

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Козлов Володимир Володимирович

УДК 621.314.21

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИМУСОВОГО
ОХОЛОДЖЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ МАСЛЯНИХ
ТРАНСФОРМАТОРІВ**

Спеціальність 05.09.01 - Електричні машини і апарати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2004

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі теоретичної та загальної електротехніки
Запорізького національного технічного університету
Міністерства освіти і науки України, м. Запоріжжя

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Рассальський Олександр Миколайович,
Запорізький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних апаратів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сосков Анатолій Георгійович,
Харківська національна академія
міського господарства
завідувач кафедри електротехніки;

кандидат технічних наук
Бікі Меньгерт Акошович,
ВАТ "Запоріжтрансформатор", м. Запоріжжя
генеральний конструктор підприємства.

Провідна установа: Інститут електродинаміки
НАН України, м. Київ

Захист відбудеться "7" жовтня 2004 р. о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "3" вересня 2004 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Марков В.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Теплові процеси є найважливішим чинником, що обумовлює раціональне проектування та експлуатацію трансформаторів. Номінальна потужність трансформатора обумовлюється значеннями температур обмоток і сердечника при його тривалому навантаженні. Величина температури обумовлює термін служби трансформатора, оскільки надмірне збільшення температури призводить до інтенсивного старіння ізоляції. З іншого боку, трансформатор, що має в заданому режимі роботи максимальну температуру значно нижче нормованої, виявляється запроектованим із зайвою витратою матеріалів.

Підвищення точності розрахунку максимальної температури дозволяє:

- при проектуванні високовольтних трансформаторів збільшити ефективність охолодження, за рахунок оптимізації геометричних розмірів каналів, дистанційних рейок та обмоток;
- у процесі експлуатації дозволяє відслідковувати на підставі інформації про реальні умови роботи процеси старіння ізоляції (а, отже, оцінювати фактичний термін служби трансформатора до ремонту).

Теплові процеси, незважаючи на виняткове значення і велику кількість робіт, присвячених їхньому вивченню, є в даний час одним з найменш розроблених питань у трансформаторобудуванні, а теплові розрахунки відносяться до числа найменш точних. Якщо різні електричні розрахунки можуть бути виконані з погрішністю кілька відсотків, то при розрахунку температур обмоток трансформаторів у різних режимах роботи погрішність складає у деяких випадках десятки відсотків.

Таким чином, актуальність розглянутих у дисертації питань, підтверджується необхідністю зменшення матеріалоємності проектного електроустаткування та підвищення точності оцінки термінів служби трансформаторів, які знаходяться в експлуатації. Це є надзвичайно важливою проблемою теорії і практики сучасного електромашинобудування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація була виконана у відповідності з тематичним планом науково-дослідних робіт на 2000-2003 р. кафедри теоретичної та загальної електротехніки, який прийнято на засіданні кафедри 08.06.2000 р. і затверджено на розширеному засіданні президії науково-технічної ради Запорізького національного технічного університету 18.10.2000 р. Тема роботи: "Розробка методик дослідження електромагнітних і теплових полів з метою оптимізації електротехнічного устаткування" (здобувач - виконавець).

Представлені у дисертації результати роботи спрямовані на підвищення ефективності охолодження циліндричних і дискових обмоток високовольтних трансформаторів при примусовій циркуляції масла. Вони дозволяють поліпшити оцінки навантажувальної здатності тран-

сформаторів при проектуванні і терміну їхньої експлуатації з урахуванням реальних умов роботи.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності примусового охолодження високовольтних масляних трансформаторів на основі аналізу впливу геометричних розмірів і теплофізичних параметрів на максимальну температуру обмоток, з урахуванням складної форми охолоджуючих каналів, розподілу додаткових втрат та наявності конвекційного теплообміну.

Для досягнення зазначеної мети в дисертаційній роботі вирішувалися наступні основні задачі:

- формулювання та обґрунтування допущень, які є основою для розробки математичної моделі теплообміну в циліндричних обмотках високовольтних масляних трансформаторів з примусовим охолодженням для розрахунку розподілу температури та швидкості течії масла в вертикальних охолоджуючих каналах;

- дослідження впливу геометричних розмірів вертикальних охолоджуючих каналів та дистанційних рейок, швидкості течії масла для випадків симетричного і асиметричного режимів охолодження на величину максимальної температури циліндричних обмоток;

- формулювання та обґрунтування допущень, які є основою для розробки математичної моделі теплообміну в дискових обмотках високовольтних масляних трансформаторів з примусовим охолодженням;

- дослідження впливу геометричних розмірів горизонтальних охолоджуючих каналів на величину максимальної температури дискових обмоток;

- розробка практичних рекомендацій щодо вибору геометричних розмірів вертикальних та горизонтальних охолоджуючих каналів.

Об'єкт дослідження - обмотки високовольтних масляних трансформаторів з примусовим охолодженням, як джерела теплової енергії.

Предмет дослідження - теплове поле в системі: обмотки високовольтного масляного трансформатора - охолоджуючі вертикальні та горизонтальні канали.

Методи дослідження – Для вирішення поставлених задач використовувалися методи математичного моделювання процесів теплообміну в обмотках. Для розв'язання основних рівнянь математичних моделей теплообміну в циліндричних і дискових обмотках трансформаторів застосовувався метод кінцевих елементів. Для одержування аналітичних залежностей фізичних характеристик трансформаторного масла від температури використовувався метод мінімізації середньоквадратичного відхилення.

Наукова новизна одержаних результатів.

- Запропоновано математичну модель теплообміну в циліндричних обмотках і вертикальних охолоджуючих каналах високовольтних масляних трансформаторів з примусовим охолодженням, у якій, на відміну від існуючих, запропоновано визначення координат межі теплового межового шару на основі енергетичного балансу. Науково обґрунтовано вплив теплового межового шару на теплообмін у обмотках.

