

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М.ПОТЕБНІ

КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна робота
другий магістерський
(рівень вищої освіти)

на тему «Дослідження заходів підвищення ефективності роботи
системи теплового захисту силового обладнання»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1440-з
спеціальності теплоенергетика
освітньої програми теплоенергетика

Блинов Владислав Євгенович

Керівник к.т.н., доц. Ільїн С.В.

Рецензент проф, д.т.н. Банах В.А.



Запоріжжя
2021

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра Теплоенергетики та гідроенергетики
 Рівень вищої освіти другий магістерський
 Спеціальність 144 Теплоенергетика
 Освітня програма Теплоенергетика
(код та назва)
 Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«01» 12 2021 року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Блинов Владислав Євгенович

(прізвище, ім'я, по батькові)

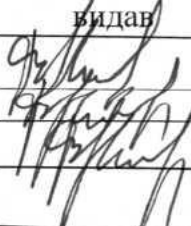
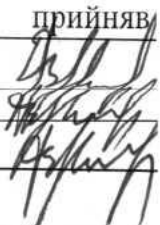




Тема роботи (проекту) Дослідження заходів підвищення ефективності роботи системи теплового захисту силового обладнання керівник роботи Ільїн Сергій Віталійович, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «30» червня 2021 року № 975-с

- 1 Строк подання студентом роботи: 05 грудня 2021 р.
- 2 Вихідні дані до роботи: геометричні характеристики силового обладнання, тепловиділення, параметри системи теплового захисту;
- 3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Техніко-економічне обґрунтування прийнятих рішень. Швидкість масла в радіаторі при природній циркуляції масла і повітря. Загальна характеристика системи захисту від перенапруг за обриву вторинного кола трансформатора струму. Швидкість масла в радіаторі при природній циркуляції масла і повітря. Засоби підвищення ефективності роботи трансформаторної підстанції. Роль трансформаторних підстанцій в електроенергетиці.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Трансформаторна підстанція. Дискова обмотка силового трансформатора. Схема електричної мережі з ненавантаженим силовим трансформатором. Ескіз трансформаторного радіатора. Результати досліджень. Поле температури масла (К) в радіаторі. Поля швидкостей (м/с) масла в радіаторі.

5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Ільїн С.В.		
2	Ільїн С.В.		
3	Ільїн С.В.		


6 Дата видачі завдання 05 травня 2021 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Огляд літературних джерел	25.06.2021	виконано
2	Системи захисту трансформаторних станцій	01.08.2021	виконано
3	Дослідження процесів в радіаторній системі охолодження масляного трансформатора	01.10.2021	виконано
4	Оформлення презентації та креслень	25.11.2021	виконано
5	Оформлення кваліфікаційної роботи згідно нормативним вимогам	05.12.2021	виконано

Студент _____
(підпис)

В.Є. Блинов
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) 
(підпис)

С.В. Ільїн
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер



С.Є. Чижов

АНОТАЦІЯ

В.Є. Блинов. Дослідження заходів підвищення ефективності роботи системи теплового захисту силового обладнання.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник канд. техн. наук, доцент Ільїн С.В.. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2021.

У кваліфікаційній роботі магістра розглядалася робота системи теплового захисту силового обладнання. Силкові трансформатори промислових об'єктів потребують підвищення ефективності їх використання з урахуванням конкретних умов експлуатації та навколишнього середовища. Виконання в повному обсязі вимог нормативно-технічної документації та інструкцій по експлуатації, що регламентують застосування силових трансформаторів на промислових підприємствах, можливо лише при впровадженні автоматизованої системи управління трансформаторними підстанціями. При кількості трансформаторів більше одного і можливості перекладу навантаження з одного трансформатора на інші можна оптимізувати їх експлуатацію шляхом зміни кількості працюючих трансформаторів або перерозподілу між ними навантажень відповідно до обраного критерію оптимальності. Зроблено висновки.

Ключові слова: силове обладнання, дискові обмотки, система теплового захисту, трансформаторне масло.

ABSTRACT

V.Y. Blinov. Research of Measures to Increase the Efficiency of the Thermal Protection System of Power Equipment.

Qualifying final work for obtaining a master's degree in the specialty 144 - Heat Power Engineering, research supervisor PhD, Associate Professor Ilin SV. Zaporozhye National University, Engineering Educational and Scientific Institute. Yu.M. Potebny, Department of Heat and Hydropower, 2021.

In the qualification work of the master the work of the system of thermal protection of power equipment was considered. Power transformers of industrial facilities need to increase the efficiency of their use, taking into account specific operating conditions and the environment. Fully fulfilling the requirements of regulatory and technical documentation and operating instructions governing the use of power transformers in industrial enterprises is possible only with the introduction of an automated control system for transformer substations. When the number of transformers is more than one and the ability to transfer the load from one transformer to another, you can optimize their operation by changing the number of operating transformers or redistribution of loads between them according to the selected criterion of optimality. Conclusions are made.

Keywords: power equipment, disc windings, thermal protection system, transformer oil.

ВСТУП

Актуальність роботи. У ряді найважливіших задач, поставлених перед наукою, є поліпшення існуючих та розробка нових, більш досконаліх енергетичних систем. Критеріями, які обумовлюють вибір електричних машин для роботи в енергосистемах, є надійність і собівартість силового трансформаторного устаткування.

У більшості випадків для створення конкурентоспроможного трансформаторного устаткування застосовуються ефективні методи охолодження обмоток. Одним з таких методів є природна циркуляція охолоджуючої рідини в горизонтальних і вертикальних каналах обмоток за умови ширини горизонтальних каналів не більше, ніж 3 мм. Реалізація такого виду охолодження дозволяє знизити матеріалоємність трансформатора за рахунок зменшення його габаритних розмірів, виключити з системи охолодження насоси за рахунок зміни примусової циркуляції на природну, зменшити масу і розміри трансформатора, що, в свою чергу, призведе до зменшення витрат. Проте, окрім видимих зисків у заміні виду циркуляції охолоджуючого середовища в обмотках трансформатора, є ряд проблем, які мають бути вирішеними. Серед них: застій масла в горизонтальних каналах обмоток, місцевий перегрів котушок, утворення зон, в яких кількість масла, що протікає, недостатня для ефективного відводу теплоти від котушок. У зв'язку з цим, необхідно точно прогнозувати характер температурного поля таких обмоток для розробки заходів по забезпеченню надійного охолодження обмоток трансформатора. Існуючі методи розрахунку теплового стану обмоток використовується лише у випадках, коли ширина перетину горизонтальних каналів становить більше 3 мм. Тому теоретичне та експериментальне дослідження тепловіддачі та гідродинаміки в охолоджуючих каналах обмоток з розміром горизонтальних каналів менше 3 мм та природною циркуляцією охолоджуючого середовища є актуальним завданням.

Мета та задачі роботи. Метою магістерської роботи є підвищення ефективності охолодження обмоток силового трансформатора.

Об'єктом дослідження є процеси теплообміну та гідродинаміки при природному русі охолоджуючої рідини в горизонтальних каналах дискових обмоток.

Предмет дослідження – вплив профілю горизонтального каналу на характер руху в ньому трансформаторного масла; вплив швидкості течії масла на вході в горизонтальний канал на надлишковий тиск в ньому..

Методи дослідження. У роботі використовувалися аналітичні та емпіричні дослідження, яке виконане за допомогою комп'ютерних технологій і програмного забезпечення Solid Works Flow Simulation, який базується на основі метода кінцевих елементів.

Наукова новизна роботи полягає в подальшому розвитку наукові уявлення про характер руху охолоджуючого трансформаторного масла в каналах дискових обмоток за відсутності направляючих перегородок..

Практичне значення роботи - визначено найбільш нагріті зони трансформатора на основі створеної математичної моделі дискової трансформаторної обмотки.

Апробація роботи. Результати роботи представлені на загальноуніверситетській конференції студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «Молода наука-2021» та I Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України» 19-21 жовтня 2021 р.

Обсяг та структура роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків та переліку посилань. Основний зміст роботи викладений на 90 сторінках комп'ютерного тексту, в тому числі 19 рисунків, 6 таблиць. Список використаної літератури складається із 33 найменувань.

1 ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ. ПОНЯТТЯ, ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ, КЛАСИФІКАЦІЯ

Трансформаторна підстанція (ТП) – це електроенергетичний об'єкт, який служить для зменшення чи підвищення напруги змінного струму і для розподілу електроенергії [2].

До складу трансформаторної підстанції входять :

- Силовий трансформатор чи автотрансформатор. Використовують щоб забезпечити безпеку електроенергії, вони здатний перетворити одну систему трифазного струму в іншу;
- Вимірювальні трансформатори струму та напруг;
- Розподільчі установки. Вони розподіляють вхідну електроенергію по окремих ланцюгах, тим самим зменшуючи напругу в головному ланцюзі;
- Системи захистів, автоматики, управління, сигналізації, вимірювання [3].

Для класифікації трансформаторних підстанцій використовують різні характеристики. Наприклад, якщо брати до уваги вид зміни електричної енергії, то трансформаторні підстанції бувають:

- Підвищувальні трансформаторні підстанції (споруджувані зазвичай при електростанціях) перетворюють напругу, що виробляється генераторами, у вищу напругу (одного або декількох значень), необхідну для передачі електроенергії по лініях електропередачі (ЛЕП).
- Знижувальні трансформаторні підстанції перетворюють первинну напругу електричної мережі в нижчу вторинну.

Залежно від призначення і від величини первинної і вторинної напруги знижувальні трансформаторні підстанції підрозділяються на районні, головні знижувальні і місцеві (цехові).

Районні трансформаторні підстанції приймають електроенергію безпосередньо від високовольтних ЛЕП і передають її на головні знижувальні

ТП, а ті (знизивши напругу до 35, 10 або 6 кВ) — на місцеві і цехові підстанції, на яких здійснюється останній рівень трансформації (з пониженням напруги до 660, 400 або 230 В) і розподіл електроенергії між споживачами.

В залежності від місця і способу приєднання трансформаторні підстанції до електричної мережі нормативні документи не встановлюють класифікації підстанцій. Однак ряд джерел дає класифікацію виходячи із застосування типів конфігурацій мережі та можливих схем приєднання:

- Тупикові — живлення по одній або двом радіальним лініям.
- Відгалужувальні — приєднуються до однієї або двох ліній на відгалуженнях.
- Прохідні — підключаються до мережі шляхом заходу однієї лінії з двухстороннім живленням.
- Вузлові — підключаються до мережі не менше ніж трьома лініями живлення.

Відгалужувальні та прохідні трансформаторні підстанції об'єднують поняттям проміжні, яке визначає розміщення підстанції між двома центрами електроживлення або вузловими підстанціями.

Прохідні і вузлові підстанції, через шини яких здійснюються перетоки потужності між вузлами мережі, називають транзитними.

Також використовується термін опорна підстанція, який як правило позначає підстанцію більш високого класу напруги по відношенню до розглянутої трансформаторної підстанції або мережі.

Також трансформаторні підстанції розділяють на підстанції відкритого і закритого типу.

Закрита трансформаторна підстанція — ТП, обладнання якої розміщене в приміщенні або в металевій оболонці.

Прибудована трансформаторна підстанція — закрита трансформаторна підстанція, що має тільки один будівельний елемент, спільний з суміжними

приміщеннями (стіну, перегородку або підлогу, що є перекриттям суміжного приміщення знизу).

Вбудована трансформаторна підстанція має два або більше будівельних елемента, спільні з суміжними приміщеннями.

Щоглова трансформаторна підстанція (ЩТП) — трансформаторна підстанція (у тому числі в конструктивному виконанні КТП), все устаткування якої встановлене на конструкціях (або опорі повітряної лінії електропередач (ПЛ) просто неба на висоті, що не потребує наземного огороження.

Вибухозахищена трансформаторна підстанція — трансформаторна підстанція для шахт [4].

1.1. Роль трансформаторних підстанцій в електроенергетиці

Електрифікація населених пунктів і об'єктів, що знаходяться далеко від них є обов'язковою умовою їх функціонування. Але оскільки в електромережах дуже часто трапляються перепади напруги, то підключений до них обладнання може вийти з ладу. Уникнути цього допомагають трансформаторні підстанції [1].

Трансформаторні підстанції мають дуже важливе значення в електроенергетиці оскільки струм, що передається з електростанцій має дуже велику напругу та силу струму. Струм передається по високовольтним ЛЕП і щоб зменшити втрати потужності струму за допомогою підвищувальних трансформаторів (які є складовою трансформаторних підстанцій) збільшують напругу та відповідно зменшують силу струму тому потужність струму залишається незмінною, а втрата потужності зменшується. Потім знижувальними трансформаторами зменшують напругу і силу струму відповідно, яка необхідна споживачу.

Щодо перетворюючих підстанцій вони необхідні для перетворення змінного струму в постійний струм (за допомогою випрямлячів) або навпаки (за

допомогою інверторів) оскільки багато електроустановок працюють на постійному струмі наприклад : прокатні станки, гальванічні ванни, міський транспорт тощо. Перетворюючі підстанції просто необхідні для роботи цих електроустановок.

Для ЛЕП постійного трьохфазного струму на початку лінії за допомогою перетворюючої підстанції змінний струм перетворюють в постійний (за допомогою вирівнювача), а в кінці лінії постійний струм в змінний (за допомогою інвертора).

Зазвичай видобуток и споживання електроенергії відбуваються на змінному струмі, а передача на постійному [5].

1.2 Засоби підвищення ефективності роботи трансформаторної підстанції

У системах електропостачання промислових підприємств використовуються силові трансформатори напругою (6-10) / (0,4-0,69), 10/6 і (35-220) / (6-10) кВ. Від їх роботи залежать ефективність функціонування виробничих об'єктів різних галузей народного господарства і величина втрат електроенергії в мережах різних напруг.

Найбільш поширеними є трансформатори з первинною напругою 6-10 кВ, що живлять різноманітні електроприймачі на напрузі 0,4-6 кВ. Режим роботи зазначених трансформаторів в значній мірі обумовлені технологічним процесом конкретного виробництва. Залежно від обсягу виробленої продукції навантаження трансформаторів коливаються в широкому діапазоні. При цьому можливі як періоди холостого ходу, так і перевантаження окремих трансформаторів. Тому ці трансформатори в першу чергу потребують підвищення ефективності їх використання шляхом своєчасної зміни числа працюючих трансформаторів, так як трансформатори головних знижувальних підстанцій і підстанцій глибокого вводу з первинною напругою 35 кВ і вище з

метою зниження втрат електроенергії у багатьох випадках відключати неприпустимо за вимогами надійності електропостачання споживачів.

Надійна та тривала робота силових трансформаторів можлива лише при чіткому дотриманні всіх вимог, регламентованих діючою нормативно-технічною документацією, і керівництв з експлуатації конкретних типів трансформаторів. Для цього необхідно дотримуватися встановлених температурних режимів і рівнів напруги, контролювати максимальні навантаження в нормальних і після аварійних режимах, відстежувати графік навантаження, в залежності від якого визначати і дотримуватися оптимального числа працюючих трансформаторів з метою зниження втрат потужності і електроенергії і т. д.

При цьому слід враховувати конкретні умови експлуатації, так як внутрішньо цехові трансформаторні підстанції максимально наближаються до технологічних електроприймачів і при відкритій установці можуть піддаватися несприятливому впливу навколишнього середовища, зумовленого виробничою діяльністю.

На жаль, в реальних умовах функціонування електричного господарства промислового підприємства, до складу якого входять і системи електропостачання, завжди знаходяться приватні, але в той же час вагомі причини, пов'язані з роботою технологічного устаткування, що перешкоджають виконанню в повному обсязі комплексу вимог, що забезпечують оптимальну експлуатацію силових трансформаторів.

На відміну від електричних мереж енергосистем на промислових підприємствах, особливо невеликих, зустрічаються випадки байдужого ставлення до експлуатації трансформаторів при їх нормальному функціонуванні з причин недостатнього рівня кваліфікації обслуговуючого персоналу і відсутності спонукальних мотивів директивного або заохочувального характеру, що мають на меті підвищення ефективності використання електроустаткування.

Трансформаторні підстанції промислових об'єктів, як правило, експлуатуються без постійного обслуговуючого персоналу. Тому при відсутності пристроїв дистанційного контролю виміри навантажень і температури виробляються епізодично та зі значними погрішностями. Це не дозволяє відстежувати процес теплового і вібраційного зносу ізоляції, а також здійснювати оптимальну експлуатацію силових трансформаторів. Організацію постійного контролю за роботою трансформаторних підстанцій підприємства можна здійснювати двома шляхами: розширенням функціональних обов'язків персоналу енергетичних служб, що може потребувати залучення додаткових працівників, або впровадженням автоматизованої системи управління роботою трансформаторних підстанцій. На наш погляд, кращий другий шлях. Необхідно відзначити, що відносно компактне розташування цехових трансформаторних підстанцій і стабільність схем розподілу електроенергії на промислових підприємствах у порівнянні з електричними мережами 6-10 кВ енергосистеми є сприятливими факторами для впровадження в системах електропостачання телемеханічних автоматизованих систем з функціями вимірювання, управління і сигналізації. Також у разі впровадження автоматизованої системи виключається або зводиться до мінімуму людський фактор.

Ідея автоматизації управління роботою трансформаторів в залежності від навантаження приєднаних споживачів не нова, але аж ніяк не тривіальна, так як на промислових підприємствах вона практично не реалізована в повному обсязі з урахуванням комплексу вимог нормативно технічної документації.

Наявні теоретичні розробки з даного питання в основному стосуються паралельної роботи трансформаторів на підстанціях, в той час як на промислових об'єктах, як правило, передбачається їх роздільна робота на загальне навантаження. Як параметри, що визначають необхідність включення або відключення трансформаторів, використовуються навантаження трансформатора і поточна дата. Оскільки під час кожного вечірнього провалу навантаження неможливо відключати трансформатори через обмеженого

комутаційного ресурсу вимикачів, пропонується відключати їх при значних зниженнях навантаження у вихідні дні. Такий підхід застосуємо для трансформаторів класу напруги 110-330 кВ.

Для трансформаторів 6-10 / 0,4 кВ систем електропостачання промислових підприємств характерні більш мінливий графік навантаження, що залежить від кількості виробленої продукції, і більш складні схеми розподілу електроенергії на вторинному напрузі. Тому необхідно контролювати значну кількість експлуатаційних параметрів і мати гнучкий алгоритм управління роботою по деякому обраному критерієм оптимальності.

Слід зазначити, що не можна розглядати оптимізацію роботи силових трансформаторів відокремлено від інших елементів систем електропостачання. Це пов'язано з тим, що при будь-яких змінах режиму роботи трансформатора також змінюються навантаження пов'язаних з ним інших елементів систем електропостачання.

Для оптимізації режимів роботи силових трансформаторів промислових підстанцій необхідні теоретичний апарат оптимізації та програмно-апаратний керуючий комплекс.

Теоретичний апарат оптимізації - це перш за все якийсь критерій оптимальності, формалізований за допомогою математичної моделі обладнання, експлуатацію якої планується оптимізувати. З цією метою складається алгоритм, що описує реалізацію оптимальної експлуатації, в який вводяться додаткові умови, як правило, обмежуючі. На основі даного алгоритму розробляється програма, застосування якої дозволить підвищити ефективність використання силових трансформаторів в системі електропостачання промислових підприємств.

Стосовно силових трансформаторів промислових об'єктів в якості критерію оптимальності можна прийняти мінімум втрат електроенергії за аналізований період експлуатації, так як вартість втрат електроенергії входить в енергетичну складову собівартості продукції.

Підвищити ефективність роботи електроустаткування при зниженні загального навантаження можна шляхом відключення частини малоавантажених трансформаторів з переводом живлення їх споживачів на сусідні трансформатори.

Програма оптимізації в такому випадку використовує дані про завантаження трансформаторів і видає сигнали на їх відключення. По мірі зростання навантаження алгоритм видає команду на включення необхідної кількості відключених трансформаторів. Обмежувочими умовами в даному випадку є:

- надійність електропостачання споживачів, приєднаних до даної трансформаторної підстанції;
- математичне очікування електричного навантаження інших, пов'язаних з силовим трансформатором, елементів системи електропостачання та їх пропускну здатність;
- попереднє завантаження трансформаторів;
- попереднє значення сумарного зносу трансформаторів;
- ступінь зносу і допустима кількість комутаційних циклів високовольтних вимикачів [6].

За перерахованих умов забезпечуються оптимальна робота силових трансформаторів за критерієм мінімуму втрат активної потужності і електроенергії та рівномірна витрата ресурсу силових трансформаторів, що живлять кабелі та інші елементи. У найпростішому випадку зазначеним способом можна локально оптимізувати роботу двохтрансформаторної підстанції [6].

Для програми оптимізації потрібні вихідні дані, частина з яких є умовно-постійними (паспортні дані: номінальна потужність, втрати холостого ходу і короткого замикання і т. д.), а частина-умовно-змінними (поточний коефіцієнт завантаження, поточне значення відносного зносу виткової ізоляції, температура масла у верхніх шарах і т. д.). Перераховані величини

характеризують силовий трансформатор і його роботу. Крім цього, в алгоритмі оптимізації слід врахувати і параметри пов'язаних з ним інших елементів СЕС, на які ступінь завантаження впливає більшою мірою [6].

Вихідними даними є інформація про досягнення контрольованими параметрами деяких критичних значень, після чого приймається рішення і подається сигнал на відключення або включення конкретних трансформаторів [6].

Зниження коефіцієнта несиметрії струму в знижувальному трансформаторі та в трифазній лінії електропередач

Спосіб підвищення надійності роботи знижувальної трансформаторної підстанції в розподільних мережах 6 (10) / 0,4 кВ призначений для роботи в розподільних мережах 6 (10) -0,4 кВ, що містять знижувальний трансформатор 6 (10) / 0,4 кВ, трифазні лінії 0,4 кВ, мікроконтролер, датчики струму, встановлені на шинах знижувального трансформатора і на відхідних кабелях навантажень, вимикачі з приводами, встановлені на стороні низької напруги трансформатора. Управління підключенням і відключенням однофазних навантажень здійснюється мікро- контролером. В якості комутуючих елементів використовуються модулі IGBT-транзисторів. Момент часу для подачі імпульсу управління з мікроконтролера для відключення навантажень визначається з умови рівності нулю струму на відхідних кабелях навантажень, для включення навантажень - з умови рівності нулю струму на шинах понижувального трансформатора.

