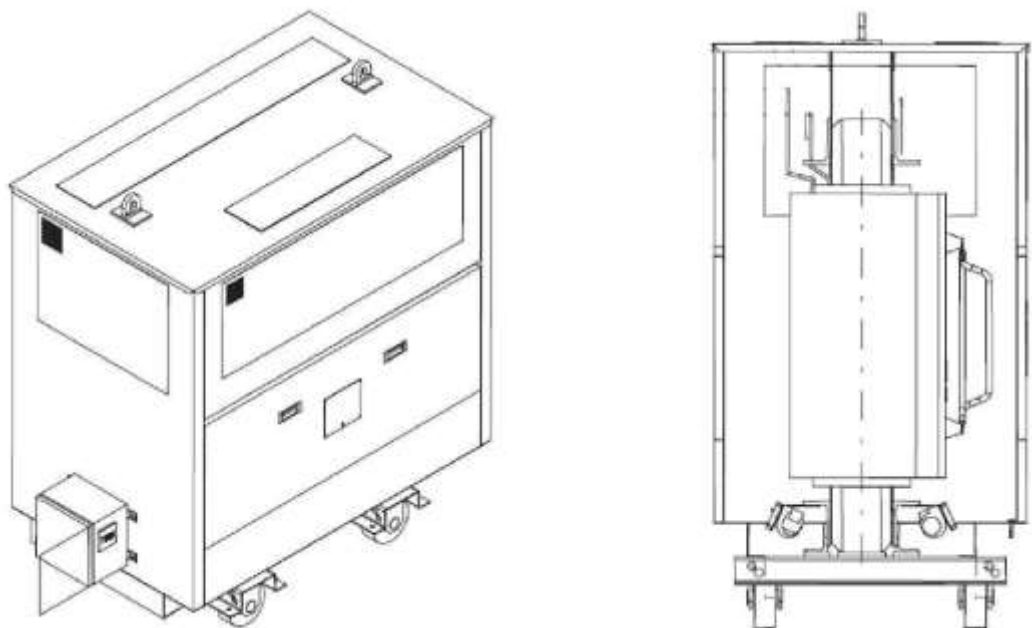


Рис. 1.4. Відкрите виконання

Магнітопровід трансформатора виготовляється за допомогою технології Step Lap з листів холоднокатаної сталі, що містить кремній, ізольовану мінеральними окисами. Для підвищення стійкості до агресивних виробничих

середовищ і складних умов експлуатації, магнітопровід покривається шаром епоксидної смоли.

Обмотка низької напруги, виготовлена з алюмінієвої або мідної стрічки (фольгу), що гарантує механічну міцність обмоток при температурних деформаціях і струмів короткого замикання. Це дозволяє зменшити втрату вихрових струмів на порядок в порівнянні зі звичайними обмотками. Технологія просочування і полімеризації ізоляційним матеріалом класа F забезпечує стійкість до агресивних середовищ і високу електричну міцність. Ця технологія спрощує конструкцію котушок, знижує їх загальний об'єм і збільшує частоту наповнення вікна магнітної системи. У той же час, листові форми намотування покращує тепловіддачу і сприяє зниженню температури найбільш нагрітих точок. Обмотки низької напруги мають ізоляцію класу-F (ГОСТ 8865-93).

Обмотки високої напруги виготовляється з емальованого алюмінію або мідного дроту. Обмотка заливається під вакуумом вогнестійким ізоляційним компаундом класа F, забезпечуючи високі діелектричні властивості з виключно низьким рівнем шуму, що має переважний фактор впливу на строк служби ізоляції і її стійкості до перенапруг. Незначна відмінність потенціалів між сусідніми витками дозволяє відмовитися від міжшарової ізоляції, збільшуючи тим самим якість ізоляції трансформатора і зменшуючи його масу і габарити.

До литої ізоляції класу F входить:

- епоксидної смоли необхідної в'язкості на основі біфеноли, що забезпечує якісне просочення обмоток;
- ангідридового затверджувача, що забезпечує високі термічні і механічні характеристики, з добавкою пластифікатора. Добавка надає ізоляції необхідну еластичність, що попереджає розтріскування під час роботи зі змінним навантаженням;
- активного порошкового наповнювача, що складається з кремнезему (двоокис кремнію) і тригідрату алюмінію, ретельно змішаного зі смолою і затверджувачем.

При впливі на трансформатор відкритого полум'я, на поверхні обмоток утворюється відбивальний вогнетривкий екран з глинозему (окис алюмінію), виділяється волога, яка утворює перешкоду з водяної пари. Крім того, хімічна реакція розкладання тригідрату алюмінію супроводжується активним поглинанням енергії, тому температура обмоток підтримується набагато нижче точки займання. В результаті поєднання цих трьох чинників відбувається негайне самогашення трансформатора.

В стрижнях і ярмах магнітопроводу для поліпшення охолодження можуть бути виконані охолоджуючі повітряні канали. Стяжка ярм проводиться ярмовими балками за допомогою розпірних клинів, ізольованих від активної стали магнітопроводу. Магнітопровід електрично з'єднаний з ярмовими балками за допомогою мідних провідників.

Ярмові балки мають електричне з'єднання з заземлюючими зажимами, розташованими в нижній частині трансформатора.

Трансформатор має гладкі переставні катки для його переміщення в поздовжньому і поперечному напрямках. Для переміщення трансформатора ролики повинні бути зорієнтовані в напрямку руху.

На верхніх ярмових балках трансформатора передбачені отвори або вушка для його підйому. Пресовка обмоток трансформатора здійснюється за допомогою еластичних розпірок. Контактні виводи виконані з міді або алюмінію і закріплені на остові трансформатора за допомогою косинців, скоб, ізоляційних планок, опорних ізоляторів.

Кожух трансформатора, виготовлений в захищеному виконанні, виконаний з сталевого каркаса, до якого кріпляться стінки, дах і дно. Стінки кожуха мають вентиляційні отвори. Кожух трансформатора виконаний зі змінними панелями для технічного обслуговування трансформатора.

На стороні високої напруги обмотки мають регульовальні відгалуження, з'єднання яких здійснюється при знятій напрузі.

Трансформатор має пристрій контролю температури з температурними датчиками. Він являє собою захисний пристрій трирівневої дії з по-фазним контролем і функцією автоматичного управління вентиляторами. Пристрій

контролю температури, при перевищенні номінальної температури, подає сигнал на включення вентилятора, сигнал тривоги або сигнал на вимикання трансформатора, відповідно до уставки пристрою. До пристрою підключаються три температурних датчика, ланцюги, яких безперервно контролюються на відсутність обриву і короткого замикання, запобігаючи, таким чином, помилкове спрацьовування.

Для підвищення потужності трансформатора при короткочасних перевантаженнях, трансформатор [4] на замовлення комплектується вентиляторами поперечно-проточного охолодження, які монтуються по обидва боки трансформатора в нижній частині обмоток трансформатора.

Вентилятори автоматично управляються пристроєм для контролю температури і не призначені для тривалого режиму роботи.

Технічні характеристики трансформатору TRIHAL TRI040010643549800

Таблиця 3

Назва параметру	Значення параметру
Серія	Trihal
Тип трансформатору	Сухий трансформатор
Тип струму	Змінний
Максимальна дистанція	< 1000 м
Режим охолодження	Повітряний, без примусової вентиляції
Матеріал обмотки	Алюміній
Ізоляція	Літа ізоляція (ВН) Просочена (НН)
Ступінь захисту	IP00
Кількість фаз	3 фази
Номінальна потужність	400 кВА
Номінальна частота	50 Гц
Номінальна напруга обмотки ВН	10 кВ

Напруга холостого ходу обмотки НН	400 В
Розрахункова напруга	Обмотка ВН: 38 кВ Обмотка НН: 10 кВ
Максимальна напруга грозового імпульсу	95 кВ для обмотки ВН
Схема і група з'єднання	$\Delta/Y_n - 11$
Діапазон регулювання	$\pm 2 \times 2,5\%$
Напруга короткого замикання	6 %
Втрати холостого ходу	1000 Вт
Втрати при навантаженні при: 75 °С 120 °С	4530 Вт при 75С 5200 Вт при 120С
Клас теплостійкості	F
Рівень шуму	56 дБ на відстані 1 м
Захисне реле	РТС реле
Висота	1445 мм
Ширина	795 мм
Довжина	1263 мм
Загальна вага	1225 кг

1.4 Аналіз втрат трифазних силових трансформаторах до 400кВА.

1.4.1 Фізичні явища та їх природа в трансформаторах до 400 кВА

Фізичні процеси Під У трансформаторах до 400 кВА під дією прикладеної напруги в обмотках, відведеннях та вводах виникають струми, які мають не лише номінальні значення, але й можуть включати аварійні струми, зокрема, струми включення та короткого замикання. Просторовий розподіл цих струмів збуджує змінне тривимірне

ферромагнітних електромагнітне поле, яке, в свою чергу, призводить до додаткових втрат на перемагнічування в провідниках та ферромагнітних сталях. Нерівномірний розподіл магнітного поля внаслідок недосконалого розташування паралельних частин обмоток спричиняє циркуляційні струми, що також ведуть до додаткових втрат енергії.

Виникнення електромагнітних сил у провідниках та відведеннях трансформатора спричиняє електродинамічні ефекти, які через механічну інерцію проявляються в механічних коливаннях і вібраціях. Всі ці втрати активної енергії виділяються у вигляді тепла, яке необхідно відводити для забезпечення нормальної роботи трансформатора. Для цього використовуються елементи як внутрішнього, так і зовнішнього охолодження. Масляне охолодження, наприклад, забезпечує теплообмін завдяки руху трансформаторного масла. Тривалі підвищені температури можуть прискорити старіння ізоляції, що впливає на довговічність роботи трансформатора.

Також важливо враховувати явища магнітострижкції, які виникають через зміни магнітного потоку, що можуть супроводжуватись вібраціями обмоток, викликаючи шум в обладнанні. У реакторах з проміжками в стрижнях виникають додаткові вібрації через сили електромагнітної взаємодії між вставками та прилеглими частинами, що теж впливає на ефективність роботи трансформатора.

Ще однією важливою проблемою є електрична міцність трансформаторів, яка визначається розподілом електричного поля в головній і подовжній ізоляції обмоток. Трансформатори під час експлуатації піддаються різноманітним механічним впливам, тому потрібно проводити оцінку міцності їх частин, а також сейсмо- та вібростійкості конструкцій.

Втрати в провідниках та магнітних матеріалах

Втрати енергії в провідниках трансформаторів включають омічні втрати, втрати на вихрові струми та втрати від циркуляційних струмів. Омічні

Втрати можна розрахувати за допомогою питомого опору матеріалу, довжини провідника та його перерізу. В провідниках, під впливом зовнішнього магнітного поля (наприклад, в обмотках трансформатора), виникають вихрові струми, що спричиняють додаткові втрати.