- Науково обґрунтовано визначення розподілу швидкості течії масла та температур всередині вертикальних охолоджуючих каналів і циліндричних обмотках високовольтних масляних трансформаторів, що дозволило вирішити задачу розробки ефективної методики розрахунку максимальної температури обмотки.

- Запропоновано математичну модель теплообміну в дискових обмотках та вертикальних і горизонтальних охолоджуючих каналах високовольтних масляних трансформаторів з примусовим охолодженням, у якій, на відміну від існуючих, врахована наявність наскрізного руху масла у горизонтальних каналах.

- За допомогою математичної моделі науково обґрунтовано визначення розподілу температури в дискових обмотках високовольтних масляних трансформаторів.

Практичне значення отриманих результатів. Результати, які отримані в дисертаційній роботі, знайшли практичне застосування в розробці системи автоматизованого розрахунку високовольтних трансформаторів з примусовим охолодженням у ВАТ "Запоріжтрансформатор".

Практичне значення одержаних результатів обумовлено:

- створенням методики розрахунку максимальних температур обмоток високовольтних трансформаторів з примусовим охолодженням;

- розробкою алгоритмів та програмного забезпечення для автоматизованого розрахунку теплообміну циліндричних обмоток високовольтних трансформаторів з примусовим охолодженням;

- розв'язанням практичних задач підвищення ефективності охолодження циліндричних та дискових обмоток високовольтних трансформаторів з примусовим охолодженням.

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі на кафедрі електричних машин Запорізького національного технічного університету при підготовці фахівців за спеціальністю "Електричні машини і апарати" у дисциплінах: "Електричні машини", "Проектування електричних машин", "САПР електричних машин".

Результати дисертаційної роботи можуть бути застосовані для аналізу теплообміну та розрахунку максимальних температур обмоток високовольтних трансформаторів з примусовим охолодженням під час експлуатації трансформаторів з метою оцінювання фактичного зносу ізоляції.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем особисто розроблена методика розрахунку теплообміну в системі: циліндрична обмотка - вертикальні охолоджуючі канали; одержані аналітичні залежності фізичних характеристик трансформаторного масла від температури; досліджено вплив теплового межового шару на теплообмін у вертикальних охолоджуючих каналах і циліндричній обмотці; досліджено вплив додаткових втрат від вихрових струмів на розподіл температури всередині циліндричних обмоток; розроблена методика розрахунку швидкості течії масла в прямокутних і призматичних каналах; досліджено вплив дистанційних рейок на розподіл поверхневої щільності теплового потоку на вільній поверхні та всередині циліндричних обмоток; сформульовані практичні рекомендації з вибору геометричних розмірів вертикальних і горизонтальних охолоджуючих каналів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати, отримані в ході виконання дисертаційної роботи, доповідалися та обговорювалися на міжнародних симпозіумах " SIEMA - Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика" (Харків, 2002 і 2003 р.), а також на науково - технічних семінарах, які проводилися на кафедрах електричних машин, електричних апаратів і теоретичних основ електротехніки Запорізького національного технічного університету (Запоріжжя, 2001-2003 р.) та кафедрі електричних апаратів Національного технічного університету "ХПІ" (Харків, 2003, 2004 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи представлені в 6 статтях, що опубліковані в наукових фахових журналах, серед яких 4 виконано без співавторів.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел та трьох додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 164 сторінки. Робота містить 33 ілюстрації по тексту та 8 ілюстрацій на 8 сторінках; список використаних літературних джерел із 122 найменувань на 11 сторінках; 3 додатки на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, наведено дані про зв'язок з науковими програмами, викладено наукову новизну і практичне значення результатів дослідження, наведено відомості про їх апробацію, публікації та впровадження.

У першому розділі проведено аналітичний огляд технічної літератури за темою та обґрунтовано необхідність застосування чисельних методів для розрахунку теплообміну обмоток.

Проведений аналітичний огляд технічної літератури стосовно методів розрахунку розподілу температур у силових трансформаторах з масляним охолодженням, показав:

- незважаючи на порівняно велику кількість робіт, пов'язаних з аналізом теплових процесів електричних машин, ці розрахунки не задовольняють вимогам до точності визначення температури;
- строгі аналітичні розв'язки можливі тільки для тіл простої форми при наявності багатьох обмежуючих допущень. Для більш складних випадків аналітичні розв'язки мають вигляд рядів Фур'є чи рядів Фур'є-Бесселя. Тому такі формули не зручні для застосування на практиці;
- експериментальні дослідження виконуються на дорогих установках і вимагають великих витрат коштів і часу;
- моделювання за допомогою електричної аналогії на основі комбінованих R- та RC-моделей у зв'язку зі складністю настроювання не знайшло широкого використання;
- завдяки швидкому розвитку обчислювальної техніки з'явилася можливість використовувати чисельні методи, що раніше через великий обсяг розрахунків застосовувалися порівняно рідко;
- метод сіток для розв'язання краєвих задач є одним з універсальних чисельних методів і найчастіше застосовується для моделювання;
- метод кінцевих елементів зручно використовувати на нерегулярних сітках, що дозволяє практично без зниження точності суттєво зменшити кількість елементів сітки, а, отже, кількість рівнянь, які розв'язуються.

На підставі проведеного аналізу сформульовані задачі, що розв'язувались в поданій дисертаційній роботі: сформулювати та обґрунтувати допущення, які є основою для розрахунку теплообміну в обмотках; розробити математичні моделі теплообміну для циліндричної та дискової обмоток, які дозволяють розрахувати розподіл температури в обмотці та охолоджуючих масляних каналах у залежності від геометричних і теплофізичних параметрів системи; розробити алгоритми і програми забезпечення для розрахунку розподілу температури та швидкості течії масла у вертикальних охолоджуючих каналах; дослідити вплив геометричних розмірів вертикальних і горизонтальних охолоджуючих каналів та швидкості течії масла на величину максимальної температури обмоток; розробити практичні рекомендації щодо вибору розмірів вертикальних і горизонтальних охолоджуючих каналів.