Винахід відноситься до області електротехніки, зокрема до електропостачання, і може бути використано в розподільних мережах 6 (10) / 0,4 кВ, що містять знижувальний трансформатор 6 (10) / 0,4 кВ, трифазні лінії 0,4 кВ, пов'язані з шинами знижувального трансформатора і передають електричну енергію від знижувального трансформатора до однофазних навантажень.

Відомий спосіб зниження втрат (пат. №2351049, публ. 27.03.2009 р), що полягає в зниженні коефіцієнта несиметрії струму в знижувальному трансформаторі і в трифазній лінії електропередач, яка живить знижувальну трансформаторну підстанцію, що має однофазні навантаження різної потужності, що відрізняється тим, що зниження коефіцієнта несиметрії струмів в фазах трифазної лінії і обмотках трансформатора здійснюється за допомогою перемикачів однофазних навантажень, підключених до шин знижувального трансформатора за допомогою вимикачів, управління якими здійснюється мікроконтролером, на аналогові входи якого поступають сигнали змінного струму з датчиків на стороні низької напруги трансформатора, при цьому мікроконтролер здійснює управління вимикачами, які перемикають навантаження з однієї фази на іншу на шинах знижувальної трансформаторної підстанції, виходячи з умови мінімізації коефіцієнта несиметрії струму, при цьому якщо сумарні значення струмів в фазах відрізняються від середнього значення струму, то частина навантажень з фази, що має більший струм, відключається від неї і включаються на фазу, що має менший струм, а конкретні навантаження, що підлягають переключенню, визначаються за допомогою мікроконтролера з умови близькості сумарних струмів в фазах їх середнього значення.

Недоліком даного способу є низька надійність внаслідок:

- наявності вимикачів, які не здатні забезпечити швидке включення і відключення навантажень фаз від шин знижувального трансформатора;
- великих значень струмів перехідних режимів при включенні і відключенні навантажень через неможливість точного визначення моменту підключення навантажень до шин знижувального трансформатора і їх відключення від шин знижувального трансформатора;
- неможливості контролю стану вимикачів, що приводить до одночасного включення вимикачів різних фаз на однофазне навантаження - виникнення міжфазного короткого замикання.

Завданням способу є підвищення надійності роботи понижувальної трансформаторної підстанції 6 (10) / 0,4 кВ.

Технічний результат, який досягається в процесі вирішення поставленого завдання, полягає в підвищенні надійності роботи понижувальної підстанції за рахунок зменшення максимального струму перехідних процесів при включенні і відключенні навантажень, а також в забезпеченні захисту трансформатора 6 (10) / 0,4 кВ та напівпровідникових модулів від міжфазних коротких замикань і збільшенні термінів служби трансформатора і напівпровідникових елементів.

Зазначений технічний результат досягається способом підвищення надійності роботи знижувальної трансформаторної підстанції в розподільних мережах 6 (10) / 0,4 кВ, що містять знижувальний трансформатор 6 (10) / 0,4 кВ, трифазні лінії 0,4 кВ, пов'язані з шинами знижувального трансформатора і передають електричну енергію від знижувального трансформатора до однофазних навантажень, мікроконтролер, керуючий підключенням однофазних навантажень до шин і їх відключенням від шин трансформатора знижувальної трансформаторної підстанції, сигнали на який надходять з датчиків струму, встановлених на кабелях, що з'єднують однофазні навантаження з шинами знижувального трансформатора і датчиків струму, встановлених на шинах знижувального трансформатора, вимикачі з приводами, встановлені на стороні високої напруги знижувального трансформатора, що полягає в зниженні струмів перехідних процесів при включенні і відключенні навантажень і недопущення міжфазного короткого замикання, при цьому в якості пристроїв підключають однофазні навантаження до шин і відключають їх від шин знижувального трансформатора використовуються напівпровідникові модулі на IGBT-транзисторах, управління станом яких здійснюється мікроконтролером, причому момент часу для подачі імпульсу управління з мікроконтролера для відключення транзисторів напівпровідникових модулів на IGBT-транзисторах визначається з умови

рівності нулю струму у відведених кабелях навантажень, момент часу для подачі імпульсу управління з мікроконтролера для включення транзисторів напівпровідникових модулів на IGBT-транзисторах визначається з умови рівності нулю струму на шинах понижувального трансформатора.

Таким чином, досягається:

- зниження струмів перехідних процесів при включенні і відключенні навантажень за рахунок використання модулів, що містять IGBT-транзистори і здійснення включення транзисторів в момент рівності нулю струму на шинах понижувального трансформатора і відключення в момент рівності нулю струму на відхідних кабелях, що з'єднують навантаження з шинами понижувального трансформатора;

- усунення міжфазного короткого замикання за рахунок блокування замикання транзисторів модулів інших фаз при включеному транзисторі модуля будь-якої фази.

Спосіб підвищення надійності роботи знижувальної трансформаторної підстанції в розподільних мережах 6 (10) / 0,4 кВ, що полягає в зниженні струмів перехідних процесів при включенні і відключенні навантажень і усунення міжфазного короткого замикання в розподільних мережах 6 (10) / 0,4 кВ, що містять знижувальний трансформатор 6 (10) / 0,4 кВ, трифазні лінії 0,4 кВ, пов'язані з шинами знижувального трансформатора і передають електричну енергію від знижувального трансформатора до однофазних навантажень, мікроконтролер, керуючий підключенням однофазних навантажень до шин і їх відключенням від шин трансформатора знижувальної трансформаторної підстанції, сигнали на який надходять з датчиків струму, встановлених на кабелях, що з'єднують однофазні навантаження з шинами знижувального трансформатора і датчиків струму, встановлених на шинах знижувального трансформатора і на відхідних кабелях навантажень, вимикачі з приводами, встановлені на стороні високої напруги знижувального трансформатора, що відрізняється тим, що в якості пристроїв, що включають однофазні

навантаження до шин і відключають і від шин знижувального трансформатора, використовуються напівпровідникові модулі на IGBT-транзисторах, управління комутацією яких здійснюється мікроконтролером, причому момент часу для подачі імпульсу управління з мікроконтролера для відключення транзисторів напівпровідникових модулів на IGBT-транзисторах визначається з умови рівності нулю струму в відведених кабелях навантажень, момент часу для подачі імпульсу управління з мікроконтролера для включення транзисторів напівпровідникових модулів на IGBT-транзисторах визначається з умови рівності нулю струму на шинах знижувального трансформатора [7].

2 СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ТРАНСФОРМАТОРНИХ СТАНЦІЙ

Трансформаторні станції (ТС) повинні забезпечувати відповідну точність трансформації струму за всіх режимів їх роботи. Як уже зазначалося, за перехідних режимів роботи значно зростають струмові похибки ТС внаслідок сильного насичення їх магнітних кіл за наявності аперіодичної складової в первинному надстрімі ТС. Для каскадних ТС на від-міну від одноступеневих ТС зниження вторинного навантаження не сприяє значно-му зменшенню максимальної перехідної похибки, оскільки перші ще й містять значний внутрішній індуктивний опір [8]. За таких умов можливі порушення роботи пристроїв захисту та автоматики.

Тому для зниження впливу аперіодичної складової струму та усунення залишкової магнітної індукції в осердя ТС запропоновано вводити немагнітний проміжок [9 – 18]. Такі ТС мають практично лінійну характеристику намагнічування, через що й отримали назву лінійних. Перевагами лінійних трансформаторів над трансформаторами з суцільним магнітопроводом є понижена залежність їх похибок від величини первинного струму, відсутність впливу залишкової магнітної індукції тощо. Однак введення немагнітного зазору зумовлює зростання похибок та зменшення потужності ТС порівняно з трансформатором з суцільним магнітопроводом.

Варто відмітити також залежність похибок лінійного ТС від його вторинного навантаження [19].

Великі похибки лінійного ТС зумовлюють труднощі у забезпеченні необхідно-го класу точності його роботи за нормальних та перехідних режимів.

В [20] розглянуто вплив отворів у магнітопроводі ТС на його роботу за усталених та перехідних режимів. Таке виконання магнітопроводу порівняно з замкнутим осердям дозволяє значно зменшити похибки трансформатора за перехідних режимів при великих кратностях первинного струму та постійних

часу згасання його аперіодичної складової. Однак похибки за ustalених режимів все ж будуть більшими.

Крім ТС з одним чи декількома суцільними немагнітними проміжками застосовуються і трансформатори з частковим немагнітним проміжком у магнітопроводі. За ustalеного режиму короткого замикання ці трансформатори працюють із незначною похибкою, зумовленою нерозрізаною частиною осердя, а у перехідному режимі допустима похибка трансформатора забезпечується його розрізаною частиною.

Таке виконання ТС з частковими немагнітним проміжками в осерді дозволяє підключати до них як вимірювальні прилади, так і пристрої релейного захисту й автоматики. Недоліком же таких трансформаторів є спотворення кривої періодичної складової вторинного струму за перехідних режимів [21].

У каскадних ТС виконання осердя трансформатора верхнього ступеню з частковим немагнітним проміжком супроводжується певними труднощами, зумовленими гранично допустимим перерізом магнітопроводу. Прийнятний згідно конструктивних умов переріз все ж зумовлює значну абсолютну похибку трансформатора. Для зменшення перерізу осердя верхнього ступеню його частину, призначену для вимірювань, виконують із невеликим немагнітним проміжком та застосовують ємні-сну компенсацію похибок [22].

Магнітопроводи нижнього ступеню каскадного ТС з вторинними обмотками, призначеними для підключення пристроїв РЗА, доцільно виконувати з невеликим немагнітним проміжком, що забезпечує лінійність їх характеристик. Довжину цих проміжків обирають з умов обмеження магнітної індукції в осерді граничним значенням та усунення впливу залишкової магнітної індукції [23].

Для зменшення похибок лінійного ТС застосовують ємнісну компенсацію його струму намагнічування та зменшення впливу магнітного потоку розсіяння вторинної обмотки, що полягає у під'єднанні до виводів цієї обмотки компенсуючого активноемнісного навантаження. У каскадних ТС

ємнісну компенсацію застосовують для верхнього та за наявності – проміжного ступенів [24 – 27].

Внаслідок уведення ємнісної компенсації у вторинному струмі компенсованого каскадного ТС крім вимушених періодичної та аперіодичної складових струму з'являються ще й вільні згасаючі гармонічні складові. Їх амплітуда, частота і ступінь згасання залежать від параметрів елементів каскадного ТС [28, 29]. Ці вільні згасаючі складові можуть спричинити помилкові спрацювання пристроїв РЗА, що вважається одним із основних недоліків компенсованого ТС.

Для зменшення впливу вільних гармонічних складових необхідне застосування частотних фільтрів, встановлених перед вимірними органами релейних захистів. Як зазначається в [30], для запобігання неправильної роботи захисту достатньо збільшити частоту вільних гармонічних складових до 180 – 200 Гц. Для цього магнітопровід верхнього ступеню каскадного ТС виконують комбінованим у вигляді двох осердь з різними немагнітними проміжками, що дозволяє значно зменшити вплив похибок таких ТС на роботу швидкодійного захисту.

В [31, 32] наведено рівняння струмів намагнічування одноступеневих та каскадних ТС з лінійними характеристиками намагнічування за перехідних режимів роботи. Як зазначають автори, отримані результати також можна використовувати для якісного аналізу перехідних режимів роботи ТС з нелінійними характеристиками намагнічування.

Впровадження в ЕЕС цифрових пристроїв вимірювання, РЗА та керування постійно супроводжувалося й підвищенням вимог до надійності та технічних характеристик вимірювальних ТС електромагнітного типу. Ряд їх недоліків, таких як явища магнітного гістерезису, залишкового намагнічування та насичення магнітопроводів, що обумовлюють погіршення точності вимірювання струму, труднощі виконання високовольної ізоляції ТС надвисокої напруги, низька пожежна стійкість паперово-оливної ізоляції,

втрата ізоляційних властивостей у процесі експлуатації та інші, зумовили необхідність створення якісно нових типів вимірювальних перетворювачів струму [28]. Одними з таких перетворювачів є оптико-електронні ТС (ОТС).

Принцип роботи таких ТС полягає у використанні магнітооптичного ефекту Фарадея – обертання площини поляризації лінійно поляризованого світла в оптично активному середовищі під дією створеного вимірюваним струмом магнітного поля. Вимірявши кут повороту площини поляризації світла, можна визначити величину напруженості магнітного поля і відповідно значення струму, який створив це поле. Знак кута зв'язаний з напрямом магнітного поля і не залежить від напрямку розповсюдження променя світла відносно цього поля [16].

В якості оптично активного середовища в комірках Фарадея використовують скло з вмістом оксиду свинцю або плавлений кварц. Досить високу магнітну чутливість мають також ферит-гранатові плівки [21].

Вимірювання кута повороту площини поляризації світла в змінному магнітно-му полі необхідно проводити окремо для додатного та від'ємного періодів первинного струму з подальшою синхронізацією результатів [6].

Таким чином, магнітооптична комірка Фарадея, що знаходиться під високою напругою, та заземлений приймальний пристрій зв'язані між собою лише світловим потоком.

Наведемо коротко конструктивне виконання ОТС. Оптичний світловод складається з циліндричного скляного волокна, розміщеного в захисній оболонці. Скляне волокно ж містить світлопровідне середовище, що виконане з чистого кварцового скла і поміщене в оболонку з іншого скла чи полімеру з меншим показником заломлення для внутрішнього відбиття світлового променя.

Крім оптичного давача в якості давача вхідної інформації в ОТС також можуть використовувати давачі на основі ефектів Холла, Гаусса, пояс Роговського тощо. Вхідний сигнал від цих давачів за визначеним законом

модулює інтенсивність світлового потоку, який передають по оптичному волокну до приймального пристрою на потенціалі землі. В останньому здійснюється зворотна трансформація світлового потоку у вимірний електричний сигнал.

Сьогодні випускають ОТС на робочу напругу від 69 до 765 кВ з шириною їх вхідного частотного діапазону від 0,5 Гц до 6 кГц та класами точності 0,2S для ви-мірних кіл і 5P для кіл РЗА.

Основними перевагами ОТС є:

- можливість вимірювання як змінного, так і постійного й імпульсного струмів різних рівнів робочих напруг електричних мереж;
- малоінерційне, з високою точністю, вимірювальне перетворення сигналів за відсутності явищ гістерезису, магнітного насичення та залишкового намагнічування,
- характерних для електромагнітних ТС;
- широкий динамічний та частотний діапазони вимірювань, що дозволяє проводити повний аналіз кількості та якості електроенергії в частині її гармонічного складу, а також аналіз перехідних процесів в ЕЕС;
- можливість інтеграції у вимірювальні та інформаційні системи з використанням різних інтерфейсів;
- малі масогабаритні параметри трансформаторів, повна їх екологічна, пожежо-, вибухо- та електробезпека.

Однак на думку фахівців, ряд властивостей ОТС, зокрема, широка смуга пропускання сигналу, висока стійкість до електромагнітних завад, довговічність, стабільність параметрів, простота та надійність конструктивного виконання, низька сприйнятливість до впливу вібрацій і зміни температури, не дають їм значних переваг, оскільки притаманні й традиційним ТС.

Тобто витікає, що ОТС доцільно застосовувати, в першу чергу, в мережах високих та надвисоких напруг, коли вартість ізоляції звичайного ТС є

дуже високою, за великих кратностей первинного струму, за яких традиційні трансформатори входять у режим насичення.

До основних же недоліків ОТС можна віднести необхідність встановлення джерел живлення для блоків перетворення електричного сигналу в оптичний і навпаки, незначна потужність вихідних кіл для приведення в дію електромеханічних захистів і необхідність використання додаткових пристроїв для її підвищення, висока вартість виготовлення.

Таким чином, впровадження ОТС залишається перспективним рішенням, однак на сьогоднішній час для наших ЕЕС необхідно забезпечити відповідну технічну і нормативну базу для експлуатації таких типів ТС.

Пояс (катушка) Роговського являє собою тороїдальний соленоїд з осердям з неферромагнітного матеріалу, на який рівномірно намотана вторинна обмотка. Соленоїд охоплює струмоведучий провід, струм якого необхідно виміряти. Відсутність магнітопроводу у поясі Роговського забезпечує лінійність його характеристик, високу точність і надійність. Катушки можуть виконуватися як рознімними, так і нерознімними. З'єднання кінців рознімних катушок може здійснюватися встик або внахльост.

Оскільки напруга на виході катушки Роговського пропорційна похідній струму по часу, то для отримання кривої струму використовують відповідні аналогові або цифрові інтегратори.

Основними перевагами поясу Роговського є його низька вартість, можливість вимірювання струмів у широкому частотному діапазоні, відсутність насичення осердя, мала потужність споживання, низька температурна залежність. Його ж недоліками є чутливість до зовнішніх магнітних полів, можливість вимірювання лише змінного струму, наявність зсуву по фазі між первинним струмом та вторинною напругою, що зумовлює необхідність використання інтеграторів для отримання вихідного сигналу [79, 74, 80].

Підводячи підсумки, завдяки своїм перевагам катушки Роговського зарекомендували себе як надійні давачі струму. Закордонними фірмами-

виробниками (Eltek, ABB Ais, Taehwatrans Co., Rocoil Rogowski Coils тощо) представлена різноманітна типологія котушок Роговського для застосування в ЕЕС. Також перспективним напрямом є розробка цифрових ТС з поясом Роговського у якості вимірювального давача струму.

2.1 Загальна характеристика системи захисту від перенапруг за обриву вторинного кола трансформатора струму

На основі запропонованих нами способів захисту ТС та його вторинних кіл від перенапруг, які виникають за обриву цих кіл, [7 – 9] була розроблена проста і недорога СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС з застосуванням у якості ОПН пробивного запобіжника з захисним повітряним іскровим проміжком. Пробивний запобіжник виготовляють серійно в Україні. Він має відповідний сертифікат для застосування в діючих електроустановках 220/380 В, що підключені до мережі з ізольованою нейтраллю. Запобіжник захищає ці електроустановки від перенапруг, що проникають з високовольтною у низьковольтну обмотку за пошкодження ізоляції силового трансформатора. Режими роботи даної СЗ для різних типів ТС розглянуті нижче.

Оскільки запропонована СЗ має працювати в діючих електроустановках, то вона повинна задовольняти вимогам, що наведені в нормативних документах стосовно цих електроустановок. Очевидно, що детальний розгляд остаточної відповідності запропонованої нами СЗ щодо вимог її експлуатації в діючих електроустановках буде проведено після випробувань промислового взірця системи. Нижче розглянемо три головні вимоги до запропонованої системи (аналогічно вимогам до систем РЗА електроустановок): селективність, швидкодія, надійність. Селективність СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС буде забезпечуватись безпосереднім підключенням вхідних затискачів окремих ОПН до затискачів окремих вторинних обмоток ТС (за наявності декількох осердь у ТС), а також відповідним узгодженням параметрів

спрацювання ОПН з параметрами налаштування пристроїв РЗА та параметрами кіл струму, що живляться від окремих вторинних обмоток ТС. Швидкодія СЗ буде забезпечуватись застосуванням чутливого швидкодійного електромеханічного реле, контакти якого шунтуватимуть накоротко затискачі вторинної обмотки ТС після спрацювання ОПН. Надійність буде забезпечуватись за рахунок розміщення пристрою ОПН на опорі ТС безпосередньо біля коробки затискачів вторинних обмоток ТС. За рахунок малої відстані (малої довжини контрольного кабелю (~ до 1 м) та, таким чином, обмеження доступу будь-кого до ОПН і його кабелю, яким вхідні затискачі ОПН підключені до вторинних затискачів ТС, практично виключена можливість хибного спрацювання чи відмови у штатному спрацюванні СЗ. Очевидно, що аналітичний розрахунок апаратного напрацювання на відмову СЗ буде здійснений після виготовлення промислового взірця системи, коли буде відома елементна база промислового взірця, результати його випробувань тощо.

СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС (далі СИСТЕМА) призначена для захисту від дії перенапруг вище 1000 В, що виникають на затискачах вторинної обмотки даного ТС за обриву кіл струму, підключених до цих затискачів.

Від дії перенапруг СИСТЕМА захищає:

- персонал служб РЗА діючих електроустановок, що працюють у вторинних колах даного ТС (наладка, ремонт тощо);
- ізоляцію вторинної обмотки даного ТС, до затискачів якої підключені кола струму, в яких можливий обрив;
- ізоляцію кіл струму (пристроїв РЗА, вимірювання, обліку електричної енергії тощо), в яких можливий обрив і які підключені до затискачів даного ТС.

СИСТЕМІ для обмеження рівня перенапруг на затискачах вторинної обмотки ТС пропонується застосувати в якості ОПН пробивний запобіжник одноразової дії типу ПП-А/3 (промислове серійне виробництво в Україні, вартість ~ 300 грн.). СИСТЕМА обмежує напругу на затискачах

вторинної обмотки даного ТС до рівня напруги спрацювання (351-600 В, 50 Гц) пробивного запобіжника типу ПП-А/3. Відстань між електродами повітряного іскрового проміжку запобіжника становить $d = (0,08+0,02)$ мм. Дані щодо часу $t_{\text{П}}$ пробиття такого проміжку – відсутні. Однак, враховуючи незначну величину d , за нашими попередніми даними $t_{\text{П}} \sim 1-2$ мкс. За такого часу, як показали результати комп'ютерного моделювання режимів роботи СИСТЕМИ для основних типів ТС (опорні, вбудовані, шинні, каскадні тощо) в мережах $10 \div 750$ кВ, 50 Гц, навіть за первинних струмів ТС, рівних десятикратній величині від номінального значення, СИСТЕМА забезпечує ефективне обмеження напруги до рівня напруги пробиття даного запобіжника $U_3 = 351-600$ В, 50 Гц, що суттєво менше за 1000 В, 50 Гц (напруга випробування ізоляції вторинних кіл ТС [11]).

Запобіжник витримує після пробиття струм $I_{\text{ЗМ}} = 200$ А, 50 Гц за максимальний час $t_{\text{ЗМ}} = 30$ хв. [28]. За номінального вторинного струму ТС $I_{\text{2ТСН}} = 5$ А, 50 Гц, кратність струму запобіжника $K_{\text{ІЗ}} = I_{\text{2ТСН}} / I_{\text{ЗМ}} = 5/200 = 0,025$. Активна потужність, що виділяється в іскровому проміжку запобіжника, рівна $U_{\text{П}} \cdot I_{\text{2ТСН}}$. Враховуючи, що для коротких іскрових проміжків ($d \leq 1$ мм) напруга $U_{\text{П}}$ практично не залежить від величини струму, тому потужність $P_{\text{П}}$ буде пропорційна струму $I_{\text{2ТСН}}$. Тоді за номінального струму $I_{\text{2ТСН}}$ активна потужність $P_{\text{П}}$ рівна $P_{\text{П}} = K_{\text{ІЗ}} \cdot P_{\text{ПМ}} = 0,025 \cdot P_{\text{ПМ}}$.