Втрати в електротехнічній сталі трансформатора розраховуються через множення маси сталі на питомі втрати, з урахуванням коефіцієнтів, які коригують вплив відхилень магнітного потоку і технологічних характеристик матеріалу. Для чисельного моделювання необхідно враховувати характеристики намагнічування електротехнічної сталі, як в напрямку прокатування, так і поперек цього напрямку.

Втрати в елементах конструкції з немагнітної сталі

При розробці потужних трансформаторів та електричних реакторів часто використовують немагнітні сталі для виготовлення певних елементів конструкції, таких як підйомні пластини стрижня, вертикальні стінки ярмових балок тощо. Немагнітні сталі мають низьку магнітну проникність і значно вищий електричний опір порівняно з феромагнітними сталями.

В процесі чисельного моделювання, якщо відомий розподіл вихрових струмів та напруженості електричного поля, питомі втрати можна визначити як добуток щільності струму та напруженості поля. В деяких випадках елементи з немагнітної сталі можна розглядати як нескінченно тонкі, де поверхневі втрати визначаються через поверхневу щільність струму.

1.4.2 Визначення втрат трансформатора до 400кВА

В цілому, всі ці втрати можна звести до проведення двох основних досліджень: дослід холостого ходу і дослід короткого замикання [9].

При досліді холостого ходу трансформатора його вторинна обмотка розімкнута, тому струм в цій обмотці відсутній. Якщо первинну обмотку під'єднати в мережу джерела електричної енергії змінного струму, то в цій обмотці буде протікати струм холостого ходу I_0 . У порівнянні з номінальним

струмом трансформатора, цей струм дуже малий. Ці втрати поділяються на втрати холостого ходу та втрати короткого замикання (в обмотках), а також додаткові втрати, що виникають у конструктивних елементах. Їх оцінка є необхідною як на етапі проектування, так і в процесі експлуатації.

Втрати в сталі трансформатора, або втрати холостого ходу, виникають при подачі напруги на первинну обмотку за відсутності навантаження. Основними джерелами цих втрат є гістерезисні втрати та втрати на вихрові струми, що виникають в осерді з електротехнічної сталі. Величина втрат у сталі залежить від частоти живлення, індукції намагнічування, якості сталі, товщини листів і напрямку прокатки відносно силових ліній магнітного поля. Для їх розрахунку використовують питомі втрати сталі, що множаться на масу осердя та коригуються коефіцієнтами, які враховують відхилення магнітного потоку від напрямку прокатки та технологічні особливості виготовлення трансформатора.

Втрати в обмотках, або втрати короткого замикання, виникають унаслідок проходження струму навантаження через провідники. Основу цих втрат становлять омичні втрати, які залежать від квадрату струму, питомого опору матеріалу провідника, його довжини та перерізу. Однак насправді втрати в обмотках значно складніші: змінне магнітне поле викликає в товщі провідників вихрові струми, які створюють нерівномірний розподіл струму по перерізу і додаткові втрати енергії. Крім того, при паралельному з'єднанні витків можуть виникати циркуляційні струми внаслідок неоднакового магнітного поля, що також супроводжується додатковими втратами. При масляному охолодженні додаткові втрати можуть виникати в системі теплообміну — наприклад, в насосах або вентиляторах (якщо вони є). Проте в трансформаторах до 400 кВА, як правило, використовуються пасивні системи охолодження, тому ці втрати незначні, але тепловий

режим роботи залишається критичним параметром. Перегрів обмоток або осердя може призвести до старіння або пошкодження ізоляції, що знижує надійність і термін служби трансформатора.

Сумарні втрати потужності в трансформаторі визначаються як сума втрат у сталі, втрат в обмотках і додаткових втрат. Вони залежать як від конструкції трансформатора, так і від умов його роботи. Зазвичай для їх оцінки використовують спрощене рівняння:

$$P_{вт} = P_{ст} + P_{ом} + P_{дод},$$

де $P_{ст}$ — втрати в сталі (при холостому ході),

$P_{ом}$ — омічні втрати в обмотках (при навантаженні),

$P_{дод}$ — додаткові втрати в конструктивних елементах.

Особливістю трансформаторів потужністю до 400 кВА є те, що відносна частка втрат у сталі є досить високою через менший ККД у порівнянні з трансформаторами великої потужності. Також простота конструкції і відсутність активного охолодження вимагають особливої уваги до якісного тепловідведення та вибору матеріалів з низькими питомими втратами.

1.5 Числові методи розрахунку

Моделювання електромагнітних полів трансформатора – важка задача через наявність складної геометричної структури і великої комбінації наявних типів матеріалів. Для розрахунку розподілу електромагнітних полів, сформованих в його магнітній частині, треба розглянути не тільки головний магнітний потік, але також і потоки розсіювання. Багато факторів, таких як тип обмотки і властивості магнітопроводу повинні бути ретельно розглянуті і прийняті до уваги в процесі моделювання. Особливу увагу потрібно приділити джерелам втрат в трансформаторі і розробці рішень по їх подальшому скороченню. В зв'язку з чим розуміння електромагнітних явищ в силових трансформаторах є головним моментом для подальшого прогресу в цій області.

Аналітичний розв'язок цих задач доволі складний, тому фахівці змушені вдаватися до числових (наближених) методів розрахунку.

для кожного елемента визначається свій поліном, але його коефіцієнти підбираються так, щоб зберігалася неперервність величини на кожному кордоні елемента.

Області застосування МСЕ

В даний час МСЕ отримав глибокі теоретичні обґрунтування і застосовується для вирішення широкого кола завдань, наприклад:

- стаціонарні задачі поширення тепла, дифузії, розподілу електричного поля, інші задачі теорії поля;
- завдання гідромеханіки, зокрема, протягом рідини в пористому середовищі;
- завдання механіки і міцності, в т.ч. проектування літаків, ракет і різних просторових оболонок;
- та ін.

Використання МСЕ зменшило час, за який продукт виробництва проходив від ідеї до реалізації. До переваг МСЕ можна віднести покращення конструкції та можливість миттєво бачити критичні параметри, створення прототипів, зменшення матеріаловкладень на прототипи, пришвидшення та здешевлення проектування, збільшення продуктивності.

1.5.2 Використання скінченноелементного аналізу

Особливості використання МСЕ

1) Необхідність враховувати збіжність методу скінченних елементів [

Теоретична збіжність розв'язку до точного визначається похибками методу. Важливою характеристикою є також швидкість збіжності. Якщо швидкість збіжності висока, то хороші результати можна одержати на достатньо грубій сітці

2) Необхідність враховувати наявність похибок

Похибки математичної моделі МСЕ (похибки методу) виникають внаслідок апроксимації розшукуваних функцій наближеними виразами. У МСЕ функції апроксимації (координатні функції) є локально визначеними, і тому похибки методу залежать як від якісної відповідності координатних функцій

розшукуваного розв'язку, так і від розмірів елементів. Якість координатних функцій оцінюється за повнотою координатних функцій і виконанням умов сумісності для сусідніх скінченних елементів на їх спільних границях. Для МСЕ у варіанті методу переміщень доведено, що при зменшенні кроку сітки в області, зайнятій тілом, збіжність розв'язку МСЕ до точного можна гарантувати тільки у тому випадку, якщо набір координатних функцій буде повним, а самі вони забезпечують виконання умов сумісності для суміжних скінченних елементів.

Розв'язок МСЕ збігається до точного, якщо виконуються такі умови:

– На спільних границях суміжних елементів координатні функції повинні забезпечувати неперервність функції переміщень і усіх її похідних, порядок яких хоча б на одиницю менше порядку старших похідних, які входять у варіаційне рівняння задачі. Цією умовою встановлюються необхідні вимоги до гладкості координатних функцій у відповідності з принципом можливих переміщень.

- Координатні функції повинні забезпечувати як переміщення елемента як твердого тіла, так і сталу по об'єму деформацію. Стала частина деформації є основним компонентом поля деформацій, – при зменшенні розмірів елементів змінна частина деформації (тобто залежна від координат) у межах елемента зменшується порівняно із сталою складовою. Ця умова відображає властивість координатних функцій створювати повну систему функцій. Умову повноти системи функцій задовольняють, зокрема, функції у вигляді повних поліномів відповідного степеня.

- Ще однією умовою збіжності є умова геометричної апроксимації змінної на елементі при ортогональних перетвореннях системи координат. Геометрична інваріантність або геометрична ізотропія є гарантією повноти поліноміальної апроксимації вздовж границь скінченного елемента того ж порядку, що й у самому елементі.

Програмне забезпечення.

CAE — англomовна абрeвіатура, яка дослівно означає Computer-Aided Engineering. Так прийнято називати софт, що вирішує різні інженерно-технічні задачі (аналіз, розрахунки, симуляції різноманітних фізичних процесів тощо).

CAE-системи майже нерозривно пов'язані з CAD, оскільки оцінка міцності або динамічний аналіз є частиною більш загального циклу проектування, конструювання виробів. Часто вони інтегровані один в одного, на рівні інтерфейсу користувача. Революційне значення CAE для сучасної техніки та інженерії полягає в тому, що CAE-софт перевіряє працездатність виробу або конструкції без істотних витрат часу і коштів на натурні випробування, тому що програма на основі методу скінченних елементів дозволяє оцінити поведінку комп'ютерної моделі в умовах, близьких до реальних.

1.6 Висновки до розділу 1

У першому розділі проаналізовано типи втрат у трифазних трансформаторах, включаючи втрати в сталі, в обмотках, додаткові втрати та їх залежність від робочих режимів. Також висвітлено конструктивні особливості трансформаторів серії Trihal та розглянуто чисельні методи аналізу, зокрема метод скінченних елементів, як найбільш ефективний для моделювання електромагнітних процесів.

РОЗДІЛ 2

В рамках даного магістерського проекту, буде побудована розрахункова модель трифазного силового трансформатора в програмному середовищі COMSOL Multiphysics

Програмне забезпечення пакета COMSOL призначене для моделювання будь-яких фізичних систем. COMSOL Multiphysics включає в себе графічний інтерфейс (GUI) COMSOL Desktop і набір попередньо сконфігурованих призначених для користувача інтерфейсів і інструментів, які призначені для стандартних завдань моделювання. Додаткові модулі розширюють можливості платформи, забезпечуючи моделювання в специфічних областях і інтеграцію з програмними пакетами сторонніх розробників. Модулі доповнюють базові фізичні інтерфейси пакету COMSOL Multiphysics, що дозволяє моделювати складні електричні, механічні, гідродинамічні і хімічні явища. Для вирішення складних мультифізичних завдань можна комбінувати будь-яку кількість модулів. До складу пакета COMSOL Multiphysics також входить середовище розробки додатків, за допомогою якої можна створювати зручні інтерфейси, які зроблять математичне моделювання доступним всім зацікавленим особам.