У другому розділі сформульовані основні допущення, які використовувались при побудові математичних моделей, та особливості методу кінцевих елементів стосовно до розрахунку теплових полів в обмотках силових трансформаторів.

З точки зору умов охолодження обмотки потужних силових трансформаторів за своєю конструкцією можна поділити на два типи: циліндричні та дискові. При цьому необхідно розг-

лядати два способи охолодження, які принципово розрізняються: з природною та примусовою циркуляцією масла в охолоджуючих масляних каналах. При розробці математичної моделі було зроблено припущення, що кількість тепла, що виділяється у обмотці, є постійною по окружності обмотки, а потік масла розподіляється рівномірно у вертикальних каналах, які розміщені по окружності обмоток. Це дозволяє звести задачу до розгляду вісесиметричного поля.

Оскільки температурне поле відносно вісі обмотки є вісесиметричним, то досить розглянути теплообмін частини обмотки та призматичних каналів, які сполучені з нею. У цьому випадку потрібно розв'язувати тривимірну задачу. У багатьох випадках, з урахуванням геометричних розмірів обмоток і каналів з метою спрощення задачі (зведення її до двовимірної) можливо розглядати частину обмотки, як плоску стінку зі щілинними каналами. Залежністю фізичних властивостей масла при примусовій циркуляції масла в першому наближенні можна нехтувати. Для однозначного визначення температурного поля обмоток необхідно задавати спряжені межові умови.

Задача розрахунку теплового поля в обмотках з достатньою точністю зводиться до розв'язання двовимірної стаціонарної задачі теплопровідності. Для області А довільної форми з урахуванням граничних умов першого і (чи) третього роду вона може бути сформульована в такий спосіб:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q_v = 0, \quad (1)$$

$$t = t_{L1} \quad \text{на межі } L1,$$

$$\left[\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \right]_{L2} = q_s \quad \text{на межі } L2. \quad (2)$$

де λ - питома теплопровідність розглянутої області, Вт/м·град;

n - зовнішня нормаль, м;

α - коефіцієнт тепловіддачі на межі L розглянутої області, Вт/м²·град;

q_v - об'ємна щільність потужності джерела тепла, Вт/м³;

q_s - поверхнева щільність потужності джерела теплоти, Вт/м².

Об'єднання L_1 і L_2 утворюють повну поверхню області А. Причому величини λ , α , q_v , q_s можуть бути представлені у вигляді довільних функцій координат X , Y як неперервних, так і кусково-неперервних.

Метод кінцевих елементів заснований на визначенні температурного поля шляхом наближеного розв'язку відповідної варіаційної задачі. Задача розв'язання рівняння (1) з граничними умовами (2) у варіаційній постановці еквівалентна задачі визначення функції $t(x, y)$, яка мінімізує функціонал $I[t(x, y)]$ виду:

$$I[t(x, y)] = \iint_s \left[\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)^2 + \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)^2 - 2q_0 t \right] dx dy + \int_L (\alpha t^2 - 2q_s t) dl. \quad (3)$$

Наближення для шуканої функції $t(x, y)$ шукаємо в виді:

$$t(x, y) \approx \sum_{i=1}^N a_i f_i(x, y), \quad (4)$$

де a_i - невідомі постійні коефіцієнти;

f_i - відомі функції просторових координат;

N - кількість координатних точок розбивки області A .

Підстановка рівняння (4) у рівняння (3) дозволяє провести інтегрування по координатним перемінним і одержати величину I , яка залежить уже не від невідомих функцій, а від невідомих коефіцієнтів розкладання рівняння (4):

$$I = f(a_1, a_2, \dots, a_N). \quad (5)$$

Таким чином, для визначення наближеного розв'язку поставленої варіаційної задачі у виді (4) потрібно знайти значення a_1, a_2, \dots, a_N , які забезпечують мінімум функції (5). Умовою цього є:

$$\frac{\partial I}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial I}{\partial a_2} = 0; \quad \dots, \quad \frac{\partial I}{\partial a_N} = 0. \quad (6)$$

Розв'язавши систему (6), знайдемо значення a_1, a_2, \dots, a_N і, підставляючи їх у (4), одержимо наближений розв'язок варіаційної задачі.

При моделюванні процесів конвекційного теплообміну пряме застосування методу кінцевих елементів дає апроксимацію, подібну до центрально-різницевої схеми. Така апроксимація при великих числах Пеклі в ряді випадків може призвести до фізично неправдоподібних результатів. Умовою застосування центрально-різницевої схеми є виконання співвідношення:

$$Pe_\chi = \frac{C_p \cdot \rho \cdot W \cdot \chi}{\lambda} \leq 2, \quad (7)$$

де Pe_χ - сіткове число Пеклі;

χ - крок по просторовій координаті, м.

Наявність даної умови, з урахуванням швидкості течії трансформаторного масла і його фізичних параметрів, вимагає використання на окремих ділянках кінцевих елементів з розмірами сторони що не перевищують $\chi = 10^{-4}$ м. У свою чергу це приводить до збільшення обсягу вихідних даних, кількості алгебраїчних рівнянь і збільшення затрачуваного часу.

На підставі зроблених допущень була складена комп'ютерна програма розрахунку потенційних полів (температурного поля та поля швидкостей), яка була використана у подальших дослідженнях.

У **третьому розділі** наведені результати дослідження теплообміну циліндричних обмоток, оточених призматичними каналами.