Очевидно, що допустимий час $t_{\text{ЗД}}$ протікання через запобіжник струму $I_{\text{ЗД}}$ обернено-пропорційний до величини струму $I_{\text{ЗД}}$. Тоді орієнтовно маємо

$$t_{\text{ЗД}} = (1 / K_{\text{ІЗ}}) \cdot t_{\text{ЗМ}} = (1/0,025) \cdot t_{\text{ЗМ}} = 40 \cdot t_{\text{ЗМ}} = 40 \cdot 30 = 1200 \text{ (хв)} = 20 \text{ (год)}.$$

Тобто тривалість протікання струму становить 0,1 від півперіоду промислової частоти. В даному ви-падку, за номінального первинного струму ТС $I_{\text{1ТСН}}$ маємо орієнтовно допустимий час протікання струму через запобіжник $t_{\text{ЗДН}} = 10 \cdot t_{\text{ЗД}} = 10 \cdot 20 = 200$ (год).

ОПН – запобіжник типу ПП-А/3 з послідовно увімкненим малоіндуктивним бетонним резистором (опір резистора рівний 2 Ом) – підключають до затискачів вторинної обмотки ТС. Резистор розрахований на спрацювання запобіжника типу ПП-А/3 за протікання в ньому десятикратного вторинного струму $10 \cdot I_{2\text{тсн}} = 50 \text{ А}$, 50 Гц, з наступним швидким (до 0,1 с) шунтуванням ОПН контактами електромеханічного реле СИСТЕМИ.

Тривалий режим роботи ТС з розімкненими його вторинними колами, незважаючи на застосування ОПН, є небажаним, тому що за такого режиму має місце глибоке насичення феромагнітного осердя ТС, в результаті чого різко зростають втрати активної потужності в осерді трансформатора. Це, в свою чергу, за рахунок зростання температури осердя, може призвести до пошкодження його ізоляції (як і внутрішньої між пластинами електротехнічної сталі («пожежа сталі»), так і головної – стосовно обмоток на заземленому осерді), в результаті чого ТС руйнується – виникає внутрішнє коротке замикання обмоток ТС на землю. У більшості випадків ТС вибухає і ремонту не підлягає. У цьому випадку матеріальні витрати на відновлення нормальної експлуатації приєднання, де був пошкоджений ТС (придбання та встановлення нового ТС та іншого електрообладнання, перерва електропостачання споживачів тощо) набагато порядків більші вартості пропонованої СИСТЕМИ. Тому за спрацювання ОПН необхідно негайно замикати накоротко між собою затискачі вторинної обмотки ТС, до яких підключений даний ОПН. Таке замикання в СИСТЕМІ виконують контакти електромеханічного реле, що запускається електронним пристроєм, котрий фіксує спрацювання ОПН. Водночас, інші контакти цього реле запускають аварійну сигналізацію підстанції для сповіщення чергового на щиті управління підстанції.

Параметри СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС повинні бути узгоджені з параметрами налаштування пристроїв РЗА приєднання підстанції, струм якого підведений до первинної обмотки даного ТС. Суть узгодження полягає в тому, що СИСТЕМА не повинна спрацювати за

протікання струму в первинній обмотці даного ТС, коли відсутній обрив кіл навантаження (РЗА, вимірювання тощо), підключених паралельно разом з СИСТЕМОЮ до затискачів вторинної обмотки даного ТС.

Як правило, повна типова номінальна потужність навантаження, підключеного до вторинної обмотки ТС не більше 40 В·А. Тоді напруга на затискачах вторинної обмотки ТС за номінального вторинного струму $I_{2\text{тсн}5} = 5$ А становить $U_{2\text{н}5} = 8$ В, а за номінального вторинного струму $I_{2\text{тсн}1} = 1$ А – $U_{2\text{н}1} = 40$ В. Очевидно, що за таких умов СИСТЕМА не спрацюватиме, оскільки мінімальна напруга пробиття запобіжника типу ПП-А/3 становить $U_{\text{змін}} = 351$ В [98, 100], що значно більше за 8 В ($U_{2\text{н}5}$) та 40 В ($U_{2\text{н}1}$). Не спрацюватиме запобіжник і за десятикратного струму $I_{2\text{тс}50} = 50$ А, бо відповідна цьому струму напруга становить $U_{2_50} = 80$ В і коефіцієнт відведення СИСТЕМИ за струмом $I_{2\text{тс}50} = 50$ А та $U_{\text{змін}} = 351$ В становить

$$K_{\text{в}} = U_{\text{змін}} / U_{2_50} = 351/80 = 4,4.$$

На наш погляд, з урахуванням аперіодичної складової у вторинному струмі ТС $I_{2\text{тс}50} = 50$ А для надійного відведення СИСТЕМИ достатньо значення

$$K_{\text{в}} = U_{\text{змін}} / U_{2_50} = 3,0.$$

Тому для усіх ТС з номінальними вторинним струмом 5 А та вторинним навантаженням до 40 В·А, за умови, що максимальний первинний аварійний струм ТС не більше десятикратного від номінальної величини, можна застосовувати СИСТЕМУ з пробивним запобіжником типу ПП-А/3 з мінімальною напругою пробиття

$$U_{\text{змін}} = 351 \text{ В.}$$

Перед випробуванням роботи СИСТЕМИ, а також періодичної перевірки її роботи, необхідно експериментально перевірити рівень напруги спрацювання (пробиття) запобіжника типу ПП-А/3. Рекомендації щодо експериментальної перевірки рівня напруги спрацювання запобіжника типу ПП-А/3 наведені в [11].

Для ТС з номінальним вторинним струмом $I_{2\text{тсн1}} = 1$ А та вторинним навантаженням 40 В·А за десятикратного первинного струму трансформатора напруга на затискачах вторинної обмотки становитиме $U_{2(1)10} = 400$ В. В даному випадку, за коефіцієнта відведення СИСТЕМИ $K_B = 3$ необхідна мінімальна напруга пробиття запобіжника типу ПП-А/3 становитиме $U_{\text{змін}} = K_B \cdot U_{2(1)10} = 3 \cdot 400 = 1200$ В, що більше 1000 В. Для СЗ від перенапруг більше 1000 В максимальна напруга спрацювання СИСТЕМИ не повинна бути більша від 1000 В. Таким чином, в даному випадку, застосування в СИСТЕМІ запобіжника типу ПП-А/3 не допустиме. Необхідно застосовувати більш стабільні (за напругою спрацювання) ОПН без іскрового проміжку. На жаль, поки що в доступній літературі не знайдено таких потужних (з напругою спрацювання до 1000 В) ОПН без іскрового проміжку. Як тільки почнуть серійно виготовляти такі відносно дешеві ОПН, їх можна буде встановити в СИСТЕМУ замість пробивного запобіжника типу ПП-А/3 і застосувати таку СИСТЕМУ для ТС з номінальним вторинним струмом 1 А.

Очевидно, що в даному випадку необхідно провести узгодження такої системи з налаштуванням пристроїв РЗА (описано вище), врахувавши час $t_{\text{ш}} = 0,1$ с (час шунтування СИСТЕМОЮ за її спрацювання затискачів вторинної обмотки ТС) під час протікання через ОПН номінального струму 1 А за обриву вторинних кіл ТС.

Нижче буде наведено результати попередньої оцінки можливості застосування для ТС різних типів серійних ОПН без іскрового проміжку, які застосовуються для захисту електрообладнання від дії грозових та комутаційних перенапруг.

Очевидно, що наведені вище розрахункові параметри та їх узгодження будуть підтвержені результатами експериментальних досліджень, проведених на промисловому взірці СИСТЕМИ.

Для симуляції режимів роботи одноступневих ТС застосовано розрахункову схему, в якій до затискачів вторинної обмотки ТС паралельно підключені вхідні затискачі ОПН та кола навантаження Н. Схема ОПН, його технічні характеристики, наведені вище, однакові для усіх основних типів одноступневих ТС. У розрахункових схемах досліджуваних типів ТС в схемі ОПН закладено пробивний запобіжник FV типу ПП-А/3 з максимальною напругою пробиття (спрацювання) $U_{\text{змакс}} = 600 \text{ В}$, 50 Гц, та резистор $r_{\text{ш}} = 2 \text{ Ом}$. Комп'ютерну симуляцію всіх режимів роботи ТС у розділі 4 реалізовано на програмному модулі «FASTMEAN». Це викликано тим, що модуль «FASTMEAN» більш швидкодійний (ОС Windows), ніж програмний комплекс «RE» (ОС DOS).

Для ТС типу ТОМ-765 дослідимо окремо режими роботи за розімкнених вторинних вимірювальної та захисної обмоток нижнього ступеню. До затискачів усіх вторинних обмоток нижнього ступеню ТС (одна вимірювальна і чотири захисні об-мотки) паралельно підключені вхідні затискачі ОПН та кола струму навантаження Н аналогічно вторинній обмотці, розміщеній на осерді одноступеневого ТС. Для ТС типу ТОМ-765 у симульованій схемі ОПН СЗ аналогічно розглянутим вище одноступневим ТС застосовуємо пробивний запобіжник FV типу ПП-А/3 з максимальною напругою пробиття (спрацювання) $U_{\text{змакс}} = 600 \text{ В}$, 50 Гц, та резистор $r_{\text{ш}} = 2 \text{ Ом}$. Комп'ютерну симуляцію усіх режимів роботи ТС типу ТОМ-765 реалізовано на програмному комплексі «FASTMEAN». Симуляція режимів для каскадного ТС з під'єднаною СЗ проводилась, як і для одноступневих ТС, за підведення струму поштовхом до первинної обмотки ТС.

2.2 Методи дослідження теплових процесів в обмотках трансформатора

Відмінною рисою вивчення теплових процесів в обмотках трансформатора є метод їх дослідження. По методу дослідження роботи розділяють на експериментальні та теоретичні.

Особливої уваги вимагають експерименти, що демонструють процеси в обмотках трансформаторів, які були проведені в Всеукраїнському інституті трансформаторобудування (ВІТ). Проте в теперішній час експериментальні методи дослідження майже не застосовуються через високу вартість обладнання.

Теоретичні методи дослідження теплових процесів в обмотках трансформатора підрозділяються на: аналітичні методики, чисельне моделювання, та системний аналіз. Аналітична методика базується на аналогії теплових та електричних явищ. Змінюючи опори паралельних ділянок електричних ланцюгів, досягається встановлення електромагнітного поля ідентичного температурному полю аналогічної моделі. Проте, ця методика виключає можливість розрахунку витрати масла через обмотку трансформатора та виконання гідравлічного аналізу системи. Системний аналіз базується на системах рівнянь, в яких враховані сумарні втрати в системі, основні гідравлічні та теплофізичні закони.

Для проведення досліджень теплових процесів в дискових обмотках трансформатора були обрані параметри (рис. 2.1, 2.2) та чисельне моделювання в якості метода дослідження.

В роботі прийняті наступні припущення, які сформульовані Ласло Імре:

- умови теплообміну над диском та під ним однакові;
- теплофізичні властивості міді та ізоляції не залежать від температури;
- усі котушки обмотки виділяють рівну кількість теплоти.

2.3 Фізичні основи природного масляного охолодження

Ескіз контуру масляного охолодження зображено на рисунку 2.3. Процес тепловіддачі пояснюється процесами, що відбуваються в обмотці. Маслу, яке увійшло в нижню частину обмотки в точці А, при проходженні по шляху А - В уздовж обмотки передається в одиницю часу кількість теплоти P . Ця кількість теплоти, передана з поверхні обмотки при середній теплоємності масла c і масовому витраті G підвищить температуру масла на $\Delta\vartheta_{to}$. Тоді згідно рівняння теплового балансу

$$P = Gc \Delta\vartheta_{to}.$$

Оскільки щільність масла

$$\rho = \rho_0 \frac{1}{1 + \beta\vartheta} \approx \rho_0 \left(1 - \beta\vartheta \right)$$

з підвищенням температури зменшується, нагріте масло піднімається вгору і на його місце знизу надходить холодне масло. Нагріте масло в точці С входить в радіатор, де в одиницю часу віддає навколишньому середовищу кількість теплоти P . В результаті масло охолоджується, його щільність зростає і в точці D воно виходить з радіатора. Охоложене масло в точці А знову надходить в обмотку і процес повторюється.

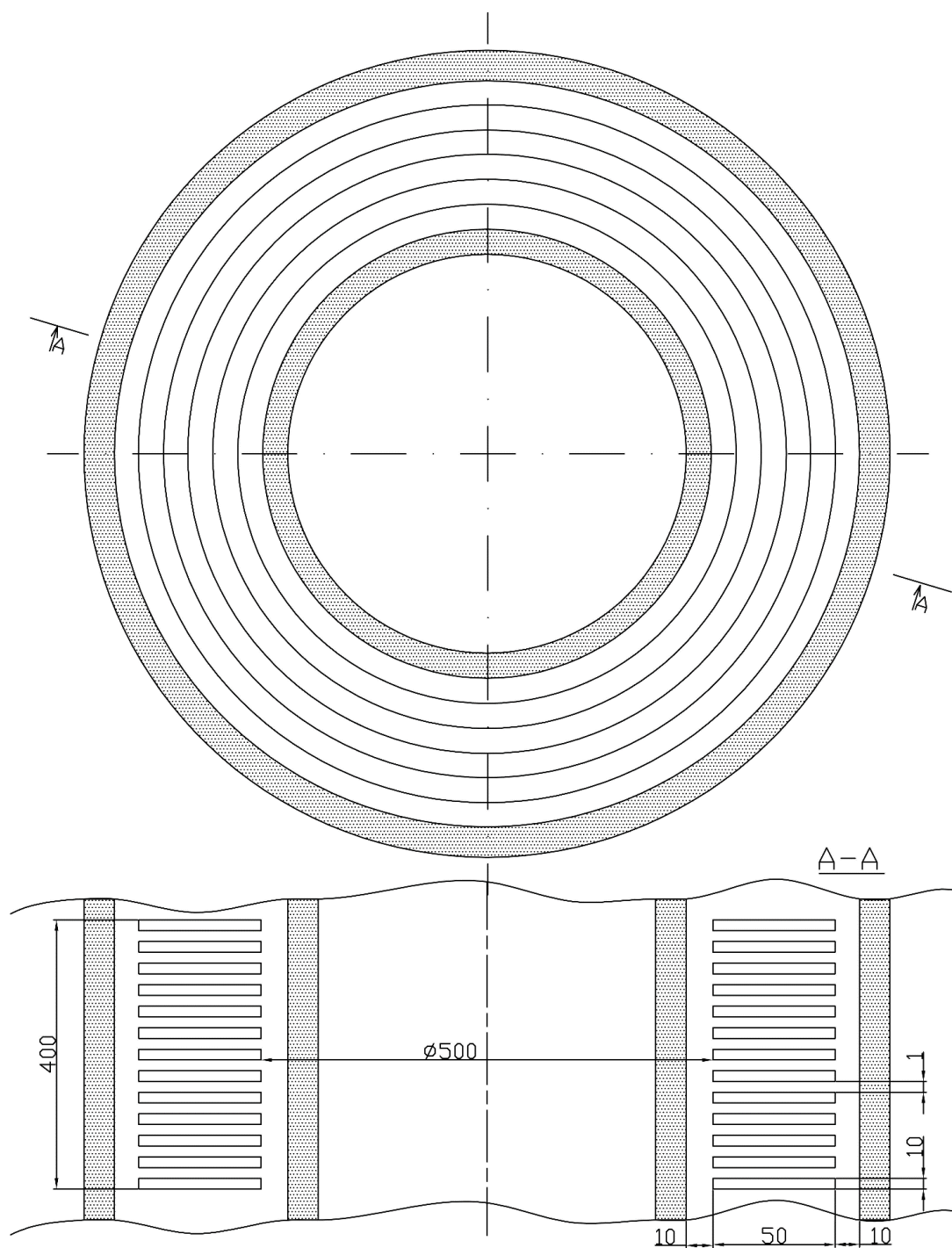


Рисунок 2.1 – Принципова схема обмотки трансформатора

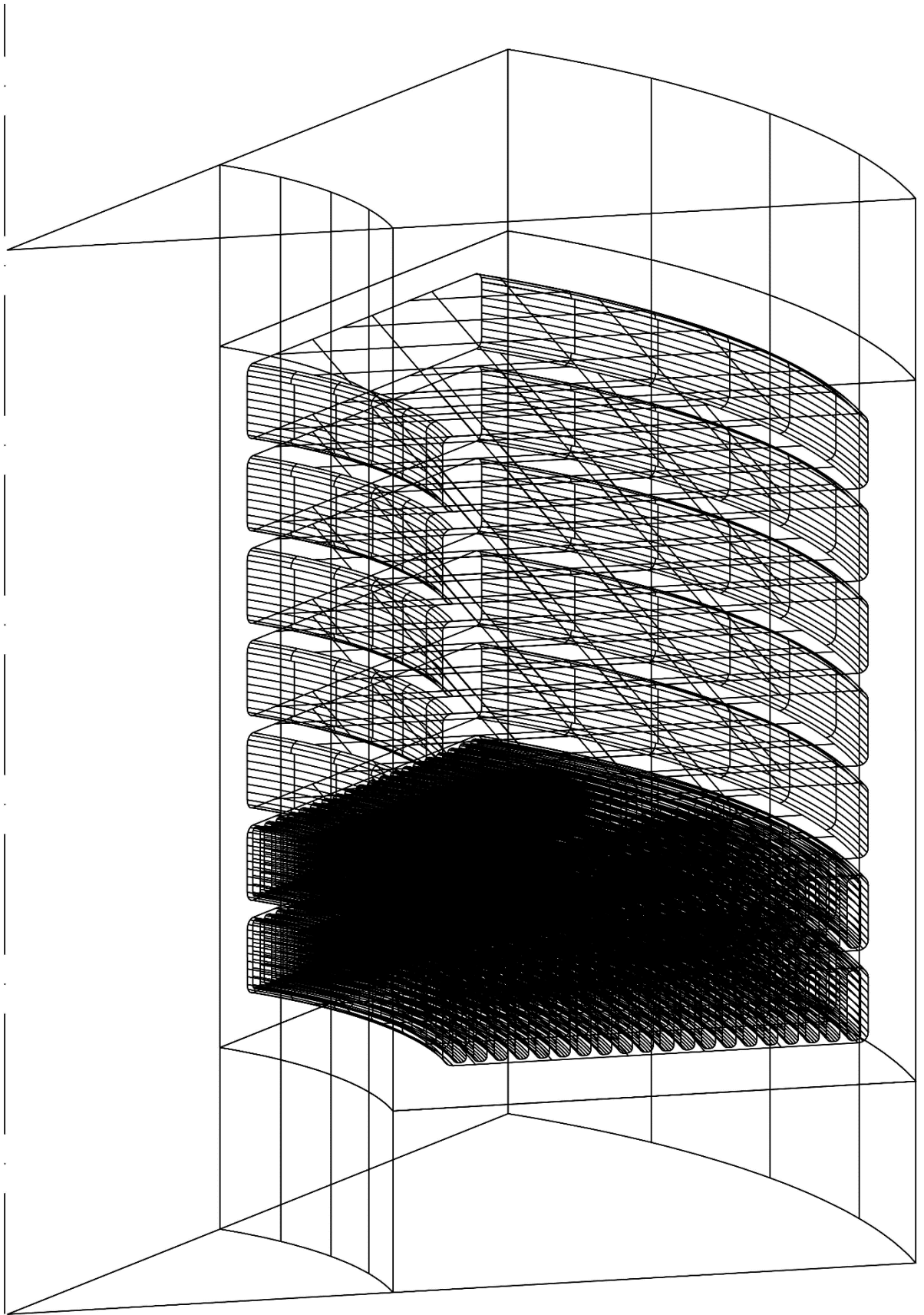


Рисунок 2.2 – Об'ємний виріз дискової обмотки

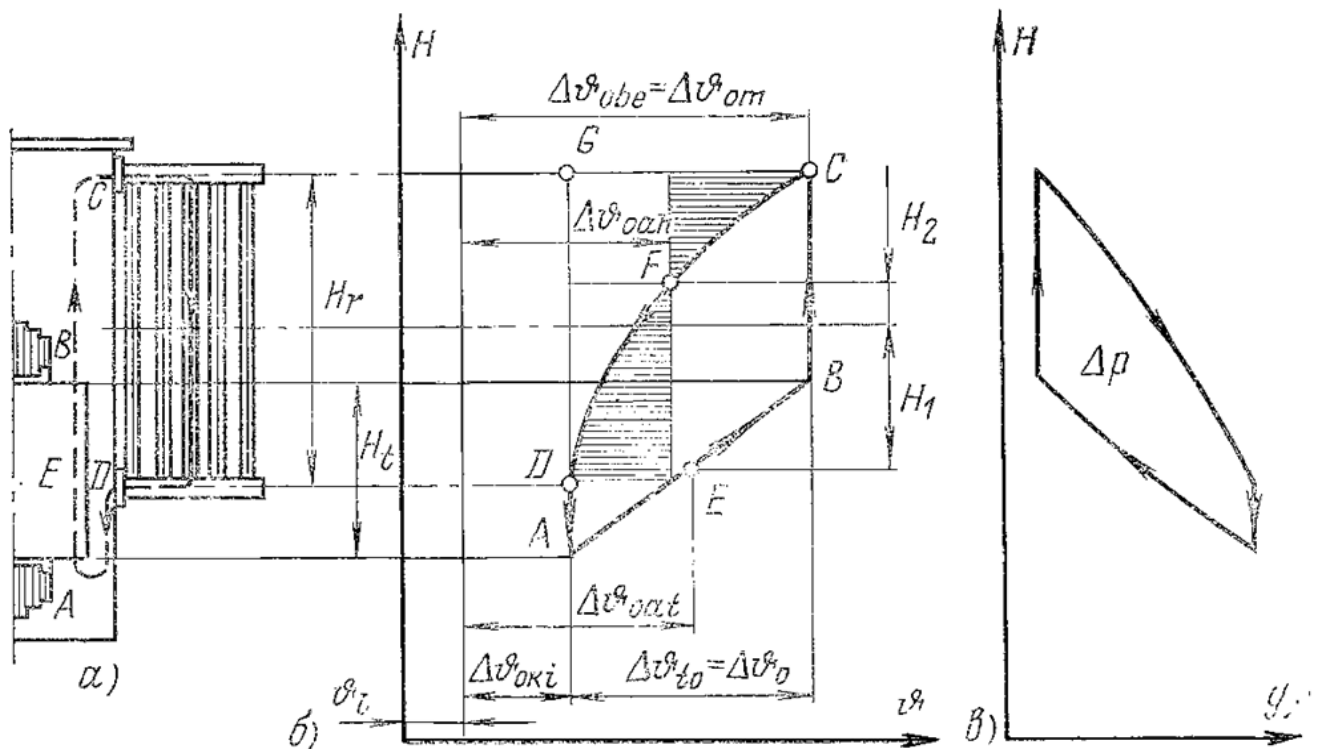


Рисунок 2.3 – До розгляду фізичних основ процесу природної циркуляції масла

На рисунку 2.3: а - ескіз контуру циркуляції масла; б - діаграма температури масла ϑ в контурі циркуляції в системі координат ϑ - H ; в - діаграма розподілу питомої ваги масла ρ в контурі циркуляції, в системі координат ρ - H .