Тривимірною моделлю геометричної конфігурації створюється за допомогою інструментів САПР COMSOL Multiphysics. Усі розміри трансформатора визначаються параметрами, які були підставлені відповідно до реального об'єкта дослідження. Створення оптимальної сітки з кінцевими елементами покращується деякими модифікаціями геометричної моделі. Формування магнітного поля модуля змінного та постійного струму COMSOL Multiphysics вибрано в частотній області аналізу трансформатора.

Мета побудови моделі

Створення ефективної моделі, здатної відобразити всі основні процеси, що впливають на втрати в трансформаторі, що дозволить здійснювати більш ефективне використання ресурсів і їх контроль, що дозволить оптимізувати і покращити його показники за рахунок змін чи модернізацій конструкцій його частин.

Для цього буде проведено ряд симуляцій над побудованою моделлю для отримання як електричних, так і магнітних параметрів змодельованого силового трансформатора.

2.1 Загальні відомості

За основу моделі ми взяли сухий трансформатор серії Trihal. Так як розрахунок моделі вимагає значних обчислювальних потужностей, модель було змінено з метою спрощення розрахунків для обчислювального пристрою та створення більш легких умов для аналізу процесів, що виникають в подібного роду системах. Звичайно, таке спрощення не відмінняє всіх тих факторів, що необхідно врахувати для дослідження втрат для реального обладнання.

Основні параметри, на яких була побудована модель:

- Трифазний трансформатор;
- Номінальна потужність 400 кВА;
- Номінальна напруга обмотки ВН – 10 кВ;
- Напруга холостого ходу обмотки НН – 400 В;
- Схема і група з'єднання – $\Delta/Y_n - 11$;
- 6 первинної котушки
ВН $N_p = 693$
- 6 вторинні котушки
НН $N_s = 32$

Модель трансформатора зроблена в тривимірному просторі програмного середовища COMSOL Multiphysics. Модель була побудована відповідно до геометрії реального трансформатора. База матеріалів для всіх частин моделі була призначена відповідно до матеріалів, з яких вони виготовляються. Для обмоток ми задалися кількістю витків та площею поперечного перерізу. Зовнішній вигляд побудованої моделі представлено на рис. 2.1.

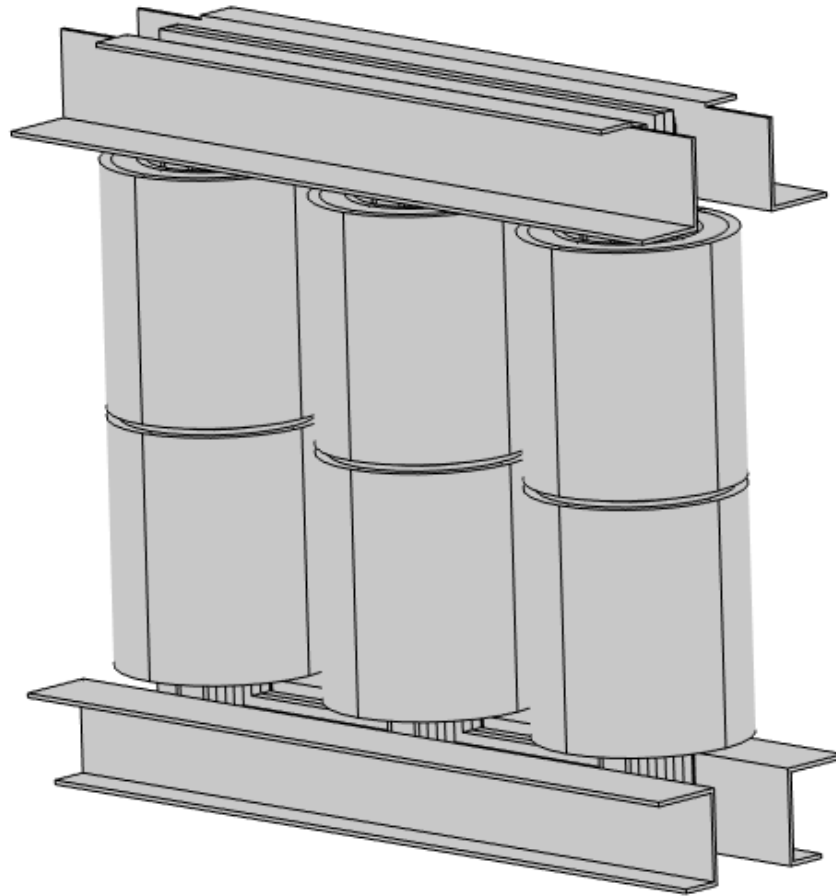


Рис. 2.1 Модель трифазного силового трансформатора.

2.2 CAD модель і дискретизація.

Повна модель трансформатора визначається за допомогою параметрів. Це спрощує створення геометричної моделі та дозволяє проводити такі зміни розмірів, які можна використовувати для дослідження їх параметрів або оптимізації трансформатора. Оточуюче середовище, яке представляє собою повітря, створюються за допомогою блока. Котушки зібрані блочними та циліндровими сегментами. Отримана геометрична модель показана на рис. 2.2

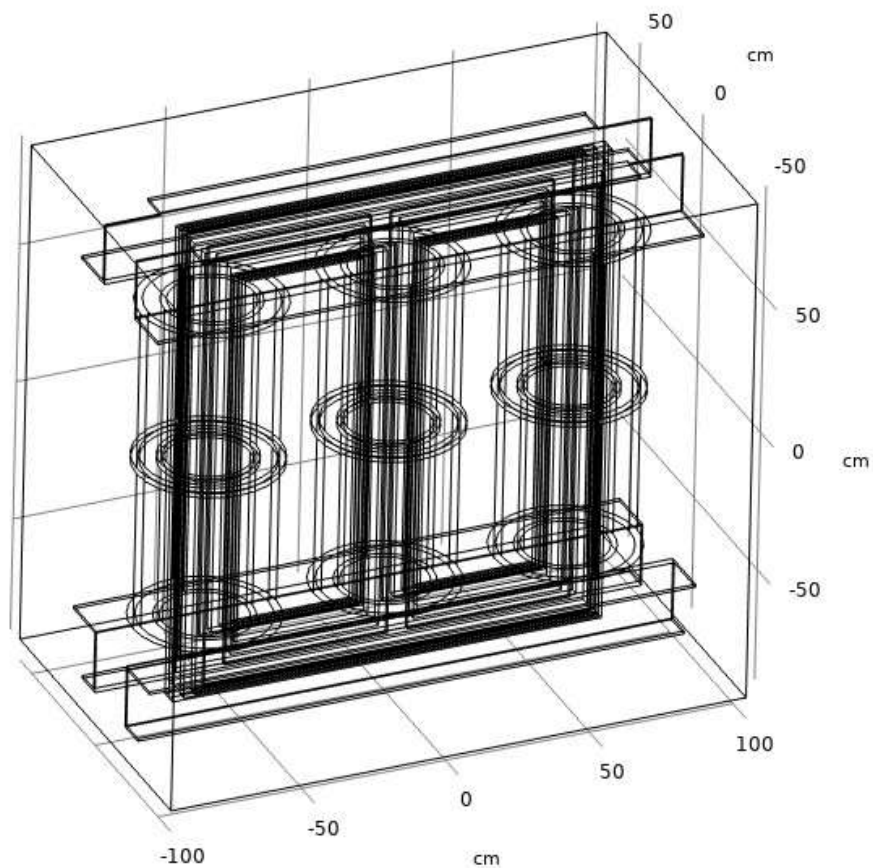


Рис. 2.2. Геометрична модель трансформатора

Сітка кінцевих елементів створюється в COMSOL Multiphysics на основі цієї параметризованої геометричної моделі. Розміри елементів були ретельно відрегульовані для отримання точних результатів, а також прийнятних обчислювальних витрат.

COMSOL Multiphysics підтримує автоматичну генерацію сітки із заданим рівнем розміру елементів. Крім того, розмір елементів та інші параметри можна вручну визначити для необхідних доменів та ребер.

При створенні сітки було зроблено ряд кроків щодо поліпшення якості отриманого аналітичного матеріалу. По-перше, розмір елементів осердя, яке є найбільш значущою частиною цього дослідження, було дискретизовано в режимі «fine». Тоді для повітряного прошарку між осердями та котушками було обрано нормальний розмір елементів. Котушки також були побудовані з нормальним розміром елементів. Нарешті, навколишнє повітря було переплетене з грубими елементами.

Отримана сітка має задовільну якість для цього дослідження (рис. 2.3, рис 2.4).