Висота обмотки реальних трансформаторів завжди значно перевищує радіальний розмір ($H \gg a$). Як показують експериментальні дослідження, градієнт температури уздовж вертикальної осі OX близький до постійної величини ($\text{grad } t(x) = \text{const}$). Перепад температур у радіальному напрямку більше, ніж в вісьовому. Тоді $\text{grad } t(x) \ll \text{grad } t(y)$. Це означає, що теплопередача в вісьовому напрямку мала у порівнянні з теплопередачею в радіальному напрямку. Це дозволяє при розрахунку температурних полів обмотки та масла припустити, що теплові втрати будь-якого витка обмотки відводяться тільки через вертикальні поверхні витків. Теплопередачу від одного горизонтального шару до іншого при цьому можна вважати рівної нулю. З урахуванням цього реальна обмотка може бути замінена прямокутною шиною нескінченної довжини. Причому її еквівалентна теплопровідність у радіальному напрямку обчислюється за формулою [1]:

$$\lambda_y = \lambda_{\text{и}} \cdot \frac{(a_{\text{пр}} - \delta)}{2\delta} \cdot \left(1 - \frac{\delta}{4 \cdot (b_{\text{пр}} + \delta)} \right), \quad (8)$$

де $\lambda_{\text{и}}$ - теплопровідність ізоляції, Вт/мград;

$a_{\text{пр}}$ - радіальний розмір голого провідника витка, м;

$b_{\text{пр}}$ - осьовий розмір голого провідника витка, м;

δ - розмір ізоляції витка на дві сторони, м.

За таких умов температурне поле в обмотці описується рівнянням:

$$\lambda_y \frac{\partial^2 t_1}{\partial y^2} = -q_v \cdot [1 + K_{\text{доб}}(y)], \quad (9)$$

де q_v - втрати в одиниці об'єму обмотки, що спричиняються струмом навантаження в провідниках, Вт/м³;

$K_{\text{доб}}(y)$ - функція, яка враховує нерівномірність розподілу втрат по перетину обмотки за рахунок додаткових втрат від вихрових струмів і нерівномірності розподілу навантажувального струму (при недосконалої транспозиції) та ін.

При розгляді процесів руху трансформаторного масла у вертикальних каналах з метою спрощення систем рівнянь Нав'є-Стокса були прийняті деякі додаткові допущення.

Передбачалося, що тиск масла p змінюється тільки з висотою вертикальних каналів, тобто у всіх точках горизонтального перетину каналів воно постійно. Радіальна складова швидкості масла поперек вертикального каналу (уздовж горизонтальної осі oY) досить мала, і її величиною можна зневажити. З урахуванням цих допущень двовимірною задачею течії рідини в плоскому каналі зводиться до розв'язання одновимірної:

$$v \cdot \frac{d^2 W_x}{dy^2} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx} + g \cdot \beta \cdot (t_2 - t_{2cp}), \quad (10)$$

де t_{2cp} - середня температура масла на розглянутій висоті обмотки, град.

Прийняті вище допущення дозволяють також спростити рівняння енергії. Процес теплообміну у вертикальному каналі в цьому випадку описується одновимірним рівнянням Пуассона:

$$\lambda_2 \frac{d^2 t_2}{dy^2} = C_p \cdot \rho \cdot W_x \frac{dt_2}{dx}. \quad (11)$$

Для поля швидкостей на стінках вертикальних каналів (поверхні обмотки та ізоляційних циліндрів), унаслідок сил тертя, маємо нульові початкові умови:

$$\begin{aligned} W_x(y=0) &= 0, & W_x(y=h_B) &= 0, \\ W_x(y=h_B+a) &= 0, & W_x(y=h_B+a+h_H) &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Граничні умови при теплообміні:

на поверхнях обмотки:

$$\lambda_1 \frac{dt_1}{dy} = \lambda_2 \frac{dt_2}{dy}, \quad (13)$$

на поверхнях ізоляційного циліндра:

$$\frac{dt_2}{dy} = 0. \quad (14)$$

Розв'язок отриманих рівнянь здійснювався методом кінцевих елементів шляхом послідовних наближень. У першому наближенні не враховувалася зміна теплофізичних властивостей трансформаторного масла від температури. Друге наближення проводилося з урахуванням цих змін.

Внаслідок розв'язання рівнянь температурного поля визначається не абсолютне значення температури масла, а перевищення температури масла (Δt_n) у конкретній точці перетину масляного вертикального каналу стосовно температури в точці умовно-нульової температури (перевищення температури в цій точці приймається в якості умовного нульового значення).

Середня температура масла на даній висоті обмотки

$$t_{2cp} = H_2 \cdot \frac{P}{C_p \cdot Q \cdot \rho \cdot H} + t_{2(x=0)}, \quad (15)$$

де H_2 - висота розглянутого перетину щодо нижнього краю обмотки, м;

P – теплові втрати в обмотці, Вт;

Q – об'ємний розхід масла у вертикальних каналах, м³;

H – висота обмотки, м;

$t_{(x=0)}$ - температура трансформаторного масла на вході у вертикальний канал, °С.

Для реально існуючих силових трансформаторів довжина каналу завжди значно менше термічної початкової ділянки, довжина якої визначається формулою:

$$L_n = 0.055 \cdot h \cdot Pr \cdot Re. \quad (16)$$

Для трансформаторного масла в розглянутому діапазоні температур число Прандтля $Pr > 50$, число Рейнольдса $Re > 200$. Тому довжина термічної початкової ділянки $L_n > 550 \cdot h$, тобто перевищує 5 метрів.

У зв'язку з цим у розрахунках використовувалося таке допущення: поза тепловим межовим шаром температура масла залишається незмінною і дорівнює температурі на вході в канал. Відвід тепла здійснюється тільки за рахунок руху масла в тепловому межовому шарі. Це допущення дозволяє шляхом зміни місцезнаходження передбачуваної межі теплового шару визначати середню температуру масла і зіставити її з отриманої за формулою (15).

$$t_{2cp} = \frac{\sum_{n=k}^N \bar{W}_{x_n} \cdot \Delta \bar{t}_n}{\bar{W}_x} + t_{2(x=0)}, \quad (17)$$

де k – індекс вузла відповідної точки умовно-нульової температури.