У сталому режимі графічне зображення даного процесу в системі координат ϑ - H представляє собою замкнуту криву (рис.2.3, б), яка має назву діаграми розподілу температур в контурі циркуляції масла, або скорочено температурна петля.

Якщо для масла відома залежність

$$\rho = f(\vartheta),$$

то процес нагрівання та охолодження масла може бути зображений у вигляді залежності $g\rho = f(H)$,

де g - нормальне прискорення вільного падіння;

$g\rho$ - питома вага масла (рис.2.3, в).

У сталому режимі на різних висотах замкнутого контуру охолодження температура буде різна, відповідно буде змінюватися і щільність масла, тобто вона буде функцією висоти. Залежність $g\rho = f(H)$ є замкнутою кривою, яка має назву діаграми розподілу питомої ваги масла в контурі циркуляції або скорочено петлі тиску. Площа, охоплена кривою ABCD, пропорційна підйомній силі, яка підтримує циркуляцію, тобто гравітаційному тиску, що діє в контурі циркуляції і зумовленого різницею щільностей холодного і нагрітого масла. Кругообіг потоку масла з масовим витратою G забезпечується за рахунок гравітаційного тиску

$$\Delta p = \oint \rho g(H) dH.$$

Гравітаційний тиск Δp врівноважує гідравлічний опір, який виникає при циркуляції масла. Якщо знехтувати залежністю теплоємності від температури, то отримаємо, що при відведенні однієї кількості теплоти в одиницю часу добуток $G\Delta\vartheta_{t_0}$, тобто осьовий перепад температури масла в активній частині, зробити мінімальним з тим, щоб нормоване стандартами найбільше перевищення температури масла було ненабагато більше перевищення середньої температури масла в радіаторі $\Delta\vartheta_{oah}$ і щоб відповідно можна було збільшити логарифмічну різницю температур в радіаторі $\Delta\vartheta_{rk}$, яка істотно впливає на його масу і вартість. Малі значення ϑ_{t_0} можна отримати, якщо збільшити G . Для збільшення G необхідно знизити гідравлічний опір контуру циркуляції або збільшити Δp [1].

2.4 Граничні умови в дискових обмотках силового трансформатора

Як відомо, розподіл температури в рідині буде залежати від початкових умов, граничних умов, геометрії моделі та теплового навантаження на модель. Таким чином, якщо змінювати лише граничні умови при решті незмінних, то є зрозумілим, що зміна розподілу температури в моделі, що досліджується, продемонструє вплив граничних умов на розподіл температури охолоджуючої рідини в обмотках трансформатора. Нижче приведено геометричні параметри моделі, що досліджується (рис.2.4) [119].

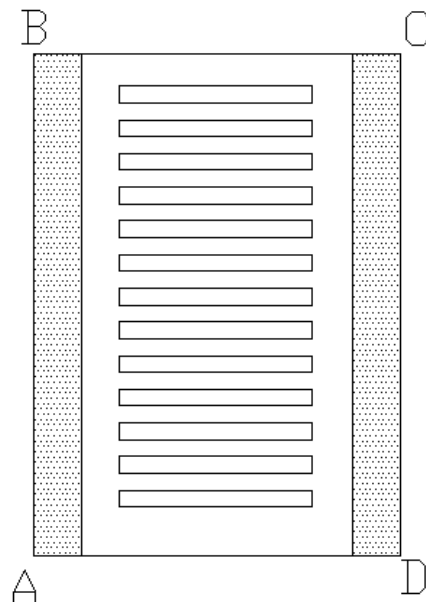


Рисунок 2.4 – Геометрична схема обмотки трансформатора

Тепловіддача зі стінок бака (AB та CD) буде здійснюватися головним чином завдяки випромінюванню, тому що бак є гладкостінним та без додаткових радіаторів. Тепловіддача зі стінок не перевищує 5%. Зважаючи на те, що тепловіддачі через поверхню AD не буде, то моделювання зводиться до визначення розподілу температури охолоджуючого середовища на поверхні BC.

Ширина перетину моделі складає 0,06 м. Кількість котушок – 40. Площа поверхні кожної котушки дорівнює $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Початкові умови при вирішенні цієї моделі:

- при $\tau=0$, $t_m=60^\circ\text{C}$; при $\tau=\tau_{\text{кін}}$, $t_m=t_{\text{мк}}$;
- при $\tau=0$, $t_{\text{нс}}=30^\circ\text{C}$; при $\tau=\tau_{\text{кін}}$, $t_{\text{нс}}=30^\circ\text{C}$;
- при $\tau=0$, $q_v=3500 \text{ Вт/м}^2$; при $\tau=\tau_{\text{кін}}$, $q_v=3500 \text{ Вт/м}^2$,

де τ – час дослідження, с,

$\tau_{\text{кін}}$ – кінцевий час дослідження (теплообмінні процеси переходять на стаціонарну ділянку), с,

t_m – температура масла на виході з моделі, $^\circ\text{C}$,

$t_{\text{мк}}$ – температура масла в момент часу $\tau_{\text{кін}}$, $^\circ\text{C}$,

$t_{\text{нс}}$ – температура навколишнього середовища, $^\circ\text{C}$,

q_v – густина теплового потоку, Вт/м^2 .

Таким чином, створено чисельну модель температурного поля трансформаторного масла.

Симуляцію процесу перенесення тепла трансформаторним маслом виконано з використанням прикладного програмного пакету MATLAB 7.9.0.

Для спрощення сприйняття моделі відобразимо ключові пункти за допомогою блок – схеми (рис.2.5).

Для чисельного рішення диференціальних рівнянь обрано метод кінцевих різниць.

Для визначення чисельного значення температури на грані (верхній площині) ВС складено рівняння

$$t_{\text{мк}ijk}(x, y, \tau) = \frac{c_{\text{мп}} t_{\text{мп}}}{c_{\text{мі}}} + \frac{q_{\text{в}i} F_{\text{к}x_i y_j n_i}}{c_{\text{мі}} m_{\text{н}}},$$

де $t_{\text{мк}ijk}(x, y, \tau)$ – температура масла в точці (x, y) в момент часу τ , $^\circ\text{C}$;

$c_{\text{мп}}$, $c_{\text{мі}}$ – теплоємність масла початкова, та в точці i , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;

$t_{\text{мп}}$ - початкова температура масла, $^{\circ}\text{C}$;

n_1 - кількість котушок;

F – площа однієї котушки, м^2 ;

x_i, y_j – координати розрахункової точки.

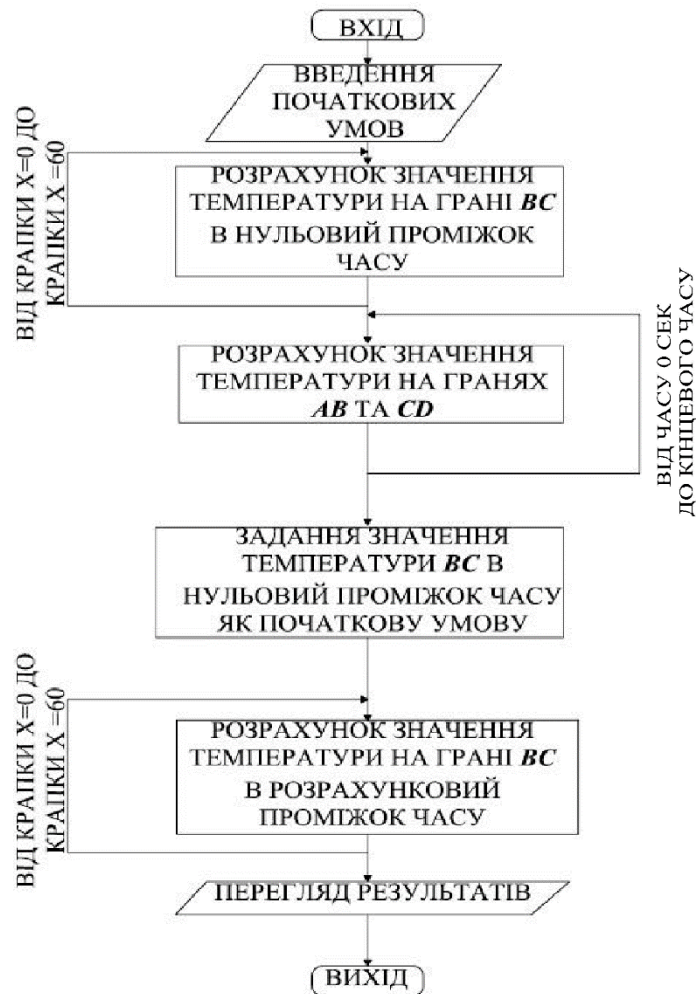


Рисунок 2.5 – Блок – схема розрахунку моделі обмотки трансформатора

Після виконання розрахунку рівняння отримано поверхні залежності температури (вісь temp) на грані BC від часу (вісь τ) та ширини обмотки (вісь x) при граничних умовах першого роду (рис.2.6), другого роду (рис.2.7), третього роду (рис.2.8), четвертого роду (рис.2.9).

При вирішенні моделі обмотки трансформатора при граничних умовах першого роду, температура на стінках бака (AB та CD) приростає лінійно і не

перевищує температуру масла в баку в відповідний момент часу. Розподіл температури масла в баку трансформатора відносно ширини обмотки має вигляд вісесиметричної параболи. В початковий момент часу в області трансформатора біля стінок баку є вертикальні лінійні відрізки, які вказують на відвід тепла від масла на розігрів стінок баку та витрати тепла в оточуюче середовище.

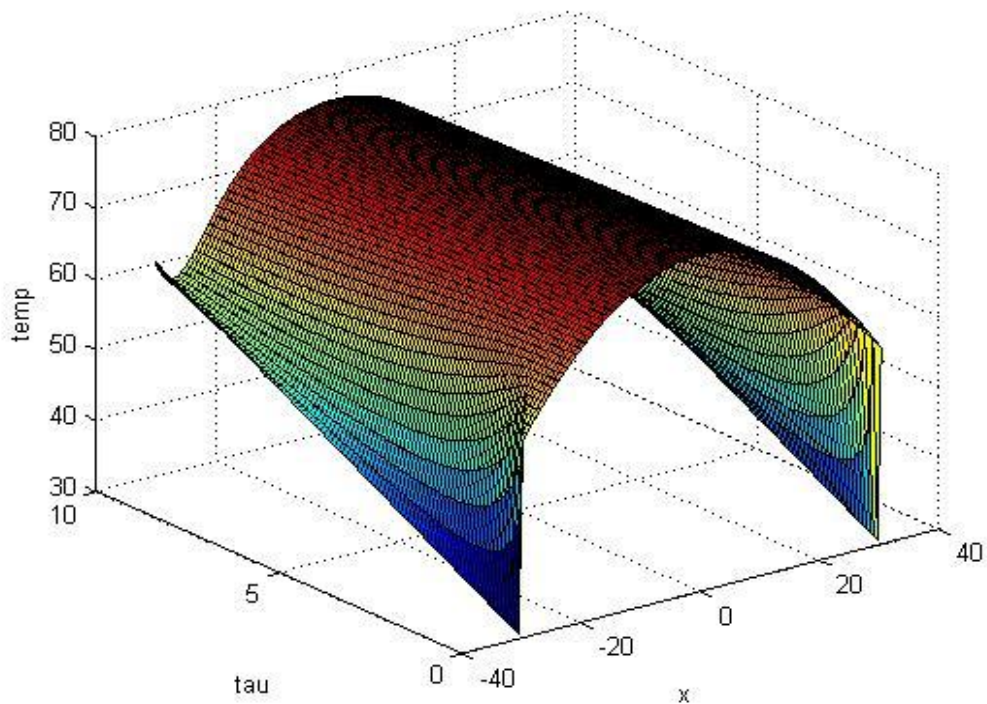


Рисунок 2.6 – Залежність значень температури масла на грані ВС від ширини обмотки при граничних умовах першого роду

При граничних умовах третього роду задаються температура оточуючого середовища t_{oc} і закон теплообміну між поверхнею тіла і довкіллям. Таким чином, розподіл температури масла в баку трансформатора відносно ширини обмотки має вигляд аналогічний розподілу температури масла в баку трансформатора при граничних умовах першого роду. Проте, через теплообмін

з навколишнім середовищем температура на стінках бака (AB та CD) дорівнює температурі самого навколишнього середовища.

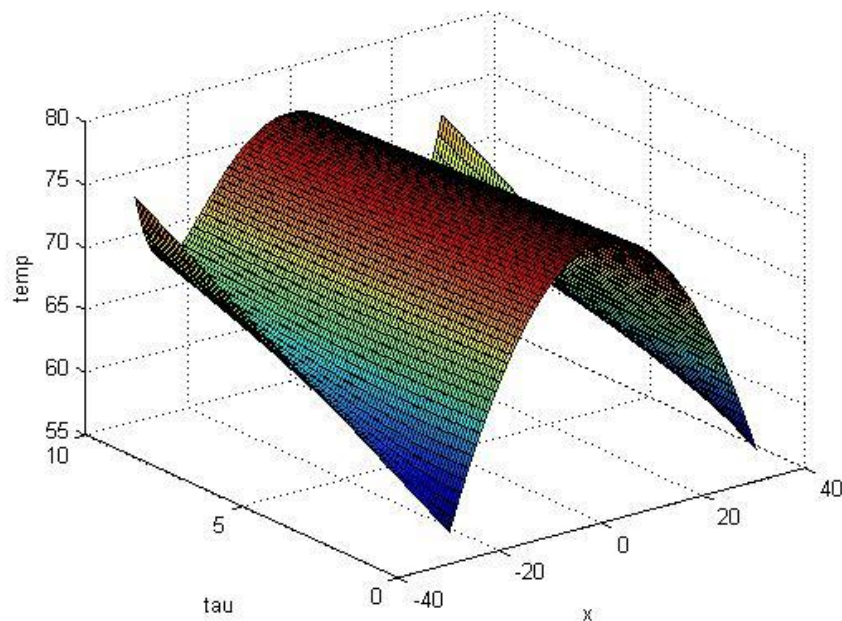


Рисунок 2.7 – Залежність значень температури масла на грані BC від ширини обмотки при граничних умовах другого роду

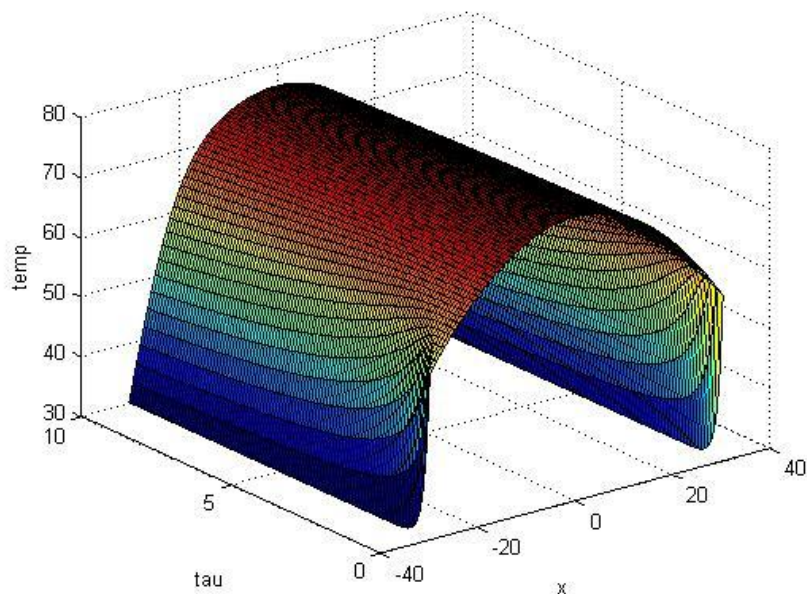


Рисунок 2.8 – Залежність значень температури масла на грані BC від ширини обмотки при граничних умовах третього роду

При граничних умовах четвертого роду розподіл температури в моделі має вигляд ідентичний розподілу температури при граничних умовах другого роду.

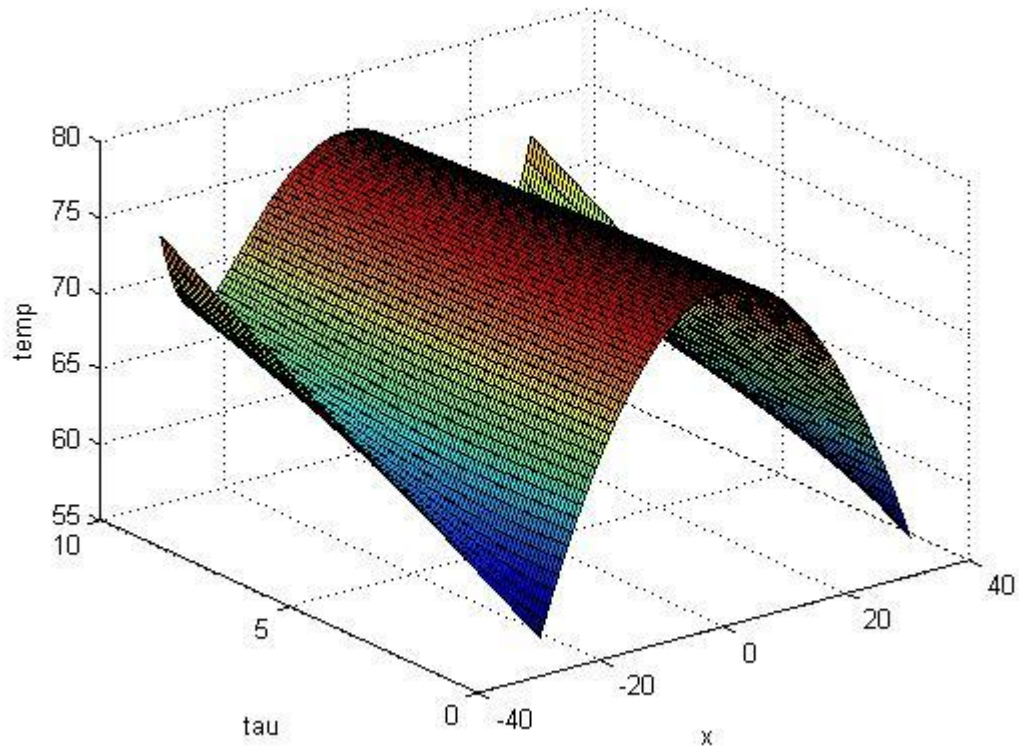


Рисунок 2.9 – Залежність значень температури масла на грані ВС від ширини обмотки при граничних умовах четвертого роду

Виконавши розрахунки розподілу температури в обмотках трансформатора при різних граничних умовах, було отримано можливість продемонструвати залежність розподілу температури від граничних умов та вибір умов для найбільш ефективного відводу теплоти для надійної роботи трансформатора. Після аналізу всіх чотирьох розглянутих випадків очевидно, що саме при граничних умовах третього роду вдалося досягти найбільш точного характеру розподілу температури для заданих початкових умов.

Таким чином, можна зробити висновок, що в розглянутому об'єкті, на грані ВС, при заданих умовах мають місце саме граничні умови третього роду.

2.5 Визначення коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні «котушка – масло»

Коефіцієнт тепловіддачі на межі тверде тіло – рідина можна розрахувати за допомогою рівняння Ньютона – Ріхмана

$$dQ = \alpha (t_{cm} - t_p) dF.$$

Звідки

$$\alpha = \frac{q}{t_{cm} - t_p},$$

де t_{cm}, t_p - температура стінки та рідини відповідно, $^{\circ}\text{C}$;

q – густина теплового потоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Коефіцієнт тепловіддачі залежить від великої кількості факторів. У загальному випадку він є функцією форми і розмірів тіла, режиму руху, швидкості, температури, фізичних параметрів рідини та інших величин.

Чисельне значення може бути визначено із системи диференціальних рівнянь і умов однозначності. Теоретичне рішення можливе тільки для найпростіших завдань, з урахуванням різних припущень.

2.5.1 Умови однозначності для процесів природної конвекції в дискових обмотках силового трансформатора

Диференціальне рівняння тепловіддачі отримано на основі загальних законів фізики. Воно описує явище тепловіддачі в узагальненому вигляді. Тому, отримане диференціальне рівняння описує цілий клас явищ тепловіддачі. Щоб з незліченної кількості виділити конкретно розглянутий процес і дати його

повний математичний опис, до диференціального рівняння необхідно приєднати математичний опис всіх окремих особливостей даного процесу. Ці особливості, спільно з диференціальним рівнянням, дають повний математичний опис конкретного процесу тепловіддачі, та називаються умовами однозначності або крайовими умовами. Умови однозначності включають в себе [30]:

— фізичні умови, що характеризують фізичні властивості середовища і тіла. В якості фізичних умов використано фізичні властивості міді, трансформаторного картону та масла відповідно;

— часові (початкові) умови, що характеризують розподіл температур в досліджуваному тілі в початковий момент часу. Початковими умовами є: сила тяжіння 9,81 Н/кг, температура оточуючого середовища +30 °С, атмосферний тиск 101325 Па. Температура масла на вході в обмотку +60 °С;

— граничні умови, що характеризують взаємодію розглянутого тіла з навколишнім середовищем. Граничні умови обрано у відповідності до розділу 2.4;

— геометричні умови, що характеризують форму і розміри тіла, в яких протікає процес.