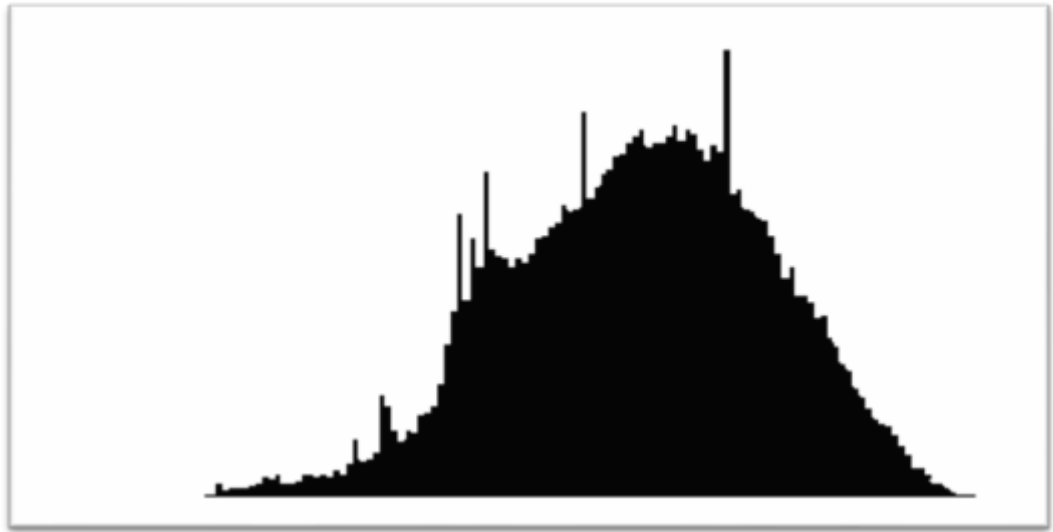


Рис. 2.3. Діаграма розподілу якості МСЕ сітки для побудованої моделі

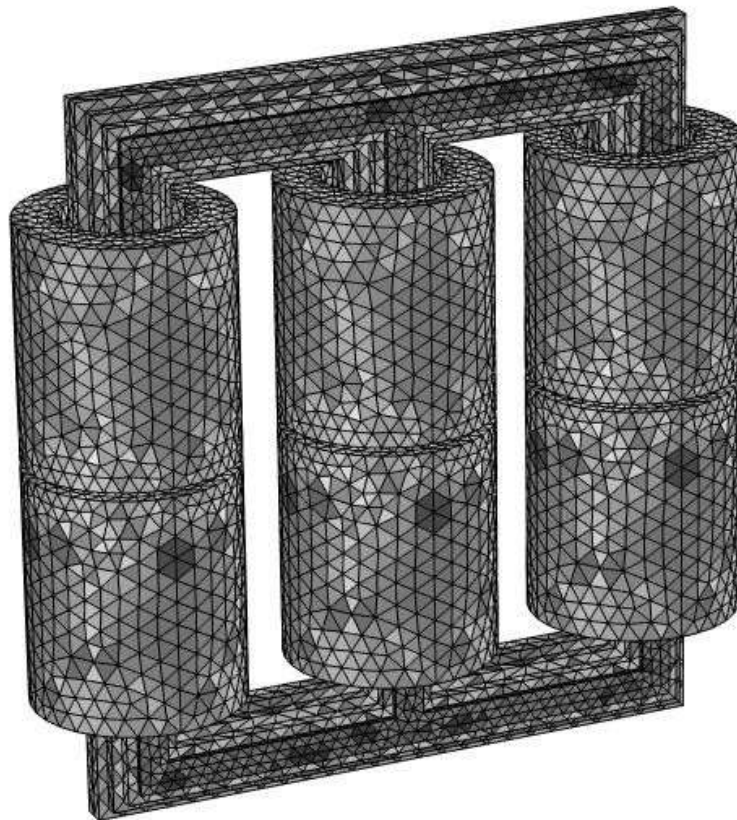


Рис. 2.4. Розмітка сітки базових елементів трансформатора

2.3 Фізична модель

Модель для тривимірного рішення магнітних полів з електричними струмами модуля AC/DC попередньо визначена. Далі, була визначена лінійна система рівнянь для магнітного векторного потенціалу \mathbf{A} . Властивості повітряної області та котушок задані так, що: $\epsilon r = 1$, $\mu r = 1$, і $\kappa = 0$. ϵr – відносна електрична проникність, μr – відносна магнітна проникність та κ електропровідність. Заздалегідь визначений матеріал у вигляді магнітом'якої сталі (без втрат) вибирається для залізного осердя. Гранична умова на поверхні повітряної області визначається як, $\mathbf{n} \times \mathbf{A}$. Конституційне відношення в залізному сердечнику встановлено на $|\mathbf{H}| = f(|\mathbf{B}|)$. Для магнітом'якої сталі було використана така $H B$ -крива (рис. 2.5).



Рис. 2.5.

Наступним кроком є призначення матеріалів для нашої моделі:

- Обмотка: Мідь;
- Магнітопровід: Електротехнічна сталь;
- Проникність:

- Реальна частина: Ефективна ВН крива (рис. 2.5)
- Уявна частина: $\mu'' = 30$
- Провдність: $\sigma = 0$ [S/m]
- Коефіцієнт Штайметца: $k = 100, a=1, b=1.6$
- Рівняння Steinmetz (Вікіпедія): $P=k \cdot f^a \cdot B^b$
- Густина втрат* [kW/m³]: 9.4 (гістерезис) + 1.55 (вихрові струми)
 - Опорні конструкції: конструкційна сталь, змодельована як лінійний матеріал використовуючи “impedance boundary condition”
 - Відносна проникність $\mu_r = 50$
 - Електропровідність $\sigma = 1.12e7$ [S/m]

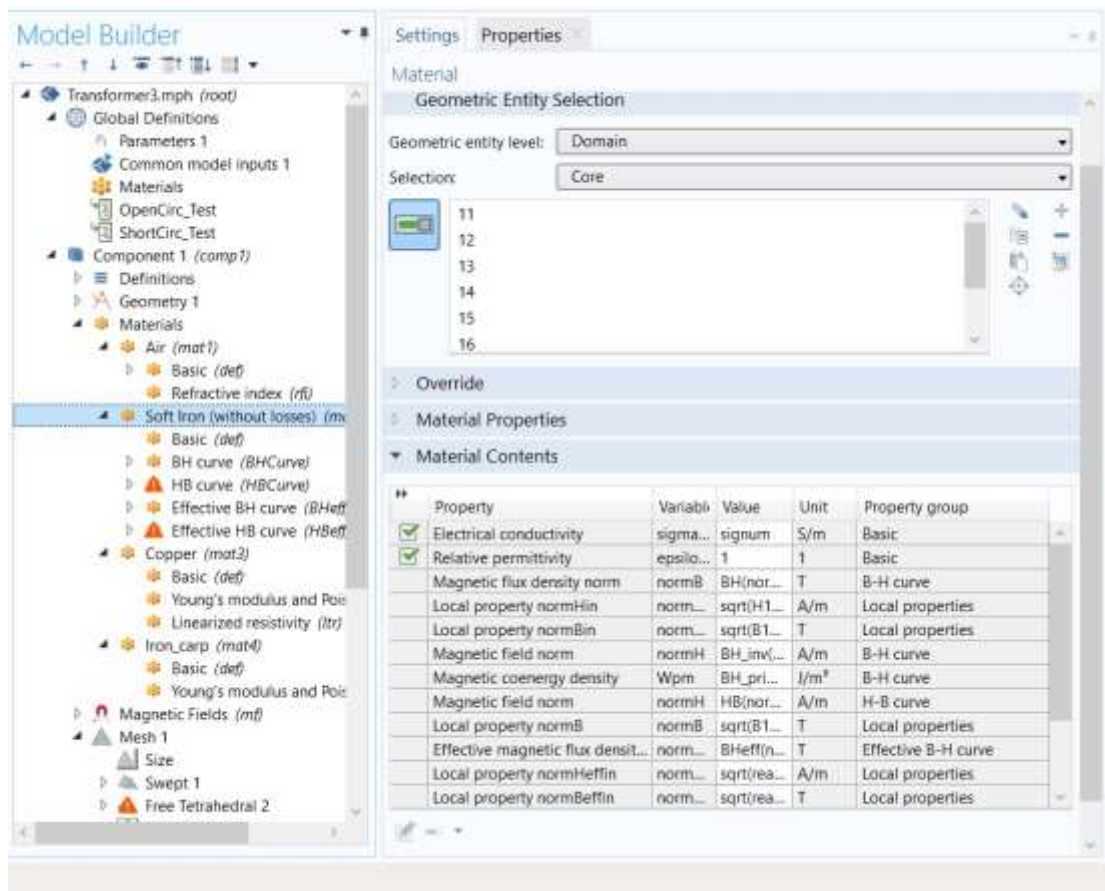


Рис. 2.6 Вікно налаштувань програмного забезпечення Comsol

Фізичні налаштування:

- Дослід холостого ходу (х.х) – 3D
 - Осердя: Ефективна проникність + магнітні втрати;
 - Котушки: багатовиткові;

- Первинна обмотка: Номінальна фазна напруга ($V_{Coil} = V_{1n_f_PP}$)
- Вторинна обмотка: open circuit ($I_{Coil} = 0$)
- Дослід короткого замикання (к.з) – 3D і 2Daxi
 - Магніторвід: Відносна проникність (конструкційна сталь)
 - Первинна котушка: Номінальний струм ($I_{Coil} = I_{1n_f_PP}$)
 - Вторинна котушка: Струм короткого замикання ($V_{Coil} = 0$)
 - Котушки, 3D: Багатовиткове виконання.
 - Каркас, 3D: Impedance BC

2.4 Математичний апарат САЕ.

Різноманітність електроенергетичного устаткування створює певні перепони для створення єдиної універсальної математичної моделі, яка б однакової мірі була б придатна для моделювання та аналізу електромагнітного поля всього електротехнічного обладнання. Задача побудови такої математичної моделі, яка б з певною точністю була б адекватна фізичним явищам, що мають місце при роботі устаткування, створює певні складності.

Рівняння Максвелла – це такий набір рівнянь, записаних у диференційній або інтегральній формі, що визначають взаємозв'язки між основними електромагнітними величинами. Ці величини:

- Електрична напруженість поля E ;
- Електрична індукція D ;
- Магнітна напруженість поля H ;
- Магнітна індукція B ;
- Густина струму J ;
- Густина електричного заряду ρ .

Рівняння можуть бути сформульовані в диференційній формі або інтегральній формі. Тут представлена диференціальна форма, оскільки вона призводить до диференціальних рівнянь, з якими може працювати метод кінцевих елементів.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.4)$$

Перші два рівняння також називаються законом Максвелла-Ампера та законом Фарадея відповідно. Наступні два - це дві форми закону Гауса: електрична та магнітна форми відповідно.

Інше фундаментальне рівняння аступності:

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.5)$$

Система рівнянь Максвелла повністю описують всі електромагнітні явища, що мають місце при роботі електротехнічного обладнання.

Матеріальні співвідношення

Для отримання закритої системи, рівняння повинні включати матеріальні співвідношення, що описують макроскопічні властивості середовища. Це такі рівняння як:

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.6)$$

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.7)$$

$$J = \sigma E \quad (2.8)$$

Де ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму; μ_0 – магнітна проникність вакууму і σ – електрична провідність середовища.

В системі одиниць СІ, магнітна проникність вакууму є константною величиною, що має приблизне значення $4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А². Швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі, яке також для однорідного

середовища має константне значення, позначається як ϵ_0 , а діелектрична проникність вакууму обчислюється з виразу:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c_0^2 \mu_0} = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \quad (2.9)$$

Електромагнітні константи ϵ_0 , μ_0 , і c попередньо задані в COMSOL Multiphysics як фізичні константи.

Вектор електричної поляризації P описує як матеріал поляризовано під дією зовнішнього електричного поля E . Інакше кажучи, його можна охарактеризувати як густина електричних дипольних моментів в одиниці об'єму, тобто є функцією від E . Деякі матеріали можуть мати ненульове значення P , навіть при відсутності зовнішнього електричного поля.

Вектор намагніченості M схожим чином описує як матеріал намагнічено в зовнішньому магнітному полі H . Його можна охарактеризувати як густину магнітних дипольних моментів M , тобто є функцією від H . Звичайно, постійні магніти мають ненульовий M .

Лінійна поляризація означає, що поляризація прямо пропорційна до електричного поля:

$$P = \epsilon_0 \chi_e E \quad (2.10)$$

де χ_e – діелектрична сприйнятливості середовища.

Схожим чином, для лінійних матеріалів, намагніченість прямопропорційний до магнітного поля:

$$M = \chi_m H \quad (2.11)$$

де χ_m – магнітна сприйнятливості середовища.

Для таких середовищ матеріальні співвідношення:

$$D = \epsilon_0 (1 + \chi_e) E = \epsilon_0 \epsilon_r E = \epsilon E \quad (2.12)$$

$$B = \mu_0 (1 + \chi_m) H = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (2.13)$$

Звичайно, ці величини є скалярами, проте в деяких випадках їх можна представити як тензори розмірністю 3 на 3, коли це анізотропний матеріал.

Властивості ϵ і μ (без індексу) діелектрична і магнітна проникність матеріалу відповідно.

