

Восстановленные остатки $\gamma_5=22$ и $\gamma_6=13$, $A^{\delta}=(\gamma^{\delta}_5, \gamma^{\delta}_6)=(22, 13)$. Поскольку $A^{\delta} \neq A$, произведение $N^{\delta} < M$, т.е. N^{δ} выходит за рабочий диапазон системы.

Реализация базового алгоритма проста для схемной реализации при создании эффективных параллельных вычислительных структур высокой производительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. - М.: Советское радио, 1968. - 440 с.
2. Коляда А.А., Чернявский А.Ф. Модулярные вычислительные структуры: вчера, сегодня, завтра. Сайт <http://www.computer-museum.ru/>, 2005
3. Червяков Н.И. Методы и принципы построения модулярных нейромикрокомпьютеров. Сайт <http://www.computer-museum.ru/>, 2005
4. Полисский Ю.Д. Некоторые вопросы выполнения сложных операций в системе остаточных классов. // Электронное моделирование. – 2008.- Т.30. - №2. – С. 115-120.
5. Полисский Ю.Д. Выполнение позиционных операций в непозиционной системе остаточных классов // Математичне моделювання. - 2008.- №1 (18). - С. 20-24.
6. Полисский Ю.Д. Табличная реализация базового алгоритма для выполнения сложных операций в системе остаточных классов. // Міждержавна науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання»: Тези доповідей.- 19-21 травня 2010 р. - Дніпродзержинськ. - 2010. - С. 196-199.

пост. 02.06.2010

Математичне моделювання теплообмінних процесів в обмотках трансформаторів з висотою горизонтального каналу менше 3 мм

ЛЬЇН С.В., ЯКОВЛЄВА І. Г.

Запорізька державна інженерна академія

Данная статья описывает способ создания математической модели трансформаторной обмотки с шириной горизонтального канала менее 3 миллиметров. Вопрос организации эффективного отвода теплоты от активной части трансформатора в настоящее время является одним из ключевых в современном трансформаторостроении. В качестве варианта решения этих задач в этой работе было выбрано математическое моделирование с помощью метода конечных элементов. В статье сделан краткий обзор программного обеспечения, которое может быть применено для создания математической модели процессов, которые имеют место в указанных обмотках. Подробно описан алгоритм создания модели в среде ANSYS Flotran. В статье приведены результаты расчета температуры меди модели обмоток трансформатора.

Дана стаття описує спосіб створення математичної моделі трансформаторної обмотки із шириною горизонтального каналу менше 3 міліметрів. Питання організації ефективного відводу теплоти від активної частини трансформатора в цей час є одним із ключових у сучаснім трансформаторобудуванні. У якості варіанта розв'язку цього завдання було обрано математичне моделювання за допомогою методу кінцевих елементів. У статті зроблено короткий огляд програмного забезпечення, яке може бути застосоване для створення математичної моделі процесів, які мають місце в зазначених обмотках. Докладно описаний алгоритм створення моделі в середовищі ANSYS Flotran. У статті приведені результати розрахунків температури міді моделі обмоток трансформатора.

This article describes the methodological approach to creation of mathematical model. This model presents a transformer winding with the horizontal channel width less than 3 millimeters. Because of increasing systems complexity of electro supply, and as a result, the increasing of electric cars in the sizes, new problems arise before engineers. One of them is the problem to improve the cooling of a transformer active part. We decided to solve it through mathematic modeling by means of a final elements method. The short review of the software which can be applied to the mathematical model of processes creation is made in this article. Such processes take place in the specified windings. The model creation algorithm in the ANSYS Flotran environment is described in detail. The transformer windings copper temperature field calculations results have practical interest.

Вступ. Визначальна тенденція в розвитку трансформаторобудування - підвищення напруг і одиничних потужностей. Створення трансформаторів більших потужностей пов'язане з ростом потужності генераторів[1].

У сучаснім електромашинобудуванні проблеми високої напруги й охолодження усе більш і більш вису-

ваються на перший план. Зростаюча довжина мереж вимагає збільшення напруг електропередачі; це у свою чергу приводить до зростання іспитових напруг, що підключаються апаратів. Однак при високій напрузі й малій номінальній потужності вартість машини, що доводиться на одиницю потужності, виходить нерозмі-

рне великий, так що вимоги економії змушують будувати усе більші машини. У таких електричних машинах великої потужності розв'язок питань охолодження стає усе більш скрутним [2].