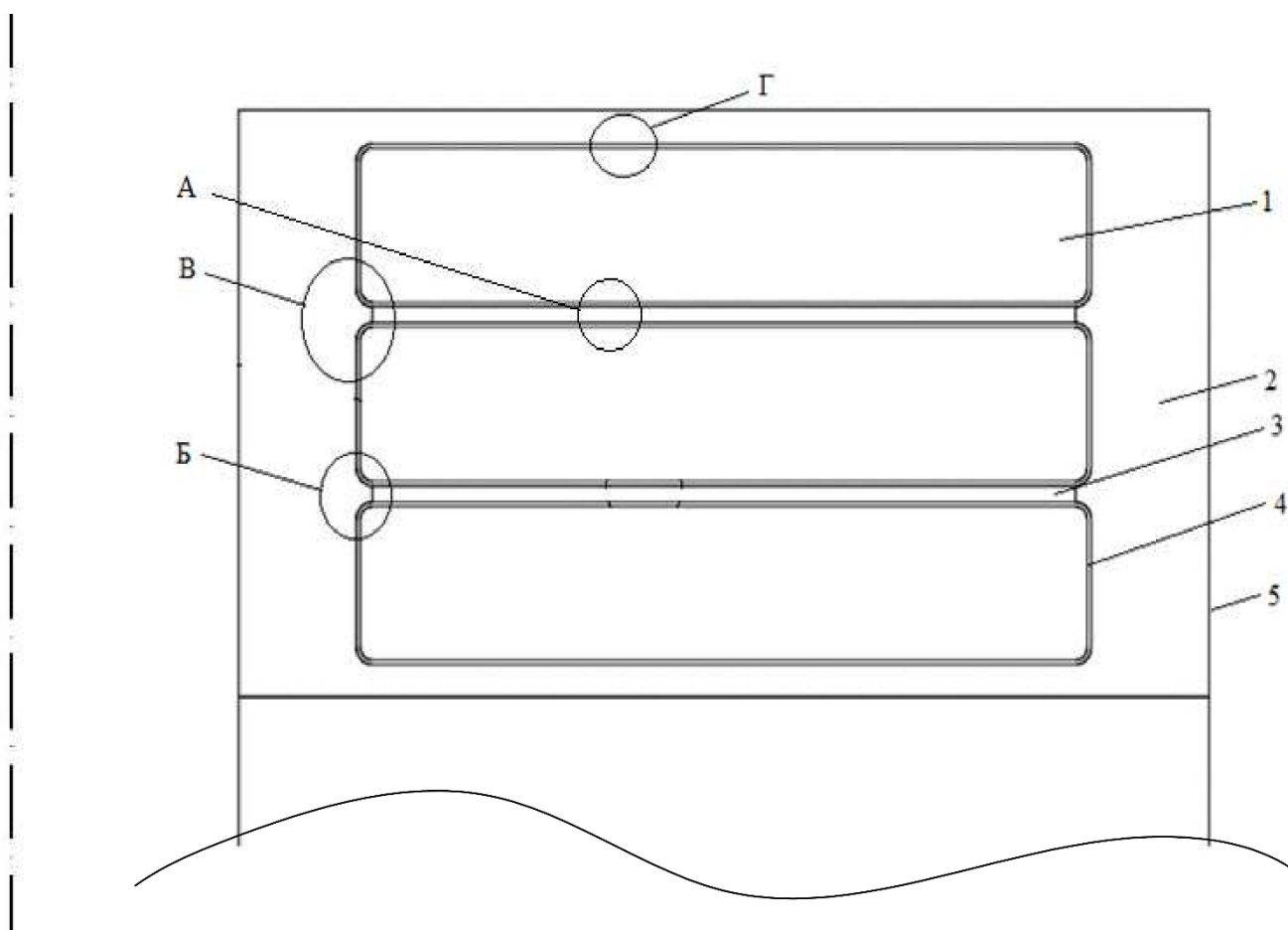
Геометричні параметри моделі, що досліджується, наведено на рисунку 2.10, де:

- 1 – мідь котушок;
- 2 – вертикальний канал, який заповнено трансформаторним маслом;
- 3 – горизонтальний (радіальний) канал, який досліджується;
- 4 – трансформаторний картон;
- 5 – стінка баку трансформатора.

Висота горизонтального каналу складає 0,001 м, радіальна ширина перетину котушки – 0,05 м, висота котушки – 0,01 м, ширина перетину вертикального каналу складає 0,01 м, товщина картону – 0,0001 м.

2.5.2. Розрахункові залежності розподілу теплоти в обмотках трансформатора

В процесі протікання електричного струму по дротах, з яких утворені котушки обмоток, виникають втрати енергії, які є причиною виділення теплоти в активній частині трансформатора. Ця теплота прогріває провідники, передається трансформаторному маслу, з яким вона вноситься за межі



обмотки [120].

Рисунок 2.10 – Геометричні параметри моделі

Якщо вважати, що система, яка розглядається є ізотропною, тобто поворот системи відліку на довільний кут не призведе до зміни результатів вимірювань, то густина теплового потоку на поверхні твердого тіла (границя

«масло – поверхня котушки») пропорційна температурному градієнту поверхні. Цю залежність представлено у виді закону Фур'є

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t,$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності провідника, Вт/(м К),

t – температура поверхні провідника, К.

Для дослідження теплових процесів в обмотках трансформатора обрано циліндричну систему координат (довільна крапка має координати $P(x, r, \varphi)$). Система координат обрана таким чином, що координатна вісь ОХ направлена вертикально вгору. Таким чином, розкладання вектора прискорення вільного падіння у вибраній координатній системі буде мати вигляд

$$g_{ox} = -g; \quad g_r = 0; \quad g_\varphi = 0,$$

де g – чисельне значення вектора прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ Н/кг.

За умови наявності в системі внутрішніх джерел теплоти закон збереження енергії, який дає залежність між густиною внутрішніх теплових джерел та кількістю теплоти, яка виділяється через поверхню, має вигляд

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial t}{r \partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0,$$

де q_v - середня густина теплових втрат в об'ємі провідника, Вт/м³.

Рівняння є законом Пуассона в циліндричній системі координат. Диференціальне рівняння теплопровідності має вигляд при дослідженні теплових процесів, що мають місце в провідниках, в яких є внутрішні джерела виділення теплоти.

Тепловиділення в ізоляційних матеріалах (трансформаторному картоні, гетинаксі, рейках, ізоляційних прокладках) майже відсутнє. Можна припустити, що в ізоляційних матеріалах відсутні внутрішні джерела виділення теплоти. Тоді рівняння (2.10) для ізоляції прийме вигляд рівняння Лапласа

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial t}{r \cdot \partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} = 0.$$

При дослідженні температурного поля трансформаторного масла вважається, що середовище є суцільним. Стан суцільного середовища характеризується макроскопічними параметрами: швидкістю, температурою та тиском. Для визначення цих параметрів, розглянемо основні рівняння, які описують теплообмін в рідині.

Рівняння енергії рідини, яка рухається в циліндричній системі координат має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial t}{\partial x} + W_r \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{W_\varphi}{r} \frac{\partial t}{\partial \varphi} = \\ = \frac{1}{\rho C_p} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{r^2 \cdot \partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\lambda \partial t}{r \partial r} \right). \end{aligned}$$

Проте, в рівняння входять значення проекцій швидкості течії масла на координатні осі. Для їх визначення необхідно приєднати до рівняння руху (Нав'є – Стокса) в циліндричних координатах

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial W_x}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_r \frac{\partial W_r}{\partial r} + \frac{W_\varphi}{r} \frac{\partial W_x}{\partial \varphi} \right) = \rho g_x - \\ - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial W_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \left(\frac{\partial W_x}{\partial r} + \frac{\partial W_r}{\partial x} \right) \right) + \\ + \frac{\mu}{r} \left(\frac{\partial W_x}{\partial r} + \frac{\partial W_r}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{r \partial \varphi} \left(\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial W_x}{\partial \varphi} + \frac{\partial W_\varphi}{\partial x} \right) \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \rho \left(\frac{\partial W_r}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial W_r}{\partial x} + W_r \frac{\partial W_r}{\partial r} + \frac{W_\varphi}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \varphi} - \frac{W_\phi^2}{r} \right) = \rho g_r - \\
& \quad - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial W_r}{\partial x} + \frac{\partial W_x}{\partial r} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(2\mu \frac{\partial W_r}{\partial r} \right) + \\
& \quad + \frac{2\mu}{r} \left(\frac{\partial W_r}{\partial r} - \frac{W_r}{r} - \frac{\partial W_\varphi}{r \partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{r \partial \varphi} \left(\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial W_\varphi}{\partial r} - \frac{W_\varphi}{r} \right) \right), \\
& \rho \left(\frac{\partial W_\varphi}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial W_\varphi}{\partial x} + W_r \frac{\partial W_\varphi}{\partial r} + \frac{W_\phi}{r} \frac{\partial W_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{W_\phi W_r}{r} \right) = \rho g_\varphi - \\
& \quad - \frac{\partial p}{r \partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \left(\frac{\partial W_\varphi}{\partial x} + \frac{\partial W_x}{r \partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \mu \left(\frac{\partial W_\varphi}{\partial x} + \frac{\partial W_x}{r \partial \varphi} \right) + \\
& \quad + \frac{2\mu}{r} \left(\frac{\partial W_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \varphi} - \frac{W_\varphi}{r} \right) + \frac{\partial}{r \partial \varphi} \left(2\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial W_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{W_r}{r} \right) \right) + \\
& \quad + \frac{\partial}{\partial r} \mu \left(\frac{\partial W_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \varphi} - \frac{W_\varphi}{r} \right).
\end{aligned}$$

Для розрахунку невідомої величини тиску p , використаємо рівняння нерозривності

$$\frac{dW_x}{dx} + \frac{dW_r}{dr} + \frac{dW_\varphi}{r \cdot d\varphi} + \frac{W_r}{r} = 0.$$

За умови стаціонарного теплообміну похідні часу стають рівними нулю.

На підставі графічних залежностей фізичних властивостей масла від температури були виведені наступні математичні рівняння:

– щільності

$$\rho_m = -0,6359 \cdot T + 898,49;$$

– коефіцієнту ізобарної теплоємності

$$c_p = 6,0309 \cdot T + 1565,9 ;$$

– коефіцієнту теплопровідності

$$\lambda_m = -9 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,1207 ;$$

- коефіцієнту температуропровідності ($\cdot 10^{-9}$)

$$a_m = 0,0007 \cdot T^2 - 0,3024 \cdot T + 85,275;$$

- кінематичної в'язкості ($\cdot 10^{-6}$)

$$\nu_m = 0,0027 \cdot T^2 - 0,5032 \cdot T + 26,323 ;$$

- числа Прандтля

$$Pr_m = 0,0307 \cdot T^2 - 5,871 \cdot T + 327,44,$$

де T – температура трансформаторного масла, К.

Отримана система рівнянь дозволяє виконувати розрахунки фізичних властивостей трансформаторного масла для відповідної температури в будь-якій точці обмотки.

2.5.3 Визначення характеру розповсюдження теплоти в дискових обмотках силового трансформатора

При виконання розрахунків було відзначено, що характер розподілу місцевих коефіцієнтів тепловіддачі на 3 котушках подібний до 40 котушок. Проте, для демонстрації характеру розподілу температури в обмотках трансформатора необхідно розглядати модель у повному розмірі, а саме 40 котушок. Таким чином, для демонстрації теплових процесів, які мають місце в радіальних каналах достатньо розглянути лише 3 котушки. Крім того, це значно спростить сприйняття графічної інформації, яку отримано в результаті проведених розрахунків.

На рисунку 2.11 та рисунку 2.12 приведені результати розрахунків, по яким можна відстежити залежність розподілу локальних коефіцієнтів тепловіддачі (на одиничний градієнт температур) від поля температури в дискових обмотках трансформатора. На рисунку 2.13 зображено розподіл густини теплового потоку в обмотках, що досліджуються. Для більш детального аналізу необхідно виділити характерні області, які відмічено на

рис.2.10. Зона «А» – ділянка радіального каналу, зона «Б» - область з'єднання радіального та вертикального каналів, зона «В» - ділянка бокової поверхні котушок та зона з'єднання радіального та вертикального каналів, зона «Г» - область біля верхньої границі верхньої котушки.

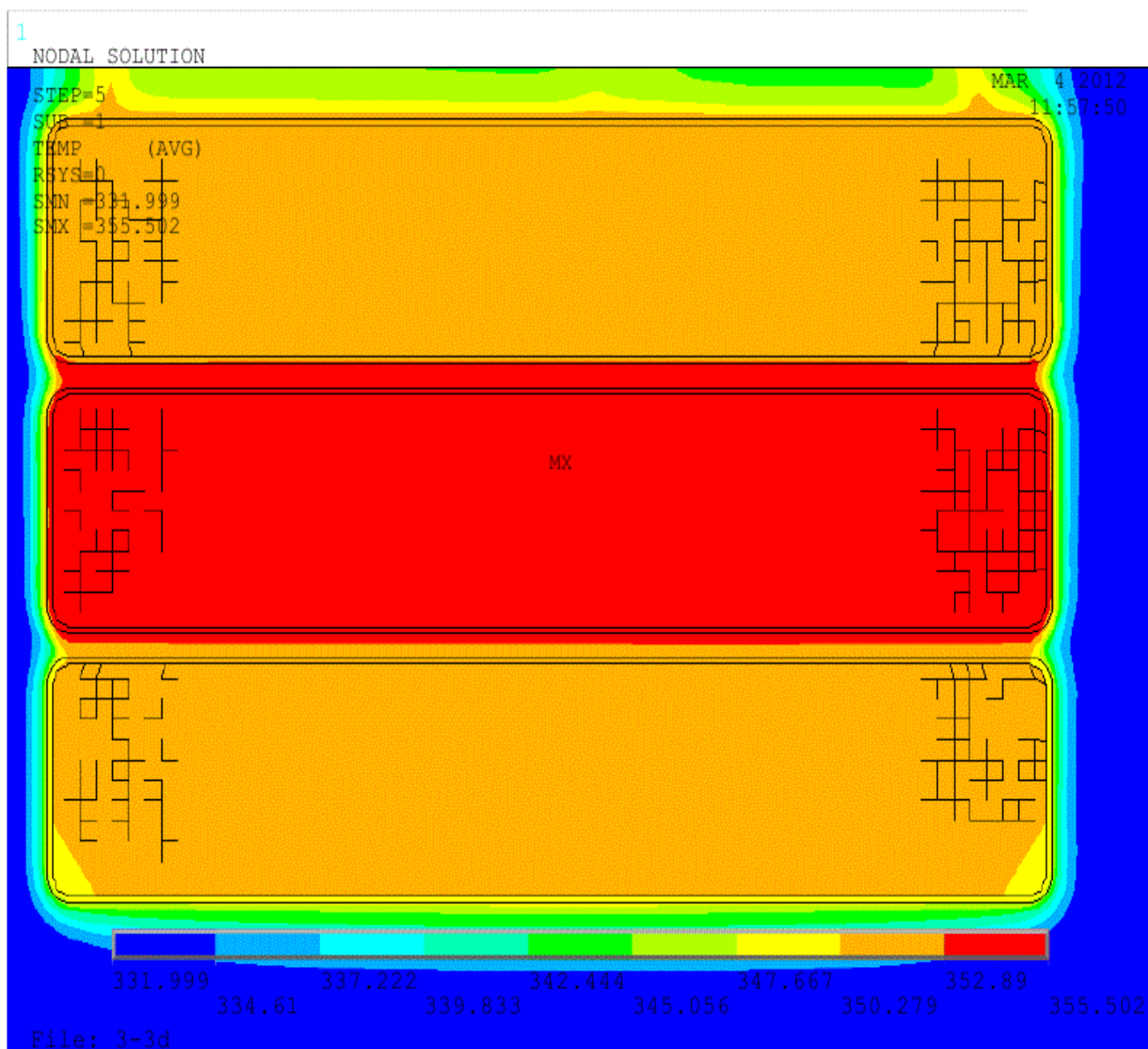


Рисунок 2.11 – Розподіл температури в обмотках трансформатора, К

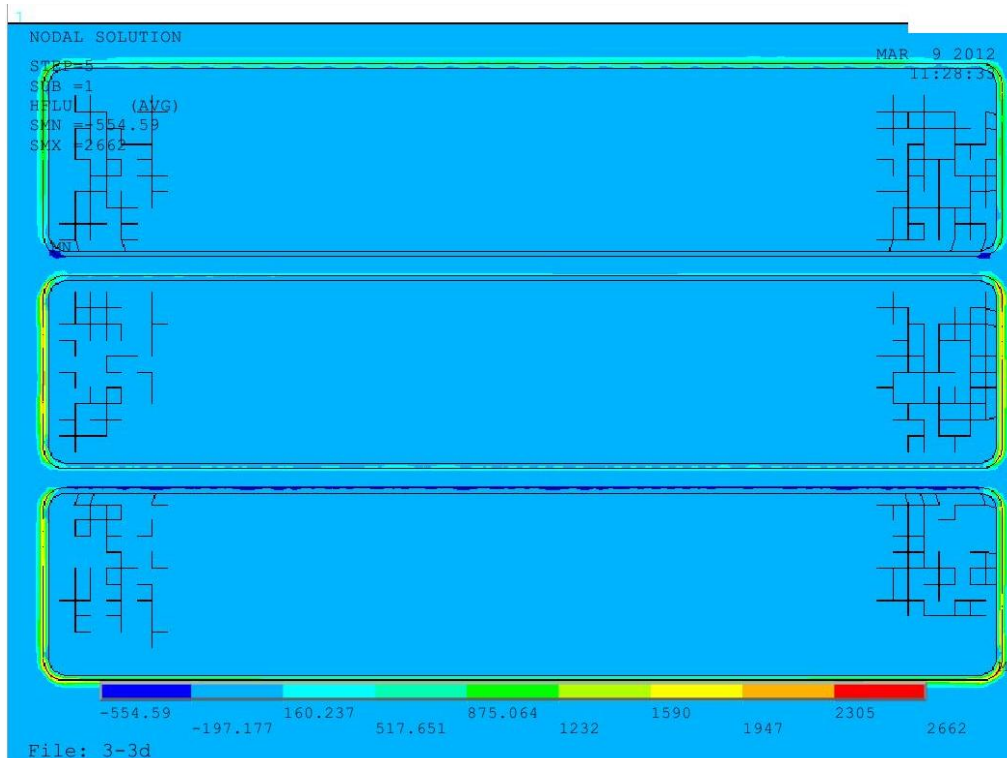


Рисунок 2.12 – Чисельні значення локальних коефіцієнтів тепловіддачі на границі «тверда поверхня – рідина» на одиничний градієнт температур, Вт/м²·К

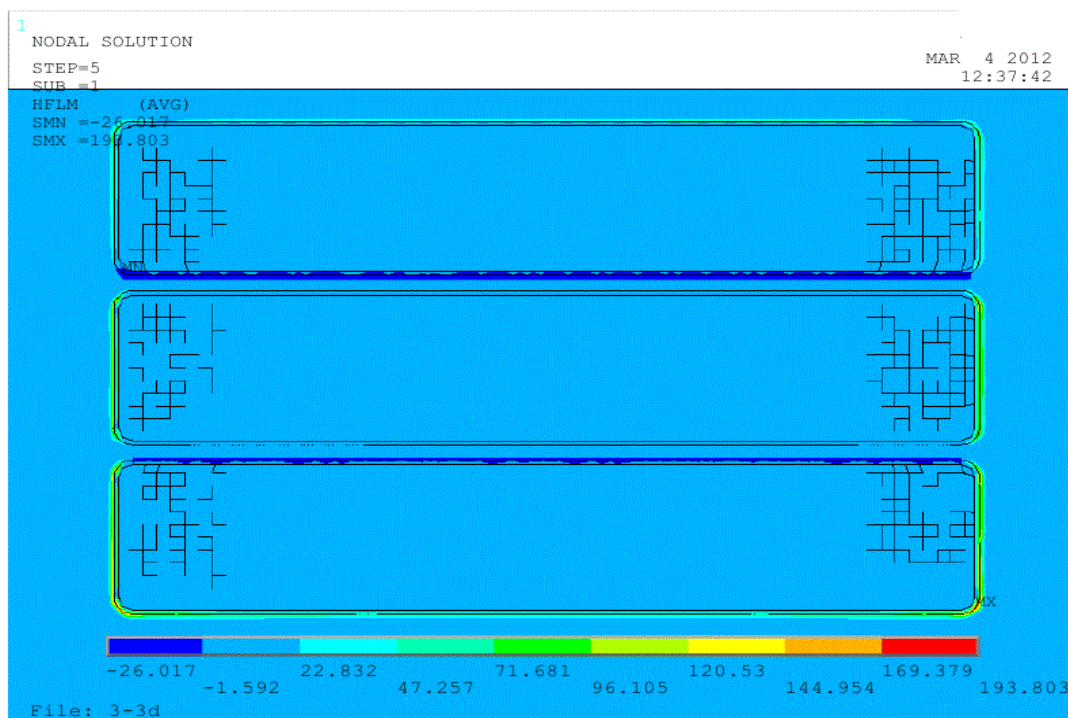


Рисунок 2.13 – Густина теплового потоку в обмотках трансформатора, Вт/м²

Таким чином, виходячи з результатів, які відображено на рис. 2.11 – 2.13, можна представити загальну картину розподілу теплоти всередині обмоток трансформатора, та прослідкувати залежність густини теплового потоку та коефіцієнту тепловіддачі.

Значення локального коефіцієнту тепловіддачі на поверхні котушки в радіальному каналі (зона «А») залежить від температури міді цих котушок. Виходячи з рисунку 2.14 та рисунку 2.15, можна простежити те, яким чином більш нагріта котушка передає своє тепло менш нагрітій через масло в радіальному каналі. В розглянутому випадку температура нижньої котушки вище верхньої приблизно на 3 К. Локальні коефіцієнти на поверхні «масло – поверхня котушки» (на одиничний градієнт температур) верхньої котушки мають негативне значення, а нижньої котушки – позитивне. Таким чином, нижня котушка гріє верхню через шар масла. Тепловий потік направлено знизу вверх.