Для нелінійних матеріалів використовується узагальнена форма для матеріальних співвідношень. Для електричних полів використовується співвідношення.

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E + D_r, \quad (2.14)$$

де D_r – залишкове електричне зміщення, що має місце при відсутності електричного поля.

Для магнітних полів використовується така узагальнена форма для матеріальних співвідношень:

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_r \quad (2.15)$$

де B_r – залишкова щільність магнітного потоку при відсутності магнітного поля.

Деяким матеріалам присуще нелінійне співвідношення між B і H таке, що:

$$B = f(|H|) \quad (2.16)$$

2.5 Початкові і граничні умови

Рівняння Максвелл допускають безліч розв'язків, тому для однозначного визначення електромагнітного поля в кожному конкретному випадку необхідно, щоб поле задовольняло певним додатковим умовам, що відображають фізичну суть тієї чи іншої задачі, що розглядається. Тому, граничні умови повинні бути визначені. До них відносять граничні умови на поверхні, що розділяє середовища з різними властивостями, їх можна виразити математично як:

$$n_2 \times (E_1 - E_2) = 0 \quad (2.17)$$

$$n_2 \cdot (D_1 - D_2) = \rho_s \quad (2.18)$$

$$n_2 \times (H_1 - H_2) = J_s \quad (2.19)$$

$$n_2 \cdot (B_1 - B_2) = 0 \quad (2.20)$$

де ρ_s і J_s позначають щільність поверхневого заряду і щільність поверхневого струму відповідно, індекси 1 і 2 відносяться до середовища з різними електрофізичними характеристиками, а n – орт нормалі.

Котушки з багатовитковими обмотками.

Обрахунок параметрів модельованих котушок здійснюється на базі таких припущень.

Щільність струму для заданого напрямку визначено згідно рівнянь 2.21 і 2.22.

$$J_e = \frac{N(V_{coil} - V_{ind})}{AR_{coil}} \quad (2.21)$$

де V_{coil} – задана напруга обмотки, A – загальна площа поперечного перерізу для котушки, N – кількість витків обмотки, R_{coil} – опір котушки, що обраховується за виразом:

$$R_{coil} = \int \frac{NL}{\sigma_{coil} a_{coil} A} \quad (2.22)$$

де L – довжина котушки для тривимірної моделі; $\sigma_{coil} a_{coil}$ – добуток провідності проводу на прощу поперечного перерізу; V_{ind} – індукована напруга, що визначена шляхом інтегрування електричного поля по котушці.

2.6 Висновки до розділу 2

У другому розділі було розроблено математичну модель трифазного трансформатора в середовищі COMSOL Multiphysics. Побудована CAD-модель враховувала геометрію, матеріальні характеристики, граничні умови та параметри електромагнітних властивостей.

Було здійснено дискретизацію моделі за методом скінченних елементів, сформовано якісну сітку, що дозволяє адекватно описати розподіл магнітного поля, густини струму та електричних втрат у структурних елементах трансформатора. Застосування параметризації спростило зміну конфігурацій у процесі моделювання.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЙОГО РЕЗУЛЬТАТИ

3.1 Залежні і незалежні параметри моделі.

Попередньо обрахуємо основні електричні величини трансформатора, ці дані будуть у подальшому використовуватись для розрахунку моделі.

Потужність однієї фази трансформатора визначається за формулою:

$$S_{\phi} = \frac{S}{m} = \frac{400000}{3} = 133333 \text{ Вт} \quad (3.1)$$

де S - номінальна потужність трансформатора, m - число фаз.

Номінальні струми:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (3.2)$$

де S - потужність трансформатора, кВА; U - номінальна лінійна напруга відповідної обмотки, В

Розрахунковий струм на стороні високої напруги трансформатора:

$$I_1 = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 23,09 \text{ А} \quad (3.3)$$

Розрахунковий струм на стороні низької напруги трансформатора:

$$I_2 = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 577,35 \text{ А} \quad (3.4)$$

Скористаємося вбудованим функціоналом програмного забезпечення COMSOL Multiphysics і визначимо ці величини як глобальні параметри. Значення та їх вирази представлені у таблиці 4.

Параметри, визначені як глобальні

Таблиця 4

Змінна	Вираз	Одиниця виміру	Додаток
Sn	400[kV*A]	W	Номінальна потужність трансформатора
V1n_c_RMS	10[kV]	V	Номінальна напруга ВН
V2n_c_RMS	400[V]	V	Номінальна напруга НН
I1n_l_RMS	$Sn/V1n_c_RMS/\sqrt{3}$	A	23.094 (Середньо квадратичне значення струму на первинній обмотці)
I2n_l_RMS	$Sn/V2n_c_RMS/\sqrt{3}$	A	577.35 (Середньо квадратичне значення струму на вторинній обмотці)
V1n_f_RMS	$V1n_c_RMS/\sqrt{3}$	V	5773.5 (Діюче значення напруги на первинній обмотці)
V2n_f_RMS	V2n_c_RMS	V	400.00 (Діюче значення напруги на вторинній обмотці)
V1n_f	$V1n_f_RMS*\sqrt{2}$	V	8165.0 (Амплітудне значення напруги на стороні ВН)
V2n_f	$V2n_f_RMS*\sqrt{2}$	V	565.69 (Амплітудне значення напруги на стороні НН)

I_{1n_f}	$I_{1n_f_RMS} \cdot \sqrt{2}$	A	32.660 (Амплітудне значення струму на стороні ВН)
I_{2n_f}	$I_{2n_f_RMS} \cdot \sqrt{2}$	A	471.40 (Амплітудне значення струму на стороні НН)
K_c	$V_{1n_c_RMS} / V_{2n_c_RMS}$		25 (Коефіцієнт трансформації)
K_{f_N}	N_p / N_s		25 (Коефіцієнт трансформації)
N_p	693		Кількість витків первинної обмотки
N_s	32		Кількість витків вторинної обмотки

3.2 Установки дослідження та розв'язувачі

Далі ми визначаємо досліди, на основі яких будемо проводити аналіз втрат трансформатора. Проведену роботу та окремі рішення, які були застосовані в моделі представлено нижче:

- Досліди К.3. та Х.Х виконані окремо. Переключення між ними вимагає здійснювати зміну параметрів 11 котушок. Для пришвидшення процесу зміни параметрів, було написано невеличкі програми, що дозволяють здійснювати ці дії автоматично. Це було зроблено у такій послідовності (рис. 3.1):

Job configuration -> Sequence -> Method call + Solution



Рис. 3.1 Вікно програмування

- Для нелінійної моделі був використаний прямий розв'язувач (MUMPS). Окремі параметри подані в рис. 3.2

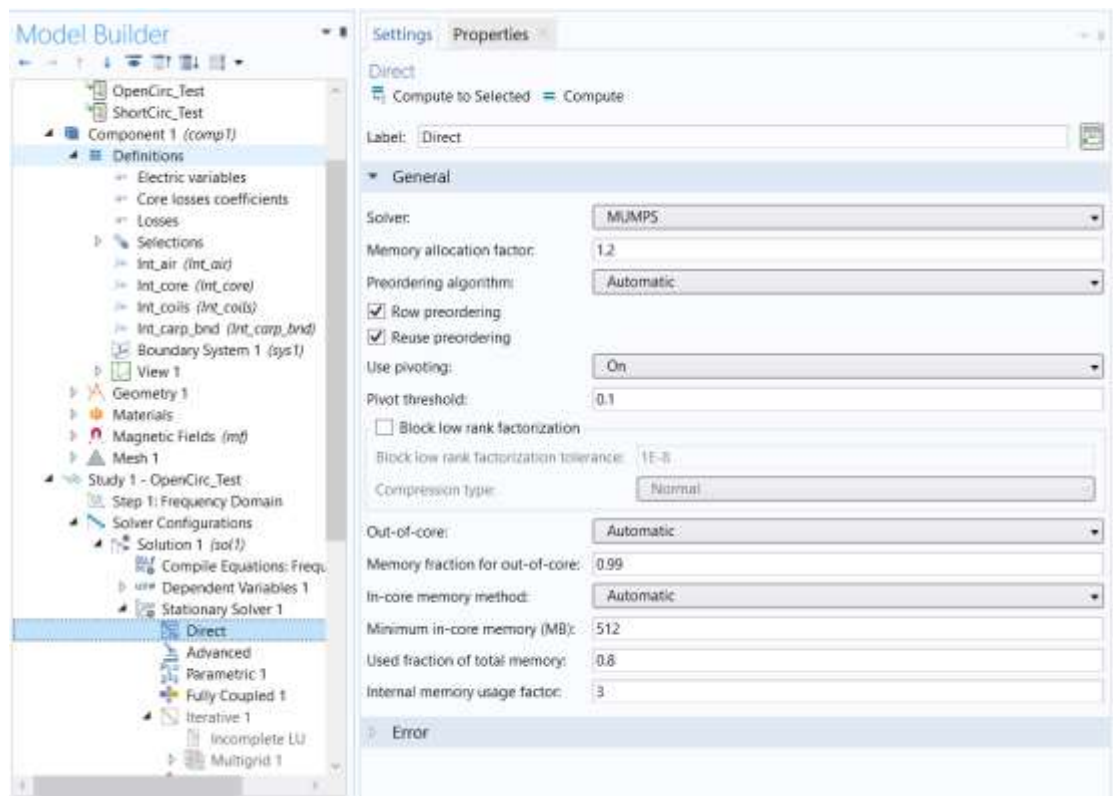


Рис. 3.2 Вікно налаштувань розв'язувача

- Роздільний обрахунок комплексних чисел подвоює час обрахунку без зміни точності, тому ця опція була вимкнута
- Для прискорення обрахунків, провідність матеріалів, що не мають втрат, було встановлено на 0.1[S/m]. Це допущення не впливає в значній мірі на

обрахунок ярмових балок чи магнітопроводу, проте дозволить зменшити час обрахунку. (Потрібно враховувати, що так як повітря займає відносно велику площу, втрати в ньому можуть досягти значень 200 Вт при провідності 1[S/m])

- Баланс потужностей має точність до декількох відсотків. Якщо використати модуль “stationary Gauge Fixing”, встановити параметр signum на 0[S/m], включити стабілізацію котушок ($\text{sigma} = 0$ [S/m]) і роздільний комплексний розрахунок, точність може бути підвищено (до 0.2% і більше).