Перевищення температури в машині не повинне перевершувати нормованої величини, а для того щоб не виходити за її межі, необхідно втримувати на відповідно низькому рівні величину питомого теплового потоку, що при зростаючих лінійних розмірах, які характеризуються радіусом r досягне тільки шляхом зниження питомих втрат на одиниці об'єму q . Як відомо, це зниження втрат обумовлюється зменшенням електромагнітних навантажень, тобто щільності струму або магнітної індукції, і спричиняє збільшення питомих витрат матеріалів, таким чином, збільшення розмірів машин приводить до збільшення вартості матеріалів на одиницю потужності. Щоб уникнути цього або, інакше кажучи, для збереження величини q незмінної при зростаючих розмірах електричних машин необхідно збільшувати охолодні поверхні, як шляхом підрозділу тіл, що виділяють тепло, так і за допомогою розміщення додаткових охолодних поверхонь. Охолодні дії можна підвищити також особливими штучними прийманнями, наприклад, штучно підвищуючи швидкість зовнішнього охолодного середовища.

Чим краще з найменшими витратами це вдасться зробити, тим вище можна вибирати електричні й магнітні навантаження й відповідно менше витратити активних матеріалів, виходячи з того самого перегріву. Усе це дозволяє виявити певні зв'язки між витратою матеріалу, номінальною потужністю, охолодженням і економічними міркуваннями. Однак зі складених міркувань однозначно випливає, що для проектування машини, заснованої на вимогах економії, проблема охолодження має вирішальне значення [2].

Дотепер розглядалося тільки нагрівання поверхні; але для того щоб досягти охолоджуваної поверхні, тепловий потік повинен спершу проникнути через активну частину тіла, у якій виділяється тепло, а також через ізоляційний матеріал, що згідно із загальними законами теплопровідності неминуче підвищує температуру стосовно охолоджуваної поверхні, тобто починаючи від охолоджуваної поверхні в напрямку до середини такого тіла температура завжди підвищується.

Основна частина. Принципові вимоги, які необхідно враховувати при проектуванні електричних машин, зводяться до наступних:

1. При проектуванні потрібно прагнути, щоб усередині машини не перевищувалася певна середня температура. Максимальні температури усередині активних частин вимагають особливого обмеження й контролю.

2. Для того щоб у заданій конструкції визначити розрахунковим шляхом середні й максимальні перевищення температури, відповідні до певного навантаження, повинні бути розроблені необхідні аналітичні методи, а також експериментальні обладнання.

На сучасному етапі розвитку вітчизняного трансформаторобудування, в умовах постійного росту цін на метал, трансформаторне масло, а також ріст цін на транспорт, усе більше значення набувають питання зниження розмірів електричних машин, а також зниження витрати електроенергії на організацію циркуляції масла в каналах обмоток трансформаторів, шляхом заміни

змушеної циркуляції трансформаторного масла на природно.

Найважливішим фактором забезпечення надійності й довговічності трансформаторного встаткування є ефективний відвід частини енергії, теплоти, що виділяється у вигляді, в основних елементах конструкції: у магнітній системі, в обмотках, деталях кістяка активної частини, у баку й в інших струмопровідних елементах. Саме ефективність тепловідводу визначає технічні, масогабаритні й економічні характеристики трансформатора, а в деяких випадках і умови його надійного функціонування в напружених режимах експлуатації.

Одним з можливих способів одержання необхідних результатів є застосування сучасних методів математичного моделювання спільних процесів гідродинаміки й теплообміну в технічних обладнаннях (зокрема в трансформаторах) із застосуванням, наприклад, такого програмного забезпечення (ПО), як STAR-CD, FLUENT, CFX [3]. За допомогою цих програм реалізуються так звані CFD-(Computational Fluid Dynamics) методи (методи обчислювальної гідродинаміки), засновані на сучасних комп'ютерних технологіях, загальних універсальних математичних моделях процесів переносу теплоти й речовини, а також наборі певного кількості апробованих, ефективних і високоточних чисельних алгоритмів. Розроблені