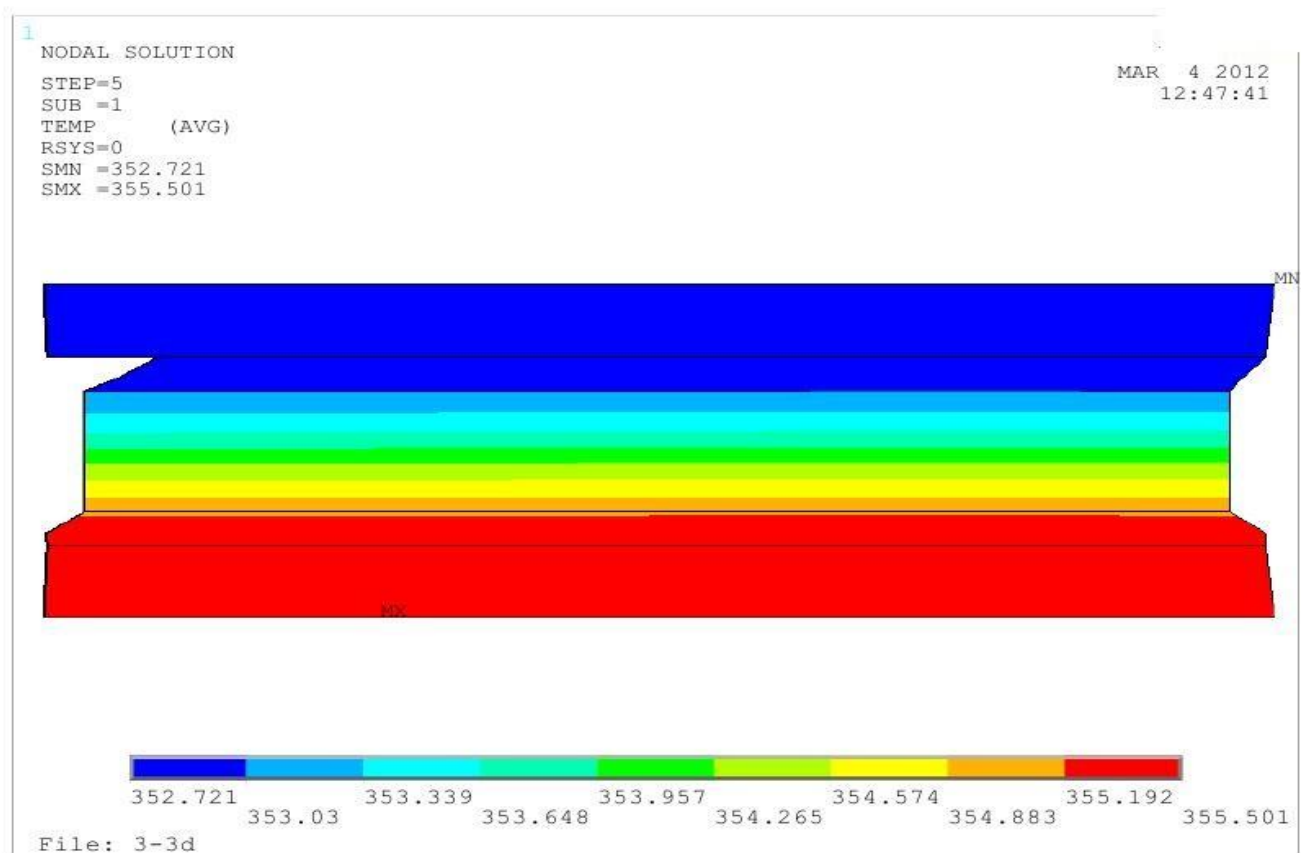


Рисунок 2.14 – Розподіл температури в радіальному каналі трансформатора, К

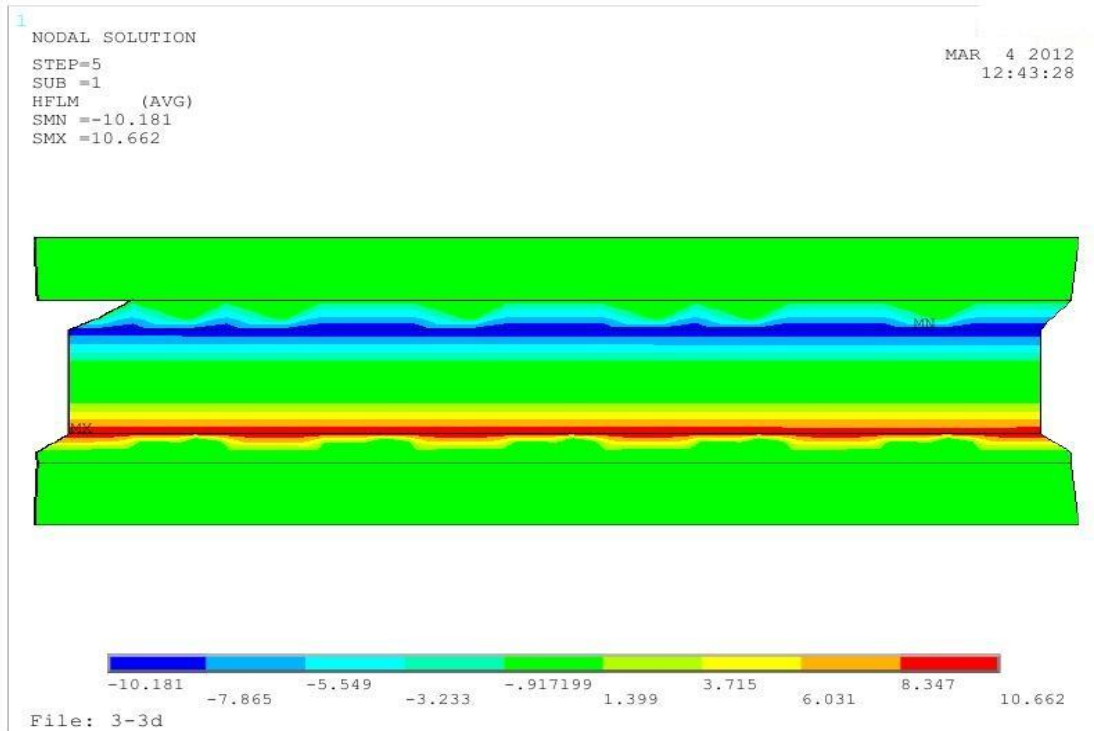


Рисунок 2.15 – Локальні коефіцієнти тепловіддачі на поверхні котушок в радіальному каналі на одиничний градієнт температур, Вт/м²·К

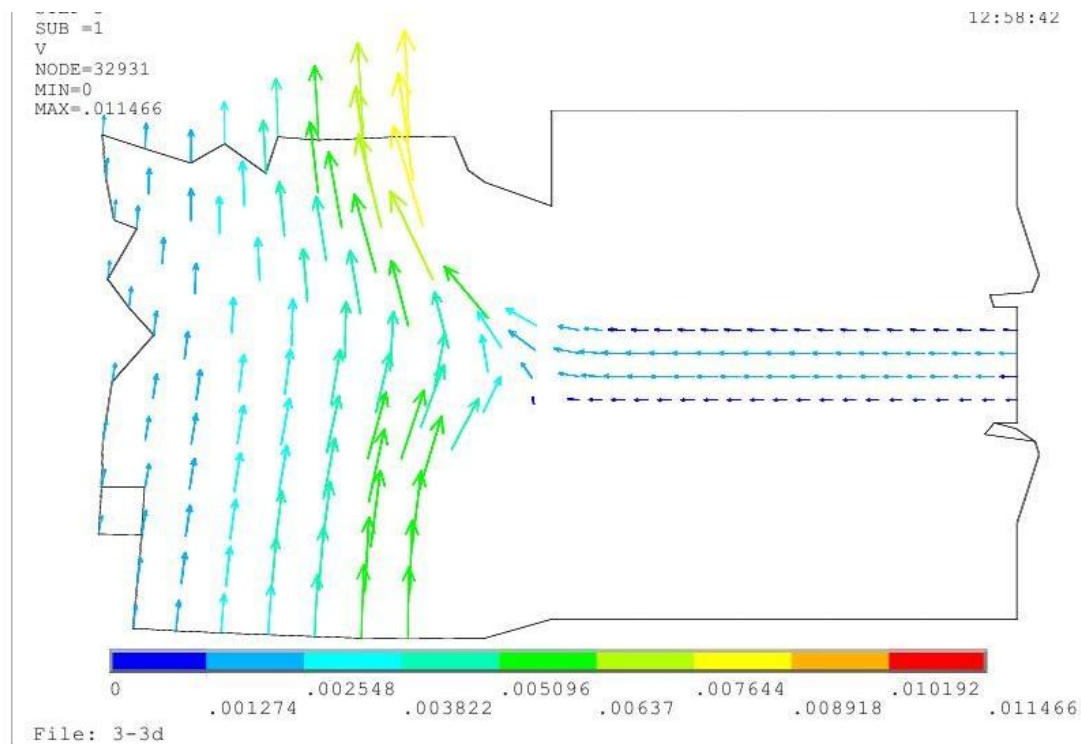


Рисунок 2.16 – Вектори швидкостей течії масла, м/с

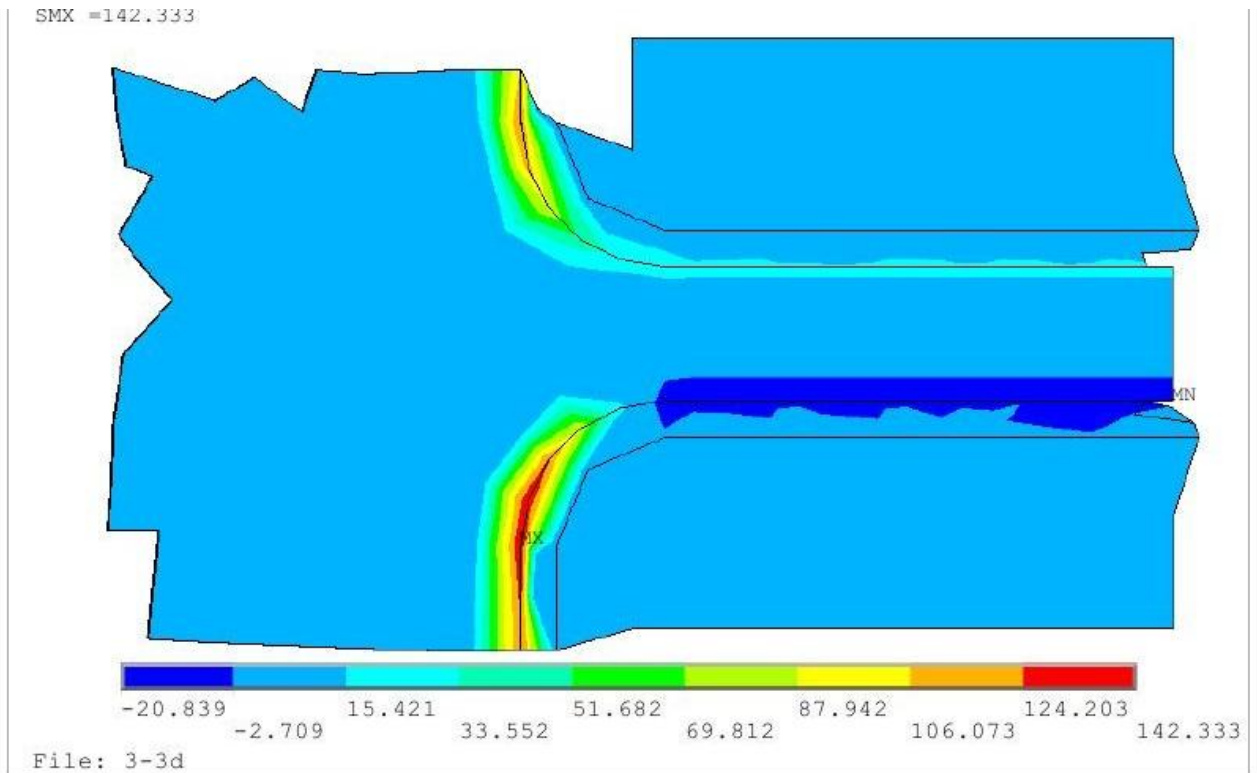


Рисунок 2.17 – Локальні коефіцієнти тепловіддачі на поверхні котушок в місці з'єднання радіального та вертикального каналів на одиничний градієнт температур, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$

Модулі значень коефіцієнтів тепловіддачі на котушках, які розташовані в межах одного радіального каналу, при однаковому розташуванні уздовж вісі ОХ, є приблизно однаковими. Це свідчить про те, що кількість тепла, яку віддає нижня котушка, отримуються верхньою котушкою в повному обсязі, і масло, яке знаходиться в радіальному каналі, майже не виносить тепло за його межі, через те, що швидкість його руху є незначною.

В зоні з'єднання радіального та вертикального каналів (зона «Б») особливо виділяються місця закруглення котушок, які виникають за рахунок намотки дроту. В цих місцях є ділянки, на яких густина теплового потоку від котушки значно перевищує середню густина теплового потоку поверхні котушки. Про це можна робити висновки, спираючись на значення локальних коефіцієнтів тепловіддачі, що відображені на рисунку 2.17. Причиною такого характеру розповсюдження тепла в зоні «Б» є інтенсифікація теплообміну за

рахунок зниження термічного опору, яке викликано руйнуванням ламінарного шару рідини на закругленні. В цьому випадку характер течії є подібним до обтікання в'язкою рідиною циліндра. Відрив примежового шару є наслідком зростання тиску вздовж потоку і гальмування рідини твердою стінкою [121]. При обтіканні передньої половини циліндра перетин потоку зменшується, а швидкість рідини збільшується, в результаті чого статичний тиск у поверхні стінки знижується. Навпаки, в кормовій частині статичний тиск збільшується тому, що тут швидкість зменшується. За рахунок дії сил в'язкості швидкість і, отже, кінетична енергія рідини безпосередньо біля поверхні циліндра малі. Зростання тиску вздовж потоку призводить до гальмування рідини і подальшого виникнення зворотного руху. Поворотна течія відтісняє примежовий шар від поверхні тіла; відбувається відрив потоку та виникнення вихорів.

Порівнявши результати, що представлені на рисунку 2.16 та рисунку 2.17, стає очевидним, що теплообмін більш інтенсивний в тих місцях, де швидкість течії масла вища, а саме теплообмін в вертикальному каналі більш інтенсивний, ніж в радіальному.

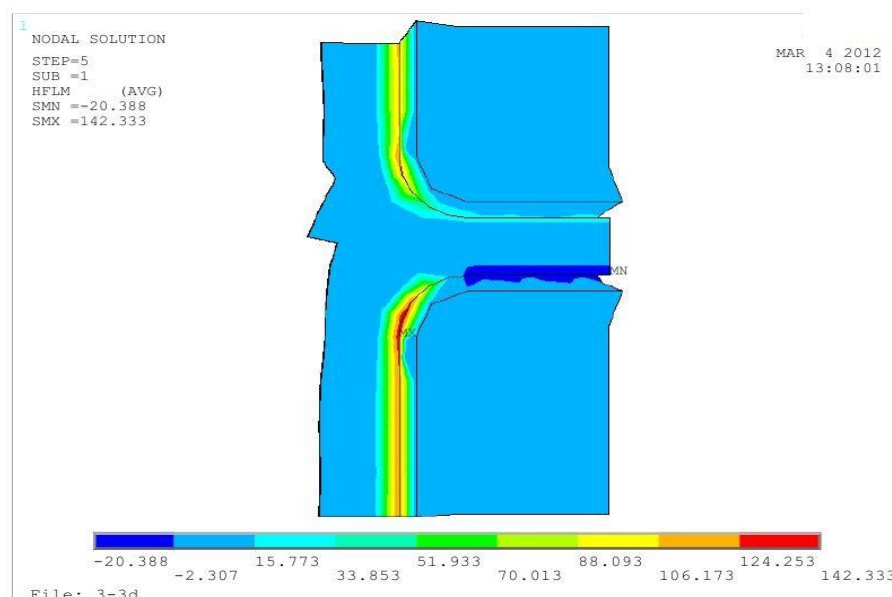


Рисунок 2.18 – Локальні коефіцієнти тепловіддачі на бокових поверхнях котушок на одиничний градієнт температур, Вт/м²·К

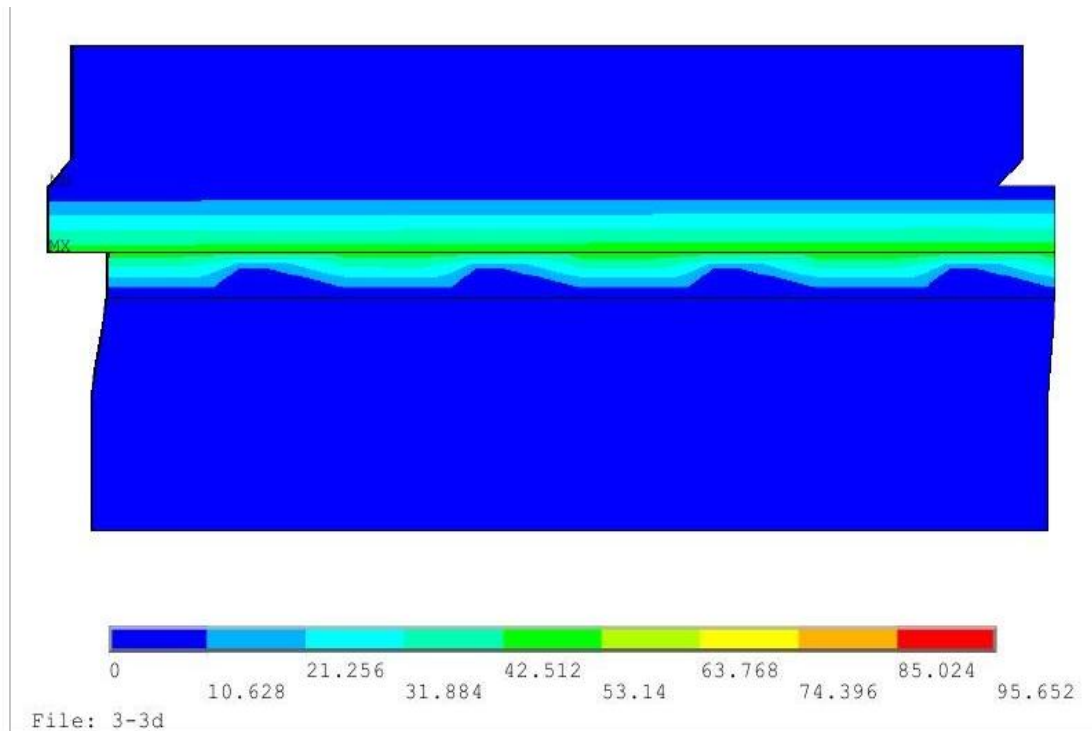


Рисунок 2.19 – Локальні коефіцієнти тепловіддачі на верхній поверхні котушки, яка розташована вище за інші, Вт/м²·К

Значення локальних коефіцієнтів тепловіддачі на бокових поверхнях котушок дискових обмоток трансформатора (зона «В») значно перевищує коефіцієнти тепловіддачі з горизонтальних стінок цих котушок (рис 2.18). Таким чином, кількість теплоти, що відводиться в вертикальний канал набагато перевищує кількість теплоти, що відводиться в радіальні канали. Завдяки цьому бокові частини котушки мають температуру нижчу, ніж температура її центральної частини. Відтак найбільш нагріта точка (ННТ) зміщується в центральну частину котушки.

Тепловіддача з горизонтальної поверхні верхньої та нижньої котушки (зона «Г») перевищує тепловіддачу в радіальні канали котушок, які знаходяться в середній частині обмотки (рис 2.19). Через високу тепловіддачу верхня котушка буде віддавати більшу кількість тепла, ніж ті котушки, що розташовані всередині обмотки, навіть незважаючи на те, що температура масла, яке його омиває, має більш високу температуру. Зважаючи на це, верхня котушка має

нижчу температуру, ніж розташована нижче котушка. Найбільш нагріта точка зміщається в 2 або 3 котушку зверху.

ННТ знаходиться в 2 котушці зверху, а саме в центральній її частині (рисунок 2.11), яка позначена на рисунку знаком «МХ».

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ В РАДІАТОРНІЙ СИСТЕМІ ОХОЛОДЖЕННЯ МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Відвід теплоти від трансформаторного масла здійснюється в радіаторах. Завдяки процесам, що мають місце в радіаторній системі охолодження, вдається досягти температури масла на вході в обмотку трансформатора, яка дозволяє організувати ефективний відвід теплоти від міді котушок для подальшої передачі її навколишньому середовищу. Ескіз радіатора представлено на рисунку 3.1 [17].

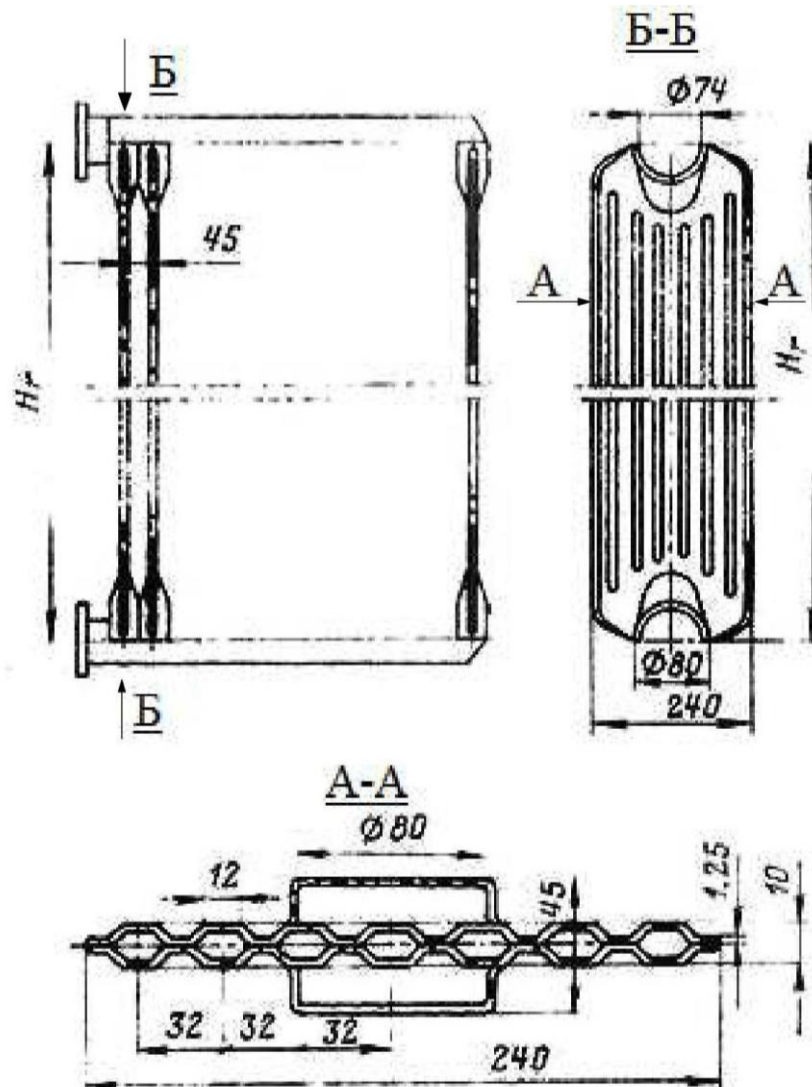


Рисунок 3.1 - Ескіз трансформаторного радіатора

На рисунку 3.1 розмір H_r дорівнює висоті секції радіатора та може коливатися в діапазоні від 0,915 до 2,44 м [17].