Деякі налаштування представлені на рис. 3.3

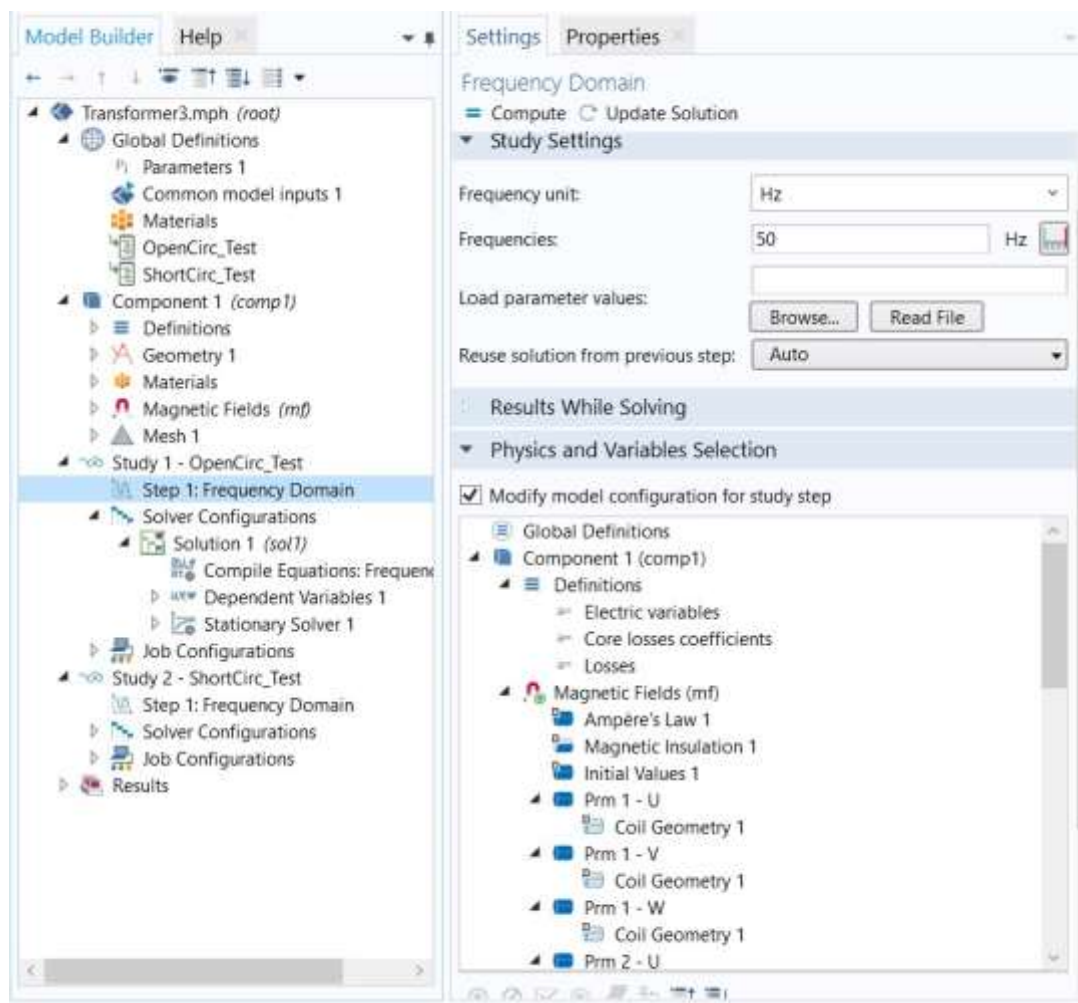


Рис. 3.3 Вікно налаштування дослідження.

3.3 Результати та їх аналіз

3.3.1 Аналіз втрат в сталі та розподілу магнітного потоку

З рис. 3.4 наглядно видно як розподіляється магнітний потік через осердя трансформатора. Можна побачити що зосередження магнітного поля припадає більше на кути осердя. Цей ефект пов'язаний з більшими кутковими втратами, оскільки лінії потоку повертаються під кутом від кінцівки у напрямку до ярма, що призводить до більших втрат у цій області.

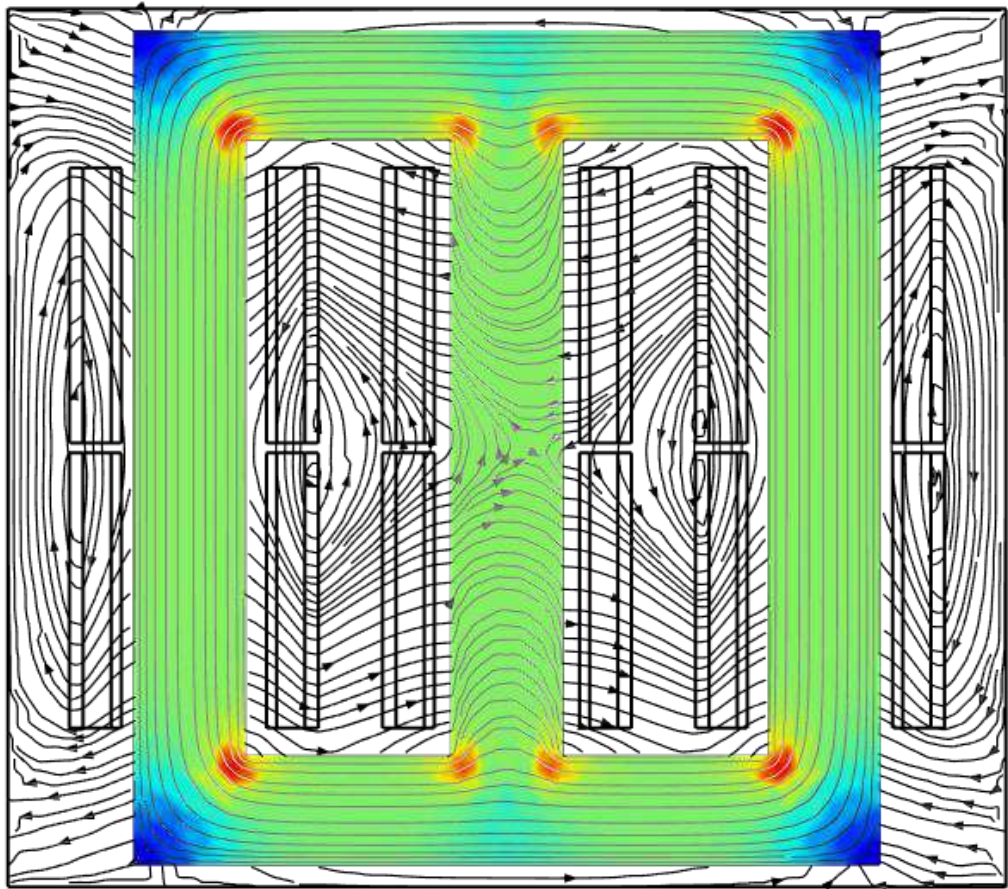


Рис. 3.4. Розподіл магнітного потоку

Розподіл магнітного потоку та насичення осердя трансформатора було зображено в ізометричному вигляді на рис. 3.5., який ще раз підтверджує ефект, який ми спостерігали на попередньому рисунку.

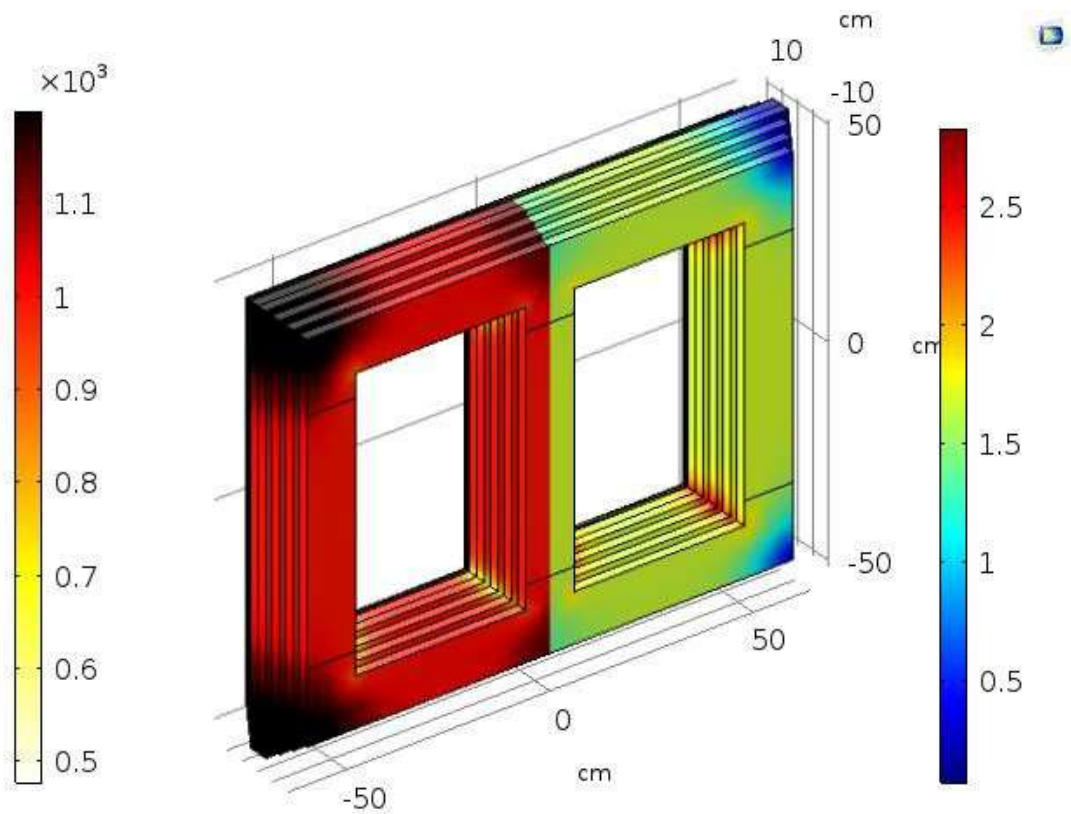


Рис. 3.5. Насичення трансформатора (ліва частина) і густина магнітного потоку (права частина)

3.3.2 Аналіз втрат в ярмових балках

Також було підраховани і проаналізовані втрати вихрових струмів, що наводяться в ярмових балках змінним магнітним полем.

Рис. 3.6. добре відображує пряму залежність втрат в балках на вихрові струми в нерівномірному магнітному полі. Найбільше втрати в немагнітних матеріалах проявляються у безпосередній близьості до обмоток трансформатора, які в свою чергу призведуть до підвищеного нагріву тих частин балок, де магнітний потік сконцентрований найбільш інтенсивно.