На рис. 1, 2 представлені графіки розподілу швидкості течії і температури масла усередині вертикального каналу шириною $h=0.01$ м на висоті $H=1$ м, при середній швидкості масла $\bar{W} = 0.2$ м/с, розраховані в першому і другому наближенні для щільності теплового потоку $q_s = 2000$ Вт/м².

На рис. 3 зображена зміна температури поверхні циліндричної обмотки по її висоті при постійній швидкості течії масла і різній щільності теплового потоку, а на рис. 4 - при постійній щільності теплового потоку і різних швидкостей течії масла в каналі.

На рис. 5 показано, як змінюється температура охолоджуваної поверхні обмотки при постійній щільності теплового потоку $q_s = 2000$ Вт/м² у залежності від приведеної середньої швидкості для каналів різної ширини.

Аналіз отриманих результатів приводить до такого висновку: при рівних приведених середніх швидкостях збільшення ширини вертикальних каналів приводить до підвищення температури поверхні обмотки. Причина такого явища полягає в тому, що зі зміною розміру каналу змінюється товщина теплового шару. На рис. 6 показана зміна відносної товщини теплового шару від величини середньої приведеної швидкості при різних розмірах вертикального каналу. (Незважаючи на те, що відносна товщина теплового шару знижується із збільшенням ширини вертикального каналу, її абсолютне значення збільшується). Збільшення товщини цього шару призводить до того, що тепловий опір збільшується, а, отже, при незмінній щільності теплового потоку збільшується перепад температур між поверхнею обмотки і температурою межі теплового межового шару.

Знання координат межі теплового межового шару дозволяє визначити розподіл температури усередині обмотки (рис. 7).

Було проведено дослідження впливу розпірних рейок на процеси теплообміну. На рис. 8 представлені графіки залежності максимальної температури обмотки від числа шарів для двох випадків охолодження: маслом, яке тече у плоских каналах, і маслом, яке тече у каналах прямокутної форми (середня щільність теплового потоку постійна).

Як видно з рис. 8, максимальна температура для двошарової котушки при охолодженні маслом, яке тече у каналах прямокутної форми, трохи перевищує результат, отриманий при розрахунку охолодження маслом, яке тече у плоских каналах. Це пояснюється наявністю поблизу дистанційних рейок ділянок зі зниженою швидкістю течії масла. З іншого боку, зі збільшенням числа шарів максимальна температура обмотки при охолодженні маслом, яке тече каналами прямокутної форми, суттєво менше. Пов'язано це з тим, що в центральних шарах щільність теплового потоку практично рівномірна уздовж витків, і тільки в крайніх шарах вона істотно вище навпроти охолодних каналів.

Проведені дослідження за різних умов охолодження, розмірах каналів і розподілу втрат у циліндричній обмотці показали:

При дослідженні теплових процесів у системі "обмотка-канал" методом кінцевих елементів перевищення температури варто відносити до температури на вході в канал;

збільшення ширини каналів більш 0.006...0.008 м з погляду теплообміну недоцільно, тому що при незмінній середній приведеної швидкості руху масла це призводить до збільшення теплового межового шару і погіршення умов охолодження. Тому їхні розміри необхідно вибирати мінімальними, виходжуючи з умови забезпечення необхідної електричної міцності;

асиметричність охолодження через відмінність величини швидкості масла у внутрішньому і зовнішньому вертикальному каналах, нерівності їхніх геометричних розмірів, нерів-

номірність розподілу втрат впливає на величину максимальної температури обмотки і місце розташування максимально нагрітої точки;

при аналізі теплообміну обмоток трансформаторів необхідно розглядати процес теплообміну з урахуванням впливу на цей процес розпірних рейок. Цей вплив позначається як за рахунок зміни профілю швидкості масла в каналі, так і за рахунок теплопередачі через рейки.

У четвертому розділі наведені результати дослідження теплообміну дискових обмоток. У роботі розглядалася картина руху масла в горизонтальному каналі, що допускає протікання масла уздовж усього горизонтального каналу. Вона одержана в наслідок накладення як сил тиску, що обумовлюють примусову течію масла, так і гравітаційних сил, обумовлених зміною щільності масла в залежності від температури, що призводять до появи вільного конвекційного руху. Розв'язання задачі виконувалося з використанням методу суперпозицій.

Радіальна складова градієнта тиску, обумовленого роботою насоса, має різний напрямок у верхній і нижній частинах горизонтального каналу. На висоті половині ширини горизонтального каналу її величина дорівнює нулю. Напрямок горизонтальної складової градієнта тиску, що створюється за рахунок різниці щільностей масла, залишається незмінної протягом усього каналу. Тому при визначенні радіальної складової швидкості примусової течії в конкретному перетині каналу нульові граничні умови першого роду приймалися на стінках каналу і прилягаючих котушок на висоті $0.5 \cdot h_T$, а при визначенні швидкості конвекційної течії - на стінках каналу.

Використання методу накладення дозволяє визначити радіальну складову швидкості течії масла в горизонтальному каналі під впливом обох факторів.

Загальна картина течії масла зображена на рис. 9. Цю картину можна розбити на три характерних ділянки. На 1-ій ділянці виникає наскрізна течія масла від внутрішнього вертикального каналу до зовнішнього. При цьому частина масла повертається назад у внутрішній канал завдяки наявності 2-ої ділянки.

З іншої сторони з зовнішнього вертикального каналу масло також попадає усередину горизонтального каналу по 3-ій ділянці і знову повертається до каналу по 1-ій ділянці. На межах ділянок радіальні (але не вісьові) складові швидкості течії масла дорівнюють нулю.