Радіатори складаються з ряду вертикальних охолоджувальних елементів, що утворюють паралельні шляхи зверху вниз для масла, що циркулює всередині них. Елементи можуть мати різні поперечні перетини (круглої та овальної форми) та мають розташування подібне до пучку труб в теплообмінниках [14]. Радіатор повинен поєднувати найбільш можливу тепловіддачу з найменш можливими вагою (витратою сталі) і місткістю (витратою масла), а також з найбільш низькою трудомісткістю виготовлення і мінімальним габаритним розміром.

Тепловіддача радіатора (з 1 м^2 його поверхні) залежить, в основному, від інтенсивності охолодження труб зовнішнім повітрям, що циркулює в проміжках між ними. При збільшенні числа рядів труб, при зменшенні відстаней між ними, при зменшенні каналів, тощо, циркуляція повітря ускладниться, що призведе до недостатнього охолодження масла та перегріву активної частини трансформатора [14].

Радіатори можуть бути встановлені у вигляді окремої охолоджувальної батареї, яка стоїть поруч з баком. Батарею (одну або дві) з'єднують з баком маслопроводами. Їх перетин приблизно рівний сумі перетинів патрубків радіаторів. При такому перетині та при невеликій довжині маслопроводів питома тепловіддача батареї не істотно знижується в порівнянні з радіаторами, встановленими безпосередньо на баку [15].

Таким чином, для відведення теплоти, що передають маслу котушки дискових обмоток трансформатора, було обрано охолоджувальну батарею, яка складається з вертикальних охолоджувальних елементів округлої форми. Для виконання необхідних розрахунків були створені фізична та чисельна моделі охолоджувальних елементів.

3.1 Швидкість масла в радіаторі при природній циркуляції масла і повітря

Швидкість циркуляції масла в радіаторах дуже мала та складає приблизно 1 см/с. Це значення отримано в роботі [17] експериментальним способом при заданих геометричних параметрах радіатора (рис.3.1), фізичних властивостях масла та перепаді температури масла на вході та виході з радіатора. Коефіцієнт тепловіддачі з боку масла і перепад температури між маслом і стінкою радіатора визначається, виходячи з умов конвективного теплообміну [15].

Режим течії масла в масляних каналах радіатора - ламінарний [14]. Як уже було досліджено в третьому розділі, круговий рух масла підтримується різницею тисків, яка виникає у зв'язку зі зміною питомої ваги масла при нагріві, і дорівнює площі петлі тиску на діаграмі розподілу питомих ваг. У цьому випадку рух масла можна розглядати як примусовий і використовувати критеріальне рівняння:

$$Nu_m = 0,85 * 0,74 \cdot Gr Pr_{\text{м}}^{0,1} Pr_m^{0,2}. \quad (3.1)$$

За допомогою цього рівняння можна визначити коефіцієнт тепловіддачі радіатора з боку масла.

Якщо відомі втрати енергії в міді котушок P , площа перетину циркулюючого потоку масла A_0 , площа поверхні радіатора з боку масла F_0 , щільність ρ і питома теплоємність c_0 масла при середній температурі, коефіцієнт тепловіддачі з боку масла α , перепад температури між маслом і стінкою радіатора $\Delta \vartheta_{of}$ і осьовий перепад температури масла в радіаторі $\Delta \vartheta_o$, то, виходячи з кількості втрат, що відводяться, та зменшення теплоти масла при проходженні по радіатору, можна скласти рівняння теплового балансу [17]

$$P = \alpha F_o \Delta \vartheta_{of} = \omega A_o \rho c \Delta \vartheta_o, \quad (3.2)$$

де ω — швидкість течії масла в радіаторі.

Коефіцієнт тепловіддачі радіатора з боку масла α визначається рівнянням (3.1)

$$\alpha = 0,85 \cdot 0,7 d_h^{0,5} \lambda^{0,3} \left(\frac{\beta g}{\nu} \right)^{0,1} \lambda^{0,7} \omega^{0,2} \Delta \vartheta_{of}^{0,1}. \quad (3.3)$$

З рівняння (3.2)

$$\alpha = P / (F_o \Delta \vartheta_{of}) \quad (3.4)$$

$$\omega = P / (A_o \rho c \Delta \vartheta_o). \quad (3.5)$$

Для дослідження теплообмінних процесів у радіаторі силового трансформатора можна використовувати експериментальний (створення фізичної моделі секції радіатора) або теоретичний (створення чисельної моделі секції радіатора, яка вирішується методом кінцевих елементів) методи.

Переваги експериментальних досліджень полягають у тому, що можливо з достатнім ступенем точності визначити на натурній фізичній моделі:

- температури в локальних точках за допомогою термопар в нестационарному і стаціонарному теплових режимах;
- загальну витрату масла, що проходить через модель;
- гідравлічний опір каналів моделі.

До недоліків експериментальних досліджень відносять:

- вартість фізичного моделювання кожної конкретної моделі є вартістю самого виробу, таким чином витрати на фізичне моделювання необґрунтовано великі;

— неможливо дослідити усі комбінації варіювання геометричних розмірів;

— для визначення локальних критеріальних рівнянь на натурній моделі неможливо виміряти середню температуру масла в визначених перетинах радіатора.

До переваг теоретичного способу проведення експерименту відносять:

— економія робочого часу працівників підприємства, тому що створення чисельної моделі займає набагато менше часу і може бути виконано навіть однією людиною;

— чисельна модель не вимагає капітальних витрат на матеріали для створення моделі;

— чисельна модель дозволяє швидко і легко вносити зміни в конструкцію радіатора для забезпечення необхідних характеристик;

— можливість наочно продемонструвати замовнику роботу моделі без значних витрат на транспорт;

— чисельна модель дозволяє економити робочі площі в складальному цеху;

— надає можливість отримувати результати у зручний для персоналу час доби;

— у разі негативного результату виключає необхідність демонтажу обладнання;

— скорочує терміни випуску продукції на ринок.

Незважаючи на всі очевидні переваги, теоретичний спосіб має один серйозний недолік, оскільки в ході дослідження визначаються результати вирішення задачі, згідно заданої математичної моделі, а не характеристики дійсного фізичного процесу, що протікає в трансформаторних радіаторах. Крім того необхідно враховувати, що неможливо отримати теоретичну модель, яка враховує всі фактори, які впливають на тепловіддачу і гідродинаміку моделі, а також те, що в розрахунку кожного елемента чисельної моделі має місце своя

похибка, що буде накопичуватися і призведе до викривлення результату розрахунків.

Отже, в цьому розділі для дослідження теплообмінних процесів у радіаторі використано як теоретичний, так і експериментальний методи, та порівняно отримані результати.

Таким чином, для дослідження теплових процесів в радіаторі силового трансформатора була створена експериментальна установка, яка схематично представлена на ескізі (рис. 3.3).

Установка являє собою модель однієї секції реального радіатора силового трансформатора. Установка складається з трьох основних частин:

- а) верхня представляє собою ємність 1, в якій знаходиться розігрітий теплоносій;
- б) середня – теплообмінник типу «труба в трубі»;
- с) нижня – зона збору охолодженого масла та нагрітої води.

В якості схеми руху теплоносіїв в установці обрано прямоток. Теплоносій, що гріє теплообмінник, - трансформаторне масло Т-1500 (додаток «Л»), що було в використанні, в кількості $V_m=1750$ мл, теплоносій, який підігрівається, - вода. Розігріте трансформаторне масло знаходиться в ємності 1, яка покрита шаром утеплювача. Ємність з'єднана з мідною трубою 11, всередині якої протікає розігріте масло. Зовнішній діаметр труби 11 складає $d_m^{нар} = 20\text{мм}$, внутрішній $d_m^{вн} = 16,5\text{мм}$ її довжина $L_m=950\text{мм}$. Канал для протікання охолоджуючої води утворений пластиковою трубою 10. Її зовнішній діаметр становить $d_n^{нар} = 40\text{мм}$, внутрішній - $d_n^{вн} = 27\text{мм}$. Труба 11 відцентрована в 10 за допомогою шайб 12.

Витрата масла через установку регулюється кутом, на який відкрито шаровий кран 7, який приєднано до нижньої частини мідної труби.

В трубі 10 зроблені отвори, через які холодна водопровідна вода потрапляє в установку (3), а розігріта вода виходить з неї (6). Для вимірювання

витрати води через установку використовується тарирована ємність 15, об'ємом 1 літр, в яку стікає розігріта вода.

Охолоджене масло збирається в ємності 8, що розташована в нижній частині установки. Ємність 8 з'єднана з установкою гнучким шлангом 13. Його внутрішній діаметр складає $d_{ин}^{вн} = 10\text{мм}$, а зовнішній $d_{ин}^{зов} = 12\text{мм}$.

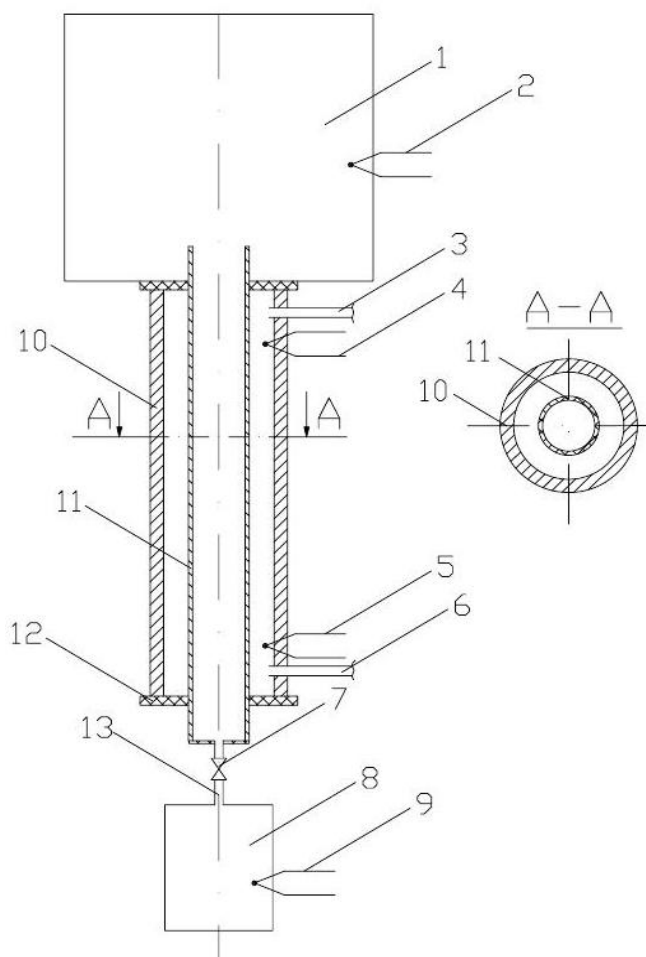


Рисунок 3.3 - Схема установки для дослідження теплообмінних процесів в радіаторі трансформатора

Основними параметрами для дослідження теплообмінних процесів в установці є витрати масла та води та їх температури на вході та виході з установки.

Масло розігрівається до температури 70-80⁰С, що відповідає температурі охолоджуючого середовища на вході в радіатор силового трансформатора.

Таблиця 3.1 - Температури масла і води на вході та виході з експериментальної установки

Номер експерименту	Час протікання масла τ_M , сек	Час протікання літра води τ_B , сек	Температура навколишнього середовища $t_{нс}$, °C	Температура масла на вході в установку $t_M^{вх}$, °C	Температура масла на виході з установки $t_M^{вих}$, °C	Температура води на вході в установку $t_г^{вх}$, °C	Температура води на виході з установки $t_г^{вих}$, °C
1	60	40	20	77	58	22	28
2	59	39	20	75	53	22	29
3	190	65	20	72	43	21	25
4	91	56	20	71	50	22	27
5	86	30	20	70	48	22	25
6	172	59	20	73	45	22	26

Результати, які були отримані під час проведення експерименту зведені до таблиці 3.1.

Для спрощення сприйняття отримані результати схематично приведені у вигляді графіків зміни температур теплоносіїв по довжині установки. Рисунок 3.5 відповідає експерименту №1, а рисунок 3.6 – експерименту №3.

Витрата масла через установку в експерименті 1 становить

$$G_m = \frac{V_m}{\tau_m} = \frac{1,75}{60} = 0,029 \text{ л/с}$$

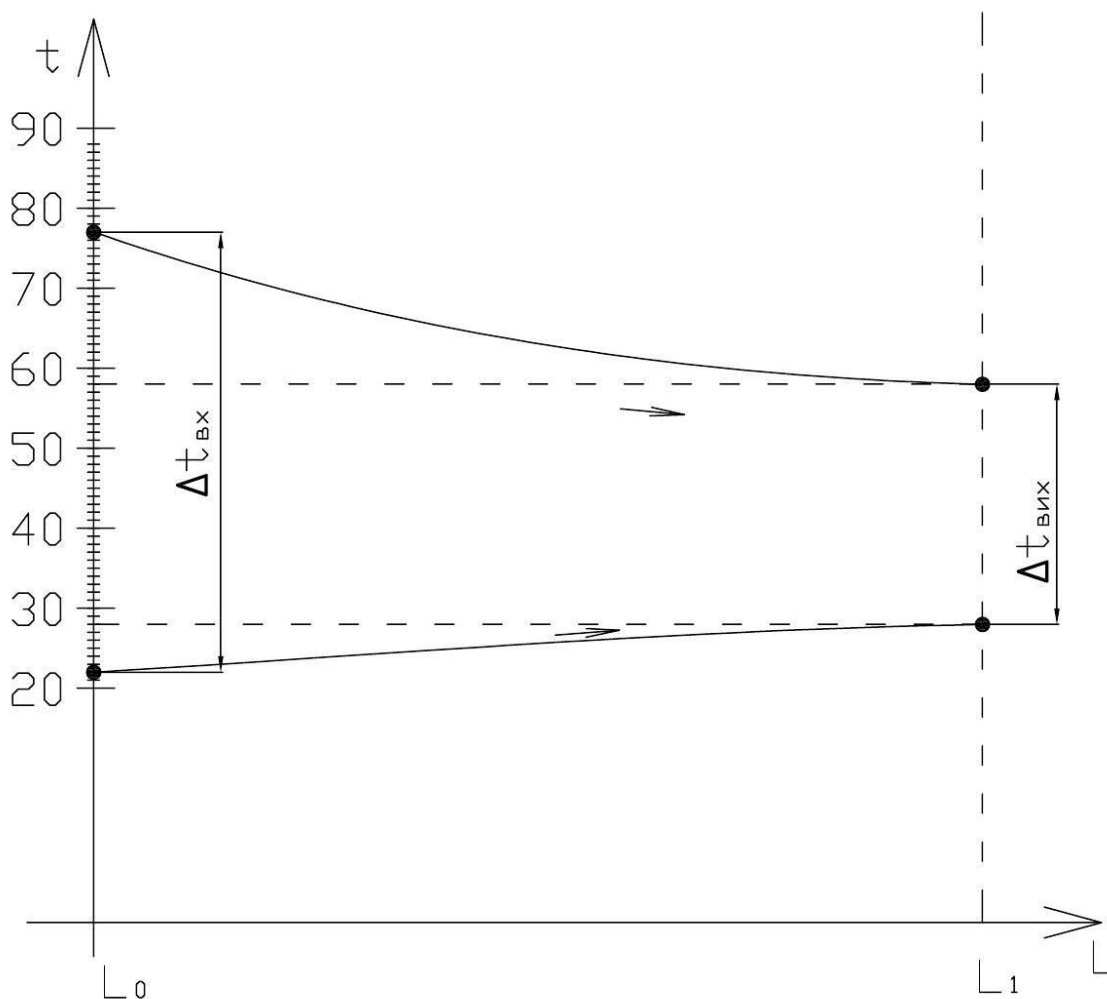


Рисунок 3.5 - Графік зміни температур теплоносіїв по довжині установки в експерименті №1

На рисунку 3.5 по вісі ординат позначаються значення температури теплоносіїв в градусах Цельсія, а по вісі абсцис – довжина теплообмінника L , яка змінюється в діапазоні від L_0 до L_1 . Перепад температур на вході в теплообмінник позначено

$$\Delta t_{\text{вх}} = t_{\text{м}}^{\text{вх}} - t_{\text{г}}^{\text{вх}}, \quad (3.6)$$

а на виході з нього

$$\Delta t_{\text{вих}} = t_{\text{м}}^{\text{вих}} - t_{\text{г}}^{\text{вих}}. \quad (3.7)$$

В експерименті №1 $\Delta t_{\text{вх}} = 77 - 22 = 55^{\circ}\text{C}$, $\Delta t_{\text{вих}} = 58 - 28 = 30^{\circ}\text{C}$.

Графік, який представлений на рисунку 2.6, побудований аналогічним до графіку на рисунку 3.5.

Середній температурний напір дорівнює

$$\Delta t_{\text{прям}} = \frac{\Delta t_{\text{вх}} - \Delta t_{\text{вих}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\text{вх}}}{\Delta t_{\text{вих}}}}. \quad (3.8)$$

В експерименті №1 $\Delta t_{\text{прям}} = \frac{55 - 30}{2,3 \lg \frac{55}{30}} = 41,34^{\circ}\text{C}$.

Тепловий баланс для першого експерименту має вигляд:

$$\Delta Q_{\text{м}} = \Delta Q_{\text{г}}, \quad (3.9)$$

де $\Delta Q_{\text{м}}$ – кількість теплоти, яка віддається маслом в теплообміннику, Дж/кг;

$\Delta Q_{\text{г}}$ - кількість теплоти, яка приймається маслом в теплообміннику, Дж/кг.

Кількість теплоти залежить від теплоємності речовини (c), її витрати (G) та температурного градієнту (Δt). Отже

$$G_m \cdot c_m \cdot \Delta t_m = G_g \cdot c_g \cdot \Delta t_g. \quad (3.10)$$

Звідки теплоємність масла дорівнює

$$c_m = \frac{G_g \cdot c_g \cdot \Delta t_g}{G_m \cdot \Delta t_m}.$$

Для першого експерименту теплоємність масла становить:

$$c_m = \frac{60/40 \cdot 4200 \cdot (28 - 22)}{1,750 \cdot (77 - 58)} = \frac{37800}{33,25} \approx 1136 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K}),$$

що є близькою до нормативних значень (до 1500 Дж/(кг·K)), враховуючи значне забруднення експериментального масла в процесі використання.

Коефіцієнт тепловіддачі зі сторони масла становить

$$\alpha_m = \frac{\Delta Q_m}{F_m \tau_m \Delta t_m}, \quad (3.11)$$

де F_m - площа теплообмінника з боку масла, м²

$$F_m = \pi d_m^{nap} L_m = 3,14 \cdot 0,02 \cdot 0,95 \approx 0,06 \text{ м}^2;$$

Δt_m – перепад температури масла в теплообміннику.

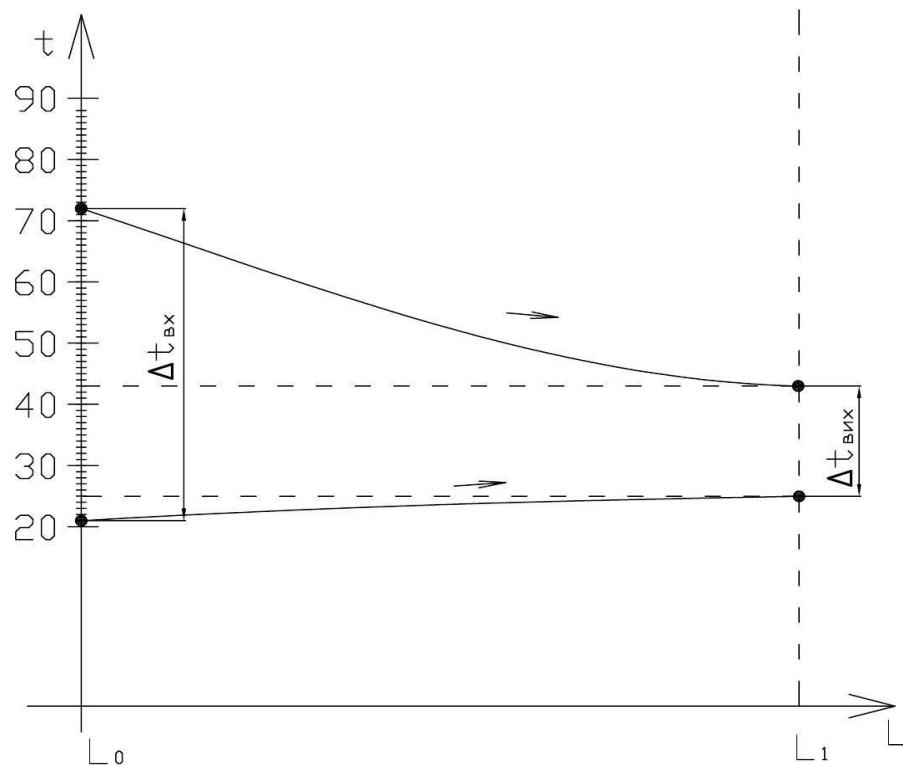


Рисунок 3.6 – Графік зміни температур теплоносіїв по довжині установки в експерименті №3

Підставивши (3.10) в (3.11) отримаємо:

$$\alpha_m = \frac{G_m c_m \Delta t_m}{F_m \tau_m t_m} = \frac{G_m c_m}{F_m \tau_m} \quad (3.12)$$

Перепад температури масла в теплообміннику Δt_m присутній і в чисельнику і в знаменнику, отже, його можна скоротити. Однак, зважаючи на те, що Δt_m впливає на значення теплоємності c_m , то можна стверджувати, що коефіцієнт тепловіддачі на границі «масло – охолоджуюча рідина» знаходиться в залежності від перепаду температури масла в теплообміннику.