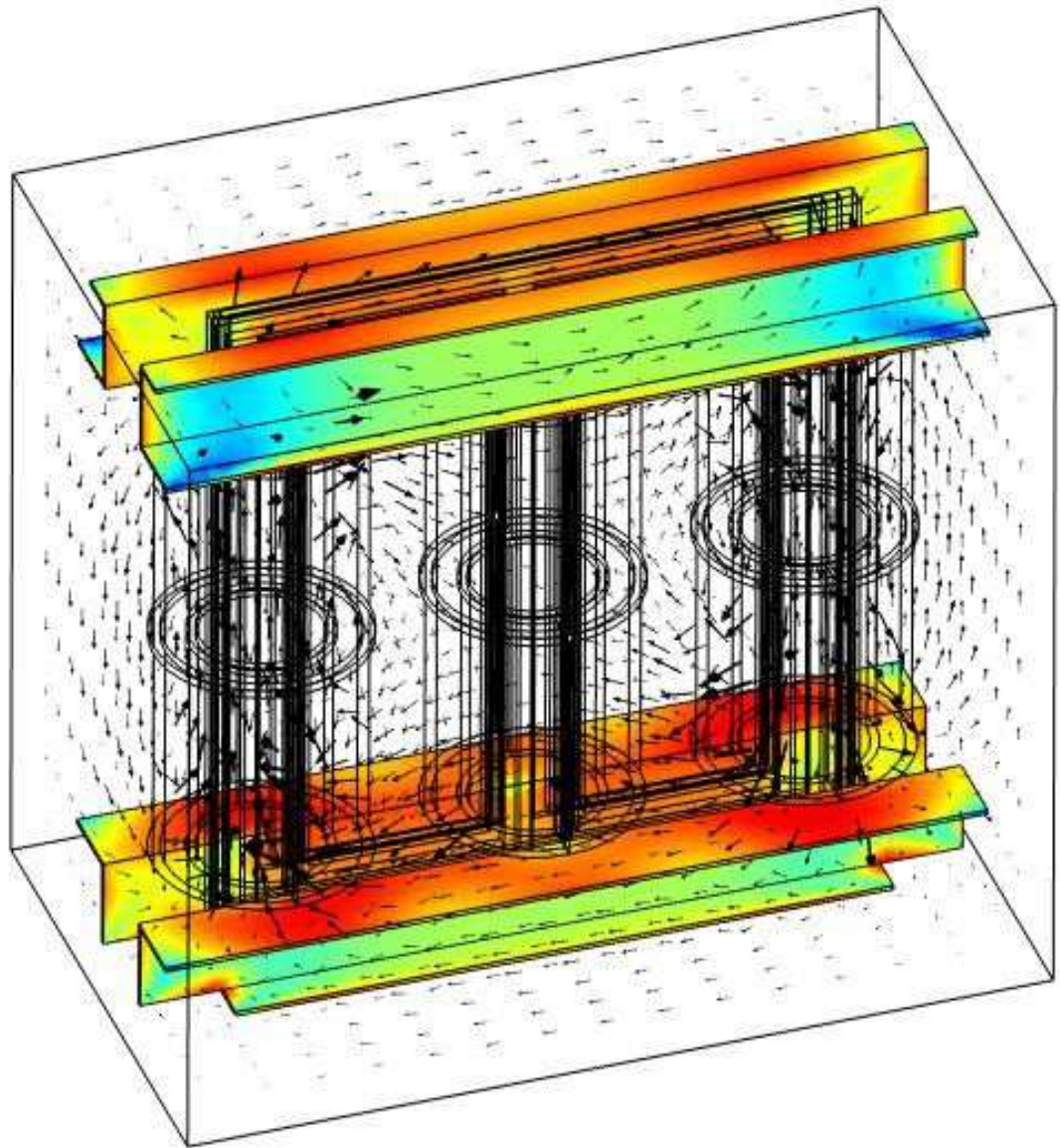


Рис. 3.6. Втрати на вихрові струми в балках

3.4 Обчислення і порівняння результатів обрахунків

Застосування рівняння Штейнмеца дозволяє з великою точністю визначити втрати на індуктивних елементах.

Рівняння Штейнмеца, яке іноді називають рівнянням потужності, - це емпіричне рівняння, яке використовується для обчислення загальної втрати потужності (втрати в осерді) на одиницю об'єму в магнітних матеріалах, коли на них діє зовнішній синусоїдальний змінний магнітний потік. Рівняння названо на честь Чарльза Штейнмеца, німецько-американського інженера-електрика,

який запропонував подібне рівняння без залежності частоти в 1890 році. Рівняння подане у вигляді:

$$P_v = k \cdot f \cdot a \cdot B^b \quad (3.5)$$

де P_v – середня втрата потужності на одиницю об'єму [мВ\см³]; f – частота в кГц; B – пікова щільність магнітного потоку;

Втрати енергії пов'язані, головним чином, з двома ефектами: магнітним гістерезисом, і, у струмопровідних матеріалах, вихровими струмами, які споживають енергію від джерела магнітного поля, розсіюючи її у вигляді теплової енергії Рівняння використовується в основному для обчислення втрат в осерді, що використовуються в електродвигунах, генераторах, трансформаторах та індукторах. Визначення втрат в осерді є економічно важливим питанням неефективності електричних мереж та приладів змінного струму.

Якщо враховувати лише гістерезис то коефіцієнт буде близьким до 1, і буде дорівнювати 2 майже для всіх сучасних магнітних матеріалів. Однак через наявність нелінійностей, це значення зазвичай знаходиться між 1 і 2, чи становить від 2 до 3. Подане рівняння - це спрощена форма, яка застосовується лише тоді, коли магнітне поле має синусоїдальну форму хвилі. Однак, оскільки більша частина електронного обладнання викривляють його форму, було зроблено багато модифікацій цього рівняння, що враховують ці фактори.

Коефіцієнти k , a і b , які ще називаються коефіцієнтами Штейнмеца, були попередньо визначені. Ці параметри, були знайдені емпірично з кривої гістерезису В-Н (рис. 2.5) матеріалу за допомогою підгонки кривої. Отримані значення та параметри, що відображають їх в нашій модулі представлено в таблиці 5.

Параметри Comsol Simulink для підрахунку втрат трансформатор

Таблиця 5

Core_mur2	30	Втрати в магнітопроводі, уявна частина
Core_Stmz_k	100[W/m ³]	Коефіцієнти Штейнмеца
Core_Stmz_a	1	
Core_Stmz_b	1.6	

Тож, здійснивши розрахунок використовуючі засоби програмного середовища Comsol ми отримали такі показники втрат силового трансформатора.

Втрати в магнітопроводі при частоті 50 Гц

Таблиця 6

Метод обчислення	Значення
МСЕ, магнітні втрати	0.88683 кВт
Рівняння Штейнмеца	1.1552 кВт
Емпіричні дані від виробника	1.0 кВт

Подана таблиця показує обраховані результати магнітних втрат, отриманих від 3D МСЕ моделі та емпіричних даних, поданих виробником. Можна побачити що результати відхиляються від емпіричних в межах $\pm 15\%$. Це цілком припустимо враховуючи відсутність окремих параметрів трансформатора та неможливість їх врахування при обчисленні тривимірної моделі. Умови середовища, також додають відхилення, які складно врахувати. Однакові умови проведення дослідження є одним з варіантів підвищення точності та усунення «шумів» які притаманні навколишньому середовищу. Також, не можна не сказати про спрощення моделі, які довелося зробити з метою полегшення задачі обрахунків трифазного силового трансформатора.

3.5 Підведення підсумків щодо проведеного дослідження

В ході виконання цього проекту була побудована реалістична тривимірна модель силового трифазного трансформатора, яку ми застосували для отримання інформації о фізичних процесах, що відбуваються в трансформаторах. Такий підхід аналізу трансформаторів може дати можливість побудови більш економічно вигідних моделей трансформаторів, з можливістю врахувати геометричну складність, нелінійність, індуковані вихрові струми та інші важливі параметри. Дослідження моделі в тривимірному просторі дозволяє нам створити повну уяву щодо розподілу магнітних потоків: вивчення втрат в осерді і обмотках; для детального аналізу вихрових струмів в осерді і обмотках з врахуванням поверхневого ефекту і ефекту близості при різних режимах роботи. Є можливість навіть моделювати несправності різного типу, такі як замикання фази на землю, міжфазні замикання і проводити аналіз перехідних процесів.

3.6 Висновки до розділу 3

Третій розділ містить результати чисельного моделювання та аналіз втрат у сухому трифазному трансформаторі. Було вивчено вплив окремих конструктивних елементів на загальні енергетичні втрати, зокрема втрати в магнітопроводі, ярмових балках, обмотках. Отримані залежності дозволили оцінити ефективність розрахункової моделі.

Результати симуляцій свідчать про наявність локалізованих зон з підвищеними втратами, що вказує на потенційні напрямки вдосконалення конструкції. Розрахунки підтвердили важливість оптимального вибору матеріалів, геометрії обмоток та охолоджуючих елементів.

На основі аналізу встановлено, що побудована модель адекватно описує фізичні процеси і може бути використана як інструмент для проектування енергоефективних трансформаторів.

РОЗДІЛ 4. СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ВТРАТ У ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

4.1. Необхідність моніторингу втрат у сучасних енергетичних системах

У зв'язку зі зростанням вимог до енергоефективності та надійності електричної інфраструктури, автоматизовані системи моніторингу втрат у трансформаторах набувають особливої актуальності. Постійний контроль і обробка параметрів дозволяють уникнути аварійних ситуацій, забезпечити стабільну роботу обладнання та оптимізувати витрати електроенергії.

4.2. Основні елементи систем моніторингу

Автоматизована система моніторингу включає такі ключові компоненти:

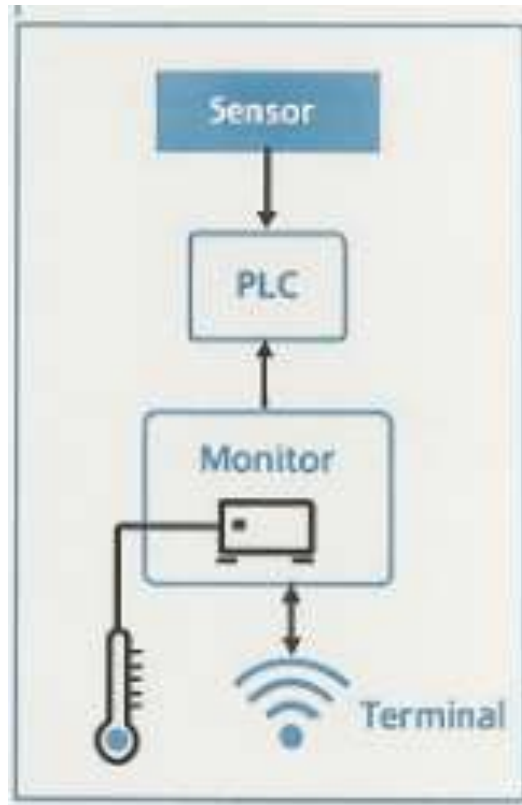
Температурні датчики (типу PTC або RTD) — для вимірювання температури обмоток і магнітопроводу.

Контролер або ПЛК (PLC) — для збирання, обробки і передачі даних.

Системи зберігання та візуалізації — сервери, SCADA-системи або хмарні сервіси.

Комунікаційні модулі — GSM/3G/4G-модулі, Ethernet, Wi-Fi, для передавання даних на диспетчерські пункти або мобільні пристрої.

На рисунку представлено принципову схему роботи такої системи:



Ці пристрої формують повноцінну систему моніторингу, яка може бути адаптована до будь-якого типу трансформатора.