Для визначення вісьової складової швидкості масла на кожній ділянці були розраховані вертикальні складові тиски масла в горизонтальному і вертикальному каналах. Чисельне значення W_x за цими даними визначити неможливо, тому що є невідомим гідравлічний опір каналів. Однак, знаючи витрату масла через обмотку і розподіл тиску, вісьову складову швидкості руху масла можна визначити в такий спосіб. Швидкість течії W_x пропорційна тиску:

$$W_{x_i} = k_w \cdot \frac{\Delta p_i}{\Delta x}, \quad (18)$$

де k_w - коефіцієнт пропорційності, який враховує гідравлічний опір, $\text{м}^4 \cdot \text{н}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Оскільки розглянутий перетин розбивався на рівні кінцеві елементи, середня швидкість у цьому випадку дорівнює:

$$\bar{W}_x = \frac{\sum_{i=0}^G W_{x_i}}{G}, \quad (19)$$

де G - кількість точок розбивки.

Загальна витрата масла через обмотку пропорційна радіальному розміру розглянутого перетину:

$$Q = \rho \cdot \bar{W}_x \cdot h_k \cdot (h_B + L + h_H) \cdot N_v, \quad (20)$$

де N_v - кількість зовнішніх (внутрішніх) вертикальних каналів.

Зіставлення формул (18-20) дозволяє визначити коефіцієнт k_w :

$$k_w = \frac{Q \cdot G}{\rho \cdot h_k \cdot (h_B + L + h_H) \cdot N_v \cdot \sum_{i=0}^G W_{x_i}}. \quad (21)$$

Знання величини коефіцієнту k_w і вертикальних складових тиску масла дозволяє обчислити осьову складову швидкості масла.

Результати розрахунку поля швидкості течії трансформаторного масла в горизонтальному каналі є основою для визначення температурного поля усередині обмотки.

З метою спрощення подальших розрахунків для обліку перенесення тепла, як за рахунок теплопровідності, так і конвекційного теплоперенесення, вводилося поняття еквівалентної теплопровідності:

$$\lambda_{\text{екв}_i} = \lambda_3 + C_p \cdot \rho \cdot W_i \cdot \chi. \quad (22)$$

Результати розрахунку температурного поля дискової обмотки при такому допущенні й умові рівномірного об'ємного розподілу теплових втрат представлені на рис. 10. Там же для порівняння приведені результати експериментальних вимірів, проведених термопарами на реальній обмотці.

Використовуючи запропоновану математичну модель, були досліджені залежності нагрівання обмотки від питомих втрат, які виділяються в обмотці, та геометричних розмірах (висоти) горизонтальних каналів. Розміри вертикальних каналів і величина розходу масла через обмотку приймалися постійними.

Для оцінки впливу геометричних розмірів горизонтального каналу і величини теплових втрат на величину максимальної температури обмотки зручно скористатися таким критерієм:

$$k_t = \frac{\bar{q}_s}{\Delta t}, \quad (23)$$

де \bar{q}_s - середня щільність теплового потоку на поверхні обмотки, Вт/м²;

Δt - максимальне перевищення температури обмотки над температурою масла на вході в обмотку ($\Delta t = t_{\max} - t_o$), град.

Проведені розрахунки показують, що для висоти горизонтального каналу існує оптимальна величина. Коефіцієнт k_t досягає максимуму за умови, що висота горизонтального каналу складає приблизно 10% від радіального розміру котушки.

Дослідження впливу середньої питомої потужності теплових втрат на величину коефіцієнта віддачі показало: незважаючи на те, що функція $k_t = f(q_v)$ монотонно зростаюча, її збільшення не може компенсувати зміну перевищення максимальної температури над температурою масла при зростанні теплових втрат у трансформаторі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі знайшла подальший розвиток та обґрунтування стосовно до високовольтних трансформаторів з примусовим масляним охолодженням методика розрахунку температурних полів, заснована на спільному розв'язанні рівнянь теплопровідності, енергії і руху при сполучених граничних умовах за допомогою метода кінцевих елементів, що дозволяє підвищити ефективність охолодження циліндричних і дискових обмоток на основі аналізу впливу геометричних та теплофізичних параметрів на максимальну температуру обмотки, з урахуванням складної форми охолоджуючих каналів, розподілу додаткових втрат та наявності конвекційного теплообміну.

1. Існуючі методики аналізу ефективності примусового охолодження обмоток високовольтних масляних трансформаторів з примусовим охолодженням мають суттєві недоліки. Значна частина їх базується на експериментальних дослідженнях тепловіддачі обмоток трансформаторів, що потребує великих затрат коштів та часу. Моделювання за допомогою електричної аналогії потребує використання значної кількості елементів, що призводить до великих затрат часу на їх настройку. Застосовність результатів таких досліджень обмежена. Методи математичного моделювання дають можливість вирішити задачу інтенсифікації примусового охолодження достатньо повно та достовірно. Підвищення точності розрахунку максимальної температури обмоток дозволяє:

- при проектуванні високовольтних трансформаторів збільшити ефективність охолодження, шляхом оптимізації геометричних розмірів каналів, дистанційних рійок та обмоток;
- у процесі експлуатації відслідковувати на підставі інформації про реальні умови роботи процеси старіння ізоляції (а, отже, оцінювати фактичний термін служби трансформатора до ремонту).

2. Вибір і обґрунтування спрощуючих допущень дозволили створити математичні моделі, що з достатньою точністю описують теплові процеси в обмотках високовольтних масляних трансформаторів с примусовим охолодженням.

3. Розроблено і реалізовано у вигляді комп'ютерних програм методику розрахунку розподілу температури в циліндричних обмотках високовольтних трансформаторів, а саме:

- Розроблено математичну модель теплообміну у вертикальних охолоджуючих каналах. На відміну від існуючих у розробленій моделі межа теплового межового шару визначається виходячи із енергетичних міркувань.

- Розроблено методику розрахунку максимальної температури циліндричних обмоток високовольтних трансформаторів с примусовим охолодженням при наявності несиметричних умов. При цьому враховується як асиметрія за рахунок різних умов охолодження (різні швидкості протікання масла та різні геометричні розміри внутрішніх та зовнішніх вертикальних охолоджуючих каналів), так і за рахунок нерівномірності розподілу додаткових втрат в обмотці.

- Порівняння результатів розрахунків з експериментальними показує, що похибка методики складає 5-9 %.

4. За допомогою розробленої методики проведено аналіз впливу розмірів вертикальних охолоджуючих каналів та дистанційних рейок на умови охолодження циліндричних обмоток, вироблені практичні рекомендації з оптимізації їх величин. Дослідження показали, що збільшення ширини вертикальних охолоджуючих каналів більш ніж 0.006...0.008 м недоцільно, так як при незмінній середній масовій швидкості масла призводить до збільшення теплового межового шару та погіршення умов охолодження.

5. Розроблено методики розрахунку розподілу температури в дискових обмотках, а саме:

- Розглянуто причини появи наскрізної течії масла в горизонтальних каналах при наявності асиметрії умов охолодження та вплив цієї течії на процеси теплообміну.

- З метою спрощення обліку конвекційного теплопереносу запропоновано використовувати поняття еквівалентної питомої теплопровідності.

- Порівняння результатів розрахунків з експериментальними показує, що похибка для роздільної методики складає 7-8%, а для спрощеної методики - 8-10 %.

- Застосування запропонованих методик та існуючих програм розрахунку методом кінцевих елементів, пристосованих для розрахунку температурних полів, дозволило проаналізувати вплив розмірів горизонтальних каналів на умови охолодження дискових обмоток у стаціонарному режимі. Дослідження показали, що оптимальна з умов охолодження висота горизонтальних каналів складає 10% від радіального розміру обмотки.

6. Основні результати роботи, отримані у вигляді рекомендацій і методик розрахунку максимальної температури циліндричних і дискових обмоток високовольтних трансформаторів з примусовим охолодженням, реалізовані у вигляді комп'ютерних програм. Вони можуть використовуватися для оптимізації охолодження і при складанні програми комплексної системи машинного проектування при розробці нових трансформаторів. Використання запропонованих моделей дозволяє підвищити точність обчислення максимальної температури обмоток, що необхідно відповідно до рекомендацій МЕК при розрахунках навантажувальної здібності трансформатора. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані для аналізу теплообміну та розрахунку максимальних температур обмоток високовольтних трансформаторів з примусовим охолодженням з метою оцінки фактичного зносу ізоляції.

7. Основні результати дисертаційної роботи нашли практичне використання при розробці системи автоматичного розрахунку високовольтних трансформаторів з примусовим охолодженням у ВАТ "Запоріжтрансформатор", використовуються у навчальному процесі на кафедрі електричних машин Запорізького національного технічного університету при підготовці фахівців за спеціальністю "Електричні машини та апарати" у дисциплінах "Електричні машини", "Проектування електричних машин", "САПР електричних машин".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Козлов В.В., Машкин В.А., Набокова О.В. Расчет эквивалентной осевой составляющей удельной теплопроводности дисковой обмотки силового трансформатора // Электрический журнал. - Запорожье: НПО "Альфа-Омега". - 1998. - №2. - С. 32-35.
Здобувач дослідив температурне поле дискової обмотки в залежності від товщини ізоляції проводу та запропонував формулу для розрахунку питомої теплопровідності.
2. Козлов В.В. До розрахунку максимальної температури обмоток трансформаторів з урахуванням розподілу осьової складової потоку розсіювання // Електротехніка та електроенергетика. - Запоріжжя: ЗНТУ. - 1999.- №2. - С. 31-33.
3. Козлов В.В., Рассальский А.Н. К вопросу о влиянии прокладок внутри дисковых обмоток на величину максимальной температуры изоляции // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАНУ. - 1999. - №6. - С. 59-61.

Здобувач дослідив температурне поле ізоляційних прокладок і його вплив на величину максимальної температури обмотки.

4. Козлов В.В. Расчет скоростей масла в призматических каналах силовых трансформаторов // Електротехніка та електроенергетика. - Запоріжжя: ЗНТУ. - 2000. - №1. - С. 50-52.
5. Козлов В.В. Проблеми моделювання теплових режимів у силових трансформаторах // Електротехніка та електроенергетика. - Запоріжжя: ЗНТУ. - 2002. - №1. - С. 47-48.
6. Козлов В.В. Расчет максимальной температуры обмоток силовых трансформаторов методом конечных элементов // Електротехніка і електромеханіка. - Харків: НТУ "ХП", 2003. - №1. - С. 49-52.

АНОТАЦІЇ

Козлов В.В. Підвищення ефективності примусового охолодження високовольтних масляних трансформаторів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 - електричні машини і апарати. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2004.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності охолодження обмоток силових трансформаторів з примусовою циркуляцією масла шляхом математичного моделювання на основі методу кінцевих елементів, неоднорідності структури матеріалу та конструкції елементів, складної форми охолоджуючих каналів. Вибір певних допущень дозволив розробити математичні моделі, які з достатньою для інженерних розрахунків точністю, описують теплові процеси в обмотках трансформатора.

Основні результати роботи, які одержані у вигляді рекомендацій та методів розрахунку максимальної температури циліндричних і дискових обмоток силових трансформаторів, реалізовані у вигляді комп'ютерних програм. Використання запропонованих моделей дозволяє визначити максимальну температуру обмотки, що необхідно згідно з рекомендаціями МЕК при розрахунку навантажувальної здібності трансформатора. Проведено дослідження при різних умовах охолодження, розмірах каналів і розподілах втрат у обмотках. Сформульовано практичні рекомендації з вибору оптимальних розмірів охолоджуючих каналів.

Ключові слова: трансформатор, обмотка, масляне охолодження, тепловий межовий шар, максимальна температура.

Козлов В.В. Повышение эффективности принудительного охлаждения высоковольтных масляных трансформаторов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электрические машины и аппараты. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2004.

Диссертация посвящена повышению эффективности охлаждения обмоток силовых трансформаторов с принудительной циркуляцией масла путем математического моделирования на основе метода конечных элементов. Выбор определенных упрощающих допущений позволил создать математические модели, которые с достаточной для инженерных расчетов точностью, описывают тепловые процессы в обмотках трансформатора.

В первом разделе проведен аналитический обзор технической литературы по теме, выбрано направление исследования. Проведенный аналитический обзор технической литературы, относящийся к методикам расчета распределения температур в силовых трансформаторах с масляным охлаждением, показал: несмотря на сравнительно большое число работ, связанных с анализом тепловых процессов электрических машин, эти расчеты не удовлетворяют требованиям к точности определения температуры. Благодаря быстрому развитию вычислительной техники появилась возможность использовать численные методы, которые ранее в виду большого объема расчетов применялись сравнительно редко.

Во втором разделе сформулированы основные допущения, использованные при построении математических моделей, и особенности метода конечных элементов применительно к расчету тепловых полей в обмотках силовых трансформаторов. Выявлены возможности применения этого метода в условиях конвективного теплообмена. Рассмотрена структура решения задачи. В соответствии с изложенной структурой разработана и была использована в дальнейших исследованиях программа расчета потенциальных полей (температурного поля и поля скоростей).

В третьем разделе приведены результаты исследования теплообмена цилиндрических обмоток, окруженных призматическими каналами.

Проведенные исследования при различных условиях охлаждения, размеров каналов и распределения потерь в цилиндрической обмотке показали:

при исследовании тепловых процессов в системе обмотка-канал методом конечных элементов превышение температуры следует относить к температуре на входе в канал;

увеличение ширины каналов более 0.006...0.008 м с точки зрения теплообмена нецелесообразно, так как при неизменной средней массовой скорости движения масла это приводит к увеличению теплового пограничного слоя и ухудшению условий охлаждения. Поэтому их размеры необходимо выбирать минимальными, исходя из условия обеспечения необходимой электрической прочности;

несимметричность охлаждения из-за отличия величины скорости масла во внутренних и внешних вертикальных каналах, неравенства их ширины или из-за неравномерности распределения потерь оказывает влияние на величину максимальной температуры обмотки и местоположение максимально нагретой точки;

при анализе теплообмена обмоток трансформаторов необходимо рассматривать процесс теплообмена с учетом влияния на этот процесс распорных реек. Это влияние сказывается за счет изменения профиля скорости масла в канале и за счет теплопередачи через рейки.

В четвертом разделе приведены результаты исследования теплообмена дисковых обмоток. В работе рассматривалась картина движения масла в горизонтальном канале, допускающая протекание масла вдоль всего горизонтального канала и получаемая в результате наложения как сил давления, обуславливающих принудительное течения масла, так и гравитационных сил, обусловленных изменением плотности масла в зависимости от температуры и приводящих к появлению свободного конвективного движения.

С целью упрощения расчетов для учета переноса тепла, как за счет теплопроводности, так и конвективного теплопереноса, вводилось понятие эквивалентной теплопроводности для каждого элемента.

Основные результаты работы, полученные в виде рекомендаций и методик расчета максимальной температуры цилиндрических и дисковых обмоток силовых трансформаторов, реализованы в виде компьютерных программ. Они могут использоваться для оптимизации расчетов и при составлении программы комплексной системы машинного проектирования при разработке новых трансформаторов. Использование предлагаемых моделей позволяет определить максимальную температуру обмоток, что необходимо согласно рекомендациям МЭК при расчете нагрузочной способности трансформатора.

Основные результаты диссертационной работы нашли практическое применение в разработке системы автоматического расчета высоковольтных трансформаторов с принудительным охлаждением в ОАО "Запорожтрансформатор" и используются на кафедре электрических машин Запорожского национального технического университете при подготовке специалистов по специальности "Электрические машины и аппараты" в дисциплинах "Электрические машины", "Проектирование электрических машин", "САПР электрических машин".

Ключевые слова: трансформатор, обмотка, масляное охлаждение, тепловой пограничный слой, максимальная температура.

Kozlov V.V. Rising the efficiency of forced cooling of high-voltage oil transformers. – Manuscript.

The thesis is for technical science candidate's degree, speciality 05.09.01 – electrical machines and devices. National technical University "Kharkov polytechnic Institute", Kharkov, 2004.

The thesis is devoted to the rising the efficiency of cooling of the windings of power transformers with compulsory circulation of oil by the way of mathematical simulation on the basis of the method of finite elements in view of initial conditions, non-uniform structure of the material and the design, complex form of cooling channels. The choice of definite simplifying assumptions allowed to create the mathematical models, which describe thermal processes in transformer windings with enough exactness for engineering calculations.

The main results of the work obtained in the form of recommendations and methods of calculation of maximum temperature in cylinder and disk windings of power transformers were realized in the form of computer programs. The use of offering models allows to determine the maximum temperature of a winding, and that is necessary when making the calculation of transformer loading ability according to advice of IEC. The investigations with different conditions of cooling, sizes of channels and distribution of losses in windings were carried out. The practical recommendations on the occasion of the choice of cooling channels were formulated.

Key words: transformer, winding, oil cooling, thermal boundary layer, maximum temperature.