Таблиця 3.2 – Розрахункові значення коефіцієнту тепловіддачі масла

Номер експерименту	Витрата масла G_m , л/с	Перепад температур на вході $\Delta t_{вх}$, °C	Перепад температур на виході $\Delta t_{вих}$, °C	Середній температурний напір $\Delta t_{прям}$, °C	Коефіцієнт тепловіддачі α_m , $Вт/(м^2 K)$
1	0,03	55	30	41,34	9,47
2	0,029	53	24	36,65	9,19
3	0,0092	51	18	31,72	3,44
4	0,019	49	23	34,42	5,92
5	0,02	48	23	34,02	6,05
6	0,028	51	19	32,44	3,84

Отже, для експерименту №1

$$\alpha_m = \frac{G_m c_m}{F_m \tau_m} = \frac{0,03 \cdot 1136}{0,06 \cdot 60} = 9,47 \text{ Вт}/(м^2 K)$$

Отримані результати для інших експериментів зведені в таблицю 2.2.

Для перевірки отриманих результатів була створена чисельна модель, яка вирішувалась методом кінцевих елементів. Геометрія моделі збігається з відповідними параметрами експериментального теплообмінника (рис.3.3). Проте, в якості охолоджуючої рідини в моделі було обрано повітря, як і в реальних масляних радіаторах. Вода використовувалась в експериментальній установці через простоту організації замірів її температур на вході в теплообмінник та виході з нього. Заміна охолоджуючої рідини при дослідженнях не може внести значну похибку в розрахунки через те, що об'єм охолоджуючої рідини, що знаходиться в контакті з секцією радіатора набагато більший об'єму масла в радіаторі, отже, перепад температур охолоджуючої рідини значно менший ніж температурний градієнт масла. А це, в свою чергу, призведе до зменшення впливу теплофізичних властивостей

охолоджуючої рідини на процеси відводу теплоти від масла в радіаторі трансформатора. Циркуляція масла в моделі та в експериментальній установці – природня.

Результати розрахунків представлені на рис. 3.7 – 3.8. Температура масла на вході біла задана 80°C (рис.3.7). Температура охолоджуючої рідини (повітря) – 22°C . В результаті проведених розрахунків було отримано значення температури масла на виході з радіатора, яке становило приблизно 322 K або 49°C . Таким чином, отримано температурний градієнт масла на вході та виході з моделі в 31°C .

На рис. 3.8 приведені результати розрахунків полів швидкостей течії масла в каналі радіатора трансформатора. Швидкість течії масла є практично незмінною уздовж довжини каналу та коливається в діапазоні від $0,22\text{ м/с}$ до $0,5\text{ м/с}$. Розрахункова швидкість течії масла є найбільш наближеною до результатів, що були отримані в експерименті 3.

Отже умови проведення саме цього експерименту можна вважати такими, що в значній мірі відповідають умовам моделювання.

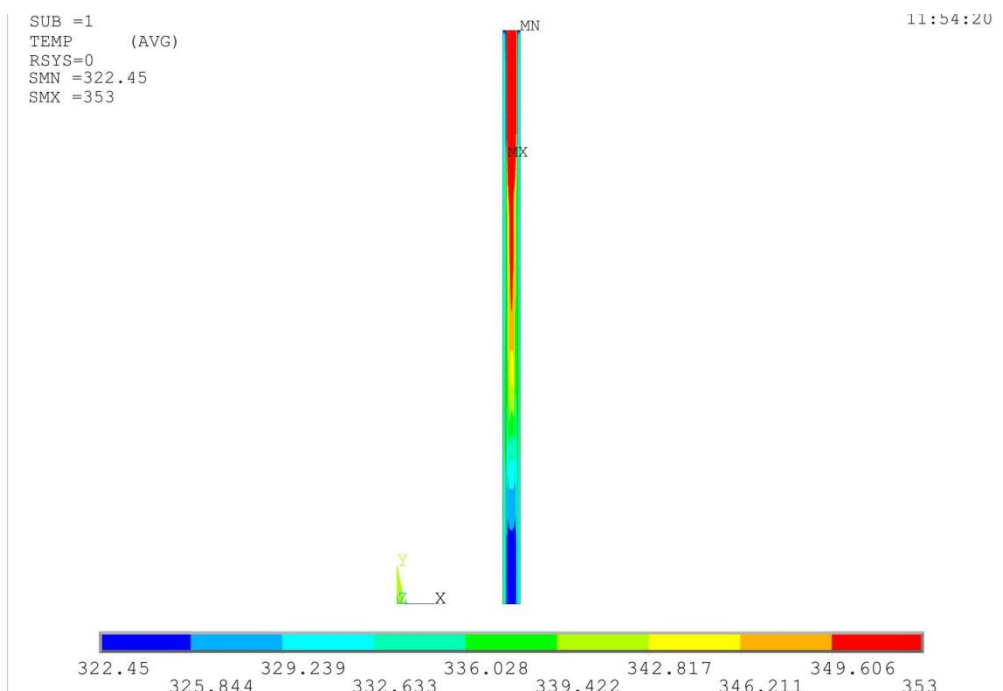


Рисунок 3.7 – Поле температури масла (К) в радіаторі

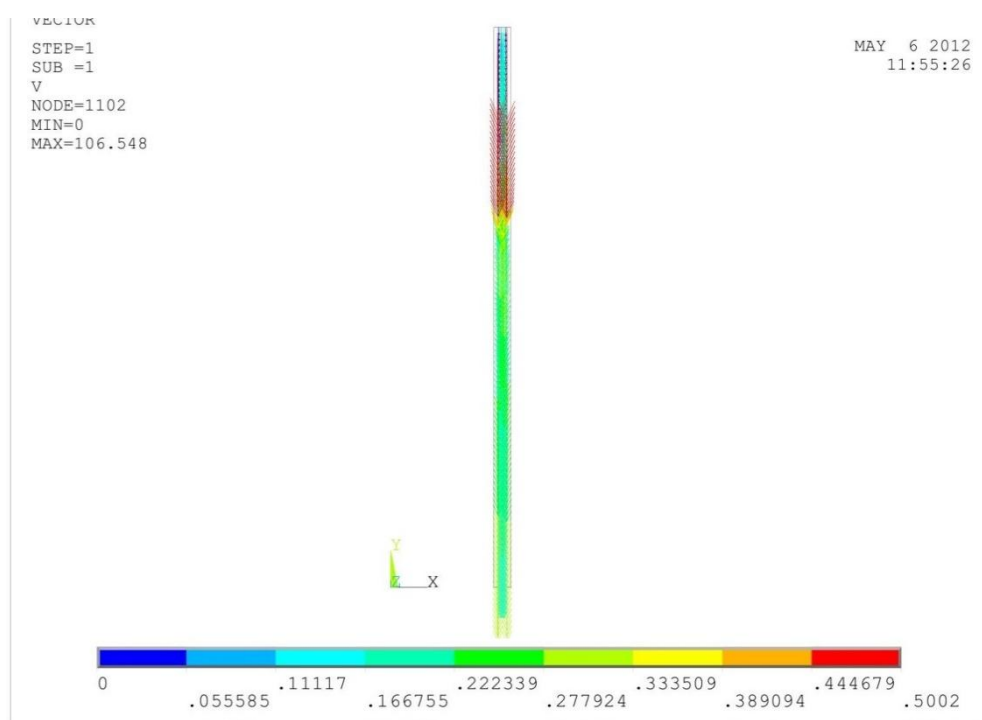


Рисунок 3.8 – Поля швидкостей (м/с) масла в радіаторі

Розрахункові та експериментальні значення температур масла в радіаторі для всіх експериментів зведено в таблиці 3.3. Розраховані абсолютні та відносні похибки отриманих результатів.

Таблиця 3.3 – Розрахункові та експериментальні значення температур масла в радіаторі

Номер експерименту	Експериментальний градієнт температури масла, °C	Розрахунковий градієнт температури масла, °C	Абсолютна похибка вимірювань, °C	Відносна похибка вимірювань, %
1	19	31	12	63,15
2	22	31	9	40,9
3	29	31	2	6,9
4	21	31	10	47,6
5	22	31	9	40,9
6	28	31	3	9,64

Таким чином, найбільш наближений до розрахункового температурний градієнт був отриманий в експерименті 3. Це означає, що саме в цьому експерименті вдалося досягти значення витрати масла через радіатор, яке в значній мірі відповідає розрахунковому.

Швидкість течії масла в експериментальній установці в першому випадку:

$$v_m = \frac{4G_m}{\pi(d_m^{int})^2} = \frac{4 \cdot 0,03 \cdot 10^{-2}}{3,14 \cdot 0,0165^2} = 1,4 \text{ м/с}.$$

Кількість теплоти, яка віддається маслом в радіаторі (площа поверхні теплообміну дорівнює $0,06 \text{ м}^2$)

$$\Delta Q_m = G_m c_m \Delta t_m = 0,03 \cdot 10^{-2} \cdot 1136 \cdot (7 - 58) = 6,47 \text{ Вт}$$

Аналогічним чином розраховані значення швидкостей для всіх експериментів. Результати зведені в табл. 3.4.

Очевидним є те, що зі зростанням швидкості течії масла в радіаторі кількість теплоти, що відводиться маслом зростає. Отже, з цієї точки зору, найбільш ефективним є відвід теплоти в експерименті 2. Збільшення кількості теплоти, яка віддається маслом в радіаторі, призведе до можливості зменшення площі самого радіатора, яка необхідна для відводу теплоти, а значить зменшить матеріалоємність і собівартість охолоджуючої частини силового трансформатора.

Проте, для збільшення температурного градієнту масла на виході та вході в радіатор необхідно зменшувати швидкість течії масла. Також треба враховувати, що зменшення швидкості течії масла в радіаторі призведе до суттєвого зменшення температури масла на виході з нього (експеримент 3). А це, в свою чергу, матиме позитивний вплив на процеси відводу теплоти від котушок трансформатора.

Таблиця 3.4 - Розрахункові значення параметрів радіатора, необхідних для ефективного відводу теплоти від масла

Номер експерименту	Перепад температур масла $\Delta t_m, ^\circ\text{C}$	Швидкість течії масла $v_m,$ м/с	Кількість теплоти, яка віддається маслом $\Delta Q_m,$ Вт
1	19	1,4	6,47
2	22	1,36	7,23
3	29	0,43	3,03
4	21	0,89	4,53
5	22	0,94	4,99
6	28	0,47	3,21

Таким чином, при проектуванні масляного радіатора, необхідно визначити які параметри масла є найбільш значущими в кожних конкретних умовах. Та виходячи з цього обирати швидкість течії масла в каналах радіатора. Наприклад, за допомогою використання масляних насосів для збільшення швидкості течії масла, або застосування додаткових гідравлічних опорів для її зменшення.

3.2 Техніко-економічне обґрунтування прийнятих рішень

Одним із важливих критеріїв, що обумовлює ефективну роботу трансформаторної підстанції є надійність роботи силового обладнання. Відмови силового обладнання на ТОВ «Мінерал» почали збільшуватися з 1998 року, коли в енергетиці загострилися проблеми виконання робіт, пов'язаних із заміною ізоляторів та плановим розчищенням трас повітряних ліній. Крім того, з 1990 року через труднощі фінансового характеру замість придбання нових трансформаторів вони стали замінятися такими, що пройшли ремонт в умовах майстерень.

Таким чином в роботі розглянуто два можливих варіанта підвищення ефективності експлуатації трансформаторної підстанції промислового підприємства шляхом покращення надійності силового обладнання. Досліджено два підходи:

- підвищення надійності шляхом захисту трансформатора від перенапруг за обриву вторинного кола трансформатора струму;
- подовження експлуатації обладнання шляхом вдосконалення системи відводу теплоти від силового обладнання.

Виходячи з даних, наведених в [16], строк експлуатації трансформаторного обладнання скорочується всередньому на 22% за умови перевищення температури найбільш нагрітої точки обмотки вище за 124 °С. Враховуючи, що термін експлуатації трансформатора всередньому

встановлено заводом виробником в 18 років, а середня вартість обладнання складає 5,26 млн грн за одиницю (приблизно 203 грн за 1 кВА без НДС), то можна визначити збитки від передчасного виходу обладнання з ладу.

Скорочення терміну експлуатації складе 1445 діб або майже 4 роки, а отже закупівлю нового обладнання необхідно буде провести вже через 14 років. Варто відзначити, що в цілому термін служби трансформаторів визначається природним зносом їх ізоляції.

Таким чином, без урахування рівня інфляції та допустивши, що амортизація вартості обладнання буде незмінною протягом кожного року експлуатації, визначимо зниження вартості обладнання за кожний означений рік:

—

де K – капітальні вкладення в обладнання, грн;

τ – проектний термін експлуатації, рік.

Тоді, зниження вартості обладнання, грн/рік

—————

Таким чином, економія від використання обладнання за умови роботи в дозволеному температурному діапазоні буде складати, грн

Або майже 1,1 млн грн.

Окрім того, враховуючи річні об'єми видобутку копалин підприємством, можна оцінити годинні збитки підприємства від простою, за умови виходу з ладу системи живлення об'єкта, грн/год

Враховуючи, що середній час виконання ремонтних робіт на підстанції за даними підприємства складає близько 1,5 годин, обрахуємо економію від запобігання кожному аварійному відключенню, грн

Або майже 0,57 млн грн.

Таким чином, економія від описаних в роботі заходів буде складати 1,1 млн гривень на протязі всього терміну експлуатації обладнання та майже 0,57 млн гривень на запобігання кожному аварійному відключенню підприємства.

ВИСНОВКИ

Силові трансформатори промислових об'єктів потребують підвищення ефективності їх використання з урахуванням конкретних умов експлуатації та навколишнього середовища. Виконання в повному обсязі вимог нормативно-технічної документації та інструкцій по експлуатації, що регламентують застосування силових трансформаторів на промислових підприємствах, можливо лише при впровадженні автоматизованої системи управління трансформаторними підстанціями.

При кількості трансформаторів більше одного і можливості перекладу навантаження з одного трансформатора на інші можна оптимізувати їх експлуатацію шляхом зміни кількості працюючих трансформаторів або перерозподілу між ними навантажень відповідно до обраного критерію оптимальності. Для цієї мети може бути використана система автоматичного або автоматизованого управління трансформаторними підстанціями, яка отримує на свій вхід дані вимірювань і формує керуючі впливу на високовольтні вимикачі, таким чином змінюючи кількість працюючих трансформаторів.

Також можна скористатися способом зниження коефіцієнта несиметрії струму в знижувальному трансформаторі та в трифазній лінії електропередач. Завдяки цьому способу досягається:

- зниження струмів перехідних процесів при включенні і відключенні навантажень за рахунок використання модулів, що містять транзистори і здійснення включення транзисторів в момент рівності нулю струму на шинах понижувального трансформатора і відключення в момент рівності нулю струму на відхідних кабелях, що з'єднують навантаження з шинами понижувального трансформатора;

- усунення міжфазного короткого замикання за рахунок блокування замикання транзисторів модулів інших фаз при включеному транзисторі модуля будь-якої фази.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛЬ ПОСИЛАНЬ

1. Лизунов, С. Д. Проблемы современного трансформаторостроения в России [Текст] / С. Д. Лизунов, А. К. Лоханин. – М.: Электричество, 2000. – 54с.
2. Копылов, И. П. Электрические машины: Трансформаторы. Учебное пособие для электромех. спец. вузов [Текст] / И. П. Копылов. — М.: Высш. шк., 1989.—352 с.
3. Prandtl, L. Fundamentals of hydro- and aeromechanics [Text] / L. Prandtl, O.G. Tietjens. — New York: McGraw-Hill, 1934. — 456 p.
4. Милн-Томсон, Л. М. Теоретическая гидродинамика [Текст] / Л. М. Милн-Томсон. — М.: Мир, 1964. — 530 с.
5. Bird, R. B. Transport phenomena [Text] / R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot. — New York: Wiley, 1960. — 182 p.
6. Aris, R. Vectors, tensors, and the basic equations of fluid mechanics [Text] / R. Aris. — New York: Prentice-Hall, 1962. — 604 p.
7. Happel, J. Low Reynolds number hydrodynamics (with special applications to particulate media) [Text] / John Happel, Howard Brenner. — New York: Prentice-Hall, 1965. – 631 p.
8. Andrade, E. N. Viscosity and plasticity [Text] / E. N. Andrade. — New York: Chemical Publishing Co., 1951. — 230p.
9. Rouse, H. Advanced mechanics of fluids [Text] / H. Rouse. — New York: Wiley, 1959. — 414 p.
10. Pai, S. Viscous flow theory: I—Laminar flow [Text] / S. Pai. — New York: D. Van Nostrand, 1956. — 364 p.
11. Meksyn, D. New methods in laminar boundary layer theory [Text] / D. Meksyn. — New York: Pergamon, 1961. — 322 p.
12. Preiningereva, V. Spojeny vypocet magnetickeho pole, pole ztrat a otepleni ve vinutich velkych olejovych transformatorn a jeho overeni [Text] / V.

Preiningereva, V. Kahoun, I. Dolezel // *Electrotechn. obz.* — 1984. — 73, №2. — pp. 69-76.

13. Preiningereva, V. Teplotni pole v civkach olejovych transformatoru [Text] / V. Preiningereva, M. Pivrnec // *Transformatory.* — 1976. — № 2-3. — P. 18-24.

14. Preiningereva, V. Temperature distribution in the coil of a transformer windings [Text] / V. Preiningereva, M. Pivrnec // *Proceedings of the IEE.* — 1977. — Vol. 124. — №3. — pp. 218-222.

15. Preiningereva, V. Method of calculation of the distribution of additional losses and temperature rise in the winding of a transformer [Text] / V. Preiningereva, M. Prager // *Int. Symp. Electrodyn. Forces and Losses Tr.* — 1979. — pp. 187-199.

16. Preiningereva, V. Thermal analysis of large oil-immersed transformer windings [Text] / V. Preiningereva, V. Kahoun, I. Dolezel // *Elec. and Power Syst.* — 1983. — 8. — №2. — pp. 89-102.

17. Исакеев, А.И. Расчет распределения температур в обмотках тяговых трансформаторов методом электротепловой аналогии [Текст] / А.И. Исакеев, Н.Н. Киселев // *Сб. трудов Ленинградского института ж. д. транспорта.* — 1979. — Вып. 295. — С. 65-70.

18. Рассальский, А.Н. Расчет максимальной температуры катушечных обмоток трансформаторов [Текст] / А.Н. Рассальский, В.А. Машкин, Ю.А. Михайловский // *Электричество.* — 1981. — №8. — С. 45-47.

19. Петров, Г.Н. К вопросу определения максимальной температуры изоляции обмоток силовых трансформаторов [Текст] / А.Н. Рассальский, В.А. Машкин, Ю.А. Михайловский // *Электротехника.* — 1974. — №4. — С. 15-17.

20. Бутина, Т. П. Температурные поля в трансформаторной обмотке с направляющими перегородками [Текст] / Т. П. Бутина, Ю. Я. Шелыкалов //

Тезисы доклада Международной научно-технической конференции "8 Бенардос. чтения", Иваново. — 1997. — С. 34-39.

21. Preiningerova, V. Foil-wound transformer [Text] / V. Preiningerova, J. Mlynek, V. Kahoun // *Ektrotechnic Obzerver*. — 1991. — № 6. - pp. 199-209.

22. Tanguy, A. Thermal Performance of Power Transformers: Thermal Calculation Tools Focused on New Operating Requirements [Text] / A. Tanguy, J.P. Patelli, J.P. Taisne, F. Devaux, T. Ngnegueu // *CIGRE Paris Session 2004*. — Report A2 — p.105.

23. Allen, P.H.G. Heat transfer in electrical machines [Text] / P.H.G. Allen // *Elec. Times*. — 1967. — № 19. — pp. 85-92.

24. Allen, P.H.G. Cooling transformer windings [Text]/ P.H.G. Allen, D.I. Allen // *Electr. Times*. — 1963. — № 143. — pp. 505-508.

25. Машкин, В.А. Исследование стационарных температурных полей обмоток трансформатора методом математического моделирования [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.09.01/ В.А. Машкин. — М., 1975. — 170с.

26. Петров, Г.Н. О нагревании катушек, обтекаемых током [Текст] / Г.Н. Петров // *Вестник электропромышленности*. — 1930. — №2. — С. 26-31.

27. Zhang, J. A comprehensive resistance network-based hydraulic model for coolant flow in disk-type electrical transformer windings. *Progress Transport Phenomena* [Text] / J. Zhang, X. Li // *Proc. 13th Int.Symp. Transport Phenomena, Elsevier*. — 2002. — pp. 545-550.

28. Zhang, J. Oil cooling for disk-type transformer windings [Text] / J. Zhang, X. Li // *Part I: Theory and model development, IEEE Trans. Power Del.* — Vol. 21. — 2006. — pp. 1318-1325.

29. Zhang, J. Oil cooling for disk-type transformer windings [Text] / J. Zhang, X. Li // *Part II: Parametric studies of design parameters, IEEE Trans. Power Del.* — Vol. 21. — 2006. — pp. 1326-1332.

30. Петров, Г.Н. Температурное поле в обмотках трансформатора [Текст] / Г.Н. Петров, В.А. Машкин // Изв. АН СССР: Энергетика и транспорт. — 1975. — №1. — С. 78-81.

31. Петров, Г.Н. Согласование теплового и гидравлического расчетов при моделировании температурных полей обмоток трансформаторов [Текст] / Г.Н. Петров, В.А. Машкин // Электротехника. — 1972. — №3. — С. 23-28.

32. Машкин, В.А. Определение коэффициентов теплоотдачи слоевых обмоток трансформаторов [Текст] / В.А. Машкин, А.Н. Рассальский // Проблемы технической термодинамики.- 1975. — № 51. — С. 85-88.

33. Петров, Г.Н. Теплоотдача в вертикальных охлаждающих каналах обмоток трансформаторов [Текст] / Г.Н. Петров, А.Н. Рассальский, В.А. Машкин // Труды МЭИ. — 1974. — № 189. — С. 3-9.