4.3. Приклад побудови схеми моніторингу

Автоматизовану систему можна реалізувати наступним чином:

Встановлення температурних сенсорів у верхній частині обмоток і магнітопроводу.

Монтаж трансформаторів струму для вимірювання навантаження.

Об'єднання всіх датчиків у центральний контролер (ПЛК).

Передача даних на моніторинг-платформу (місцеву або віддалену).

Формування тривожних повідомлень при перевищенні заданих порогів температури чи втрат.

4.4. Переваги впровадження

Системи моніторингу забезпечують:

Виявлення прихованих дефектів до виникнення аварії.

Оптимізацію графіка технічного обслуговування.

Економію витрат на ремонти та втрати енергії.

Підвищення надійності енергопостачання.

4.5. Висновки до розділу 4

Автоматизовані системи моніторингу є необхідним інструментом для підтримки стабільної та економічної роботи трансформаторів.

Їх застосування дозволяє вчасно виявляти перевантаження, зростання втрат, перегрів і пошкодження.

В умовах переходу до «розумних» електромереж такі системи є базовим елементом цифрової трансформації енергетики.

5 БЕЗПЕКА ПРАЦІ

Функціональна безпека при роботі з масляними трансформаторами

Силові трансформатори відносять до відповідальних пристроїв, адже від їх надійності залежить надійність електропостачання споживачів (як побутових так і промислових). Для цього на протязі всього терміну експлуатації необхідно проводити ремонтні та діагностичні роботи. Безпека персоналу також не повинна виступати останньою. Для цього були розроблені ряд стандартів, що дають змогу попередити виникненню аварійних ситуацій та убезпечити персонал.

– Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-121-98);

Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів;

– Правил будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок (НПАОП 40.1-132-01);

Правил користування електричною енергією;

Правила улаштування електроустановок

Тепер переглянемо деякі пункти рекомендовані стандартом ПБЕЕС

4.6. Під час обслуговування трансформаторів (реакторів) повинні бути забезпечені зручні і безпечні умови для спостереження за рівнем масла, газовим реле, а також для відбору проб масла.

4.7. Рівень масла в розширнику трансформатора (реактора), який не працює, повинен бути на позначці, що відповідає температурі навколишнього середовища на даний момент. На працюючому трансформаторі рівень масла повинен бути не нижче позначки, що відповідає температурі навколишнього середовища.

4.8. Трансформаторні установки, реактори оснащуються протипожежними засобами відповідно до вимог ПУЕ. Стационарні засоби пожежогасіння повинні бути у справному стані і підлягати перевіркам згідно із затвердженим графіком.

4.12. За номінального навантаження трансформатора температура верхніх шарів масла не повинна перевищувати (якщо в інструкціях підприємств- виробників не обумовлені інші температури):

у трансформаторів із системою охолодження ДЦ (примусова циркуляція повітря і масла) - 75°C ;

у трансформаторів із системами охолодження М (природна циркуляція повітря і масла) і Д (примусова циркуляція повітря та природна циркуляція масла) - 95°C ;

у трансформаторів із системою охолодження Ц (примусова циркуляція води і масла) температура масла на вході до маслоохолодника повинна бути не вище ніж 70°C .

Можна побачити що експлуатація сучасних масляних трансформаторів супроводжується підвищеною небезпекою, що в свою чергу призводить до необхідності створення заходів та засобів, здатних компенсувати, чи принаймні зменшити вірогідність вибухонебезпечності масла. Підвищена складність конструкції також не супроводжується зменшенням кількості неполадок та дефектів. Все це вимагає грамотних та професійних дій з боку обслуговуючого персоналу, але ризики при проведенні ремонтних і обслуговуючих робіт, незважаючи на дотримання усіх стандартів і вимог не зменшуються. Було створено ряд превентивних заходів, які не допускають виходу з ладу обладнання чи його швидкого резервування, таким чином функціональна безпека забезпечуються. Метою функціональної безпеки є зниження вірогідності збоїв системи та обладнання, разом з підвищенням безпеки для персоналу.

Причин виходу з ладу масляних трансформаторів може бути поломка системи охолодження, засмічення масляних фільтрів, перегрів трансформатора (температурна межа якого визначається насамперед температурою масла і небезпекою виникнення короткого замикання, що може призвести до його займання). Таке явище може привести до порушення герметичності бака і до «перекиду» вогню на найближчу територію.

Для запобігання наслідків несправностей різних (хочу замітити) не основних функціональних частин, було створено ряд вимог щодо наявності пристроїв захисту.

- Це і газове реле, що повинно реагувати на пошкодження всередині бака.
- Складні захисні пристрої, для попередження пошкодження баку при миттєвому підвищенні тиску.
- Наявність системи управління для контролю температури обмоток і трансформаторного масла, його рівня, степені зволоження і загазованості.

ВИСНОВКИ

В ході виконання даної бакалаврської роботи були виконані наступні кроки:

- Зібрано та систематизовано основну інформацію, отриману під час підготовки до проведення дослідження.
- Побудована геометрична модель трифазного трансформатора на основі сухого трансформатора серії Trihal;
- Для геометричної моделі призначені матеріали та визначені їх властивості;
- Описані рівняння та граничні умови відповідно до теми даної роботи;
- Змодельовано взаємодію магнітних і електричних потоків з моделлю трансформатора
- Згенерована сітка скінченних елементів для моделі з необхідною точністю;
- Для моделі виконані два стандартних дослідження (дослід холостого ходу і дослід короткого замикання);
- Отримані дані найбільш важливіших параметрів та основні втрати, які були зіставлені до емпіричних даних, отриманих від виробника;
- Проведено аналіз отриманих розрахунків та зроблені висновки стосовно отриманих результатів

В результаті аналізу взаємодії магнітних і електричних потоків було з'ясовано, що існуючі методи розрахунку, що враховують геометрію об'єкта дослідження, вимагають значної кількості машинного часу і високої продуктивності обчислювальної техніки.

За методикою, представленою в розділі 3, було проведено розрахунок втрат магнітної системи і частково електричної частини, які були наприкінці зіставлені до трансформатора серії Trihal TRI04001064354980. За результатами розрахунків побудованої CAD-модель трансформатора, підготовлені креслення

Використання САЕ систем дає нам більш широкі можливості аналізу процесів та явищ в трансформаторах, зменшуючи ресурси на побудову складних моделей трансформаторів та знижуючи кошти на їх обслуговування і експлуатацію. Потенціал їх використання не обмежуються тільки проведеними дослідженнями в даній роботі. Статистичні дані отримані таким чином зроблять можливим модифікувати обладнання використовуючи менші ресурси (як людські, так і матеріальні)..

Розглянуто аспект можливості підвищення функціональної безпеки за рахунок усунення потенційно вибухо- і пожежонебезпечної частини найбільш поширених трансформаторів масляного типу і переходу до більш сучасного типу, з метою покращення умов роботи обслуговуючого персоналу за покращення експлуатаційних показників.

Список використаних джерел

1. Грицюк С.М., Петрик Ю.П. *Основи проектування трансформаторів*. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2016. – 312 с.
2. Капинос В.В., Ковальчук В.П. *Електричні апарати: Теорія і практика*. – Київ: Либідь, 2014. – 544 с.
3. Андрієнко І.М., Дячук Ю.Ф. *Трансформатори: Конструкція, розрахунок, експлуатація*. – Київ: Політехніка, 2017. – 268 с.
4. Дубенець В.Г., Хільчевський В.В., Савченко О.В. *Основи методу скінченних елементів: Навчально-методичний посібник*. – Чернігів: ЧДТУ, 2003. – 346 с.
5. Іванков В.Ф., Басова А.В., Хімюк І.В. *Методи моделювання трансформаторів та реакторів*. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2017. – 490 с.
6. Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицький С.М. *Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори: лабораторний практикум*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013.
7. ДСТУ EN 60076-1:2018. *Трансформатори силові. Частина 1. Загальні положення (EN 60076-1:2011, IDT)*. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018.
8. Стаття «FEM 2D and 3D design of transformer for core losses computation». Режим доступу:
<https://stumejournals.com/journals/i4/2017/3/119>
9. AC/DC Module User's Guide. *COMSOL Multiphysics® v. 5.4*. – COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2018.
10. COMSOL Multiphysics User's Guide. – Version 6.1. – COMSOL AB, Sweden, 2023.
11. Стаття «Analysis of a Three-phase Transformer Using COMSOL Multiphysics and a Virtual Reality Environment». Режим доступу:
<https://www.comsol.ru/paper/analysis-of-a-three-phase-transformer-using-comsol-multiphysics-and-a-virtual-re-10840>
12. Trihal - Cast resin transformer - Catalogue (Version 3.1). Schneider

Electric. Режим доступу:

<https://www.se.com/ww/en/product/TRI040010643549800>

13. ПУЕ – *Правила улаштування електроустановок*. – Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.

14. *Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів*. – К.: Дисконт, 1995.

15. ДНАОП 0.00–1.21–98:1998. *Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів*. – К.: М-во праці та соціальної політики України, 1998.

16. Wikipedia – *Метод скінченних елементів*. Режим доступу:

https://uk.wikipedia.org/wiki/Метод_скінченних_елементів

17. Comsol-Simulink integrated computer model for simulations of high-voltage power transformers. ResearchGate. Режим доступу:

<https://www.researchgate.net/publication/305652592>

18. Єрмолаєв С.О., Мунтян В.О., Яковлев В.Ф. *Експлуатація енергообладнання та засобів автоматизації в системі АПК*. – К.: Мета, 2003. – 543 с.

19. Жеребецький В.М., Фесенко Л.В. *Проектування електричних машин: навчальний посібник*. – Київ: НАУ, 2020. – 260 с.

20. Кривонос С.М., Сахно Ю.М. *Моделювання в енергетиці: методи та засоби*. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – 358 с.

21. Zera J. Transformer Loss Evaluation Using Finite Element Method. – IEEE Transactions on Magnetics, 2021.

22. Schneider Electric. *Guide to Dry-Type Transformers (Trihal Series)*. – Technical Publication, 2022.

23. Савченко О.В. *Системи автоматизованого контролю параметрів енергетичних установок*. – Чернігів: ЧНТУ, 2016.

24. Energy Efficiency Directive 2012/27/EU. – European Commission.

25. ABB. Distribution Transformers Catalog. – ABB Ltd., 2022.
26. Siemens. Technical Reference Book – Transformers. – Siemens AG, 2020.
27. Білик М.В. Енергетичні втрати у трансформаторах та шляхи їх зниження. – Вісник ТНЕУ, 2018.
28. IEC 61869 (серія). Instrument transformers – General requirements. – International Electrotechnical Commission, 2020.
29. Дьяконов В.П. Системы управления и контроля на базе ПЛК. – СПб: Питер, 2019. – 320 с.
30. Хільчевський В.В., Савченко С.І. Теоретичні основи електротехніки. – Київ: НАУ, 2021. – 414 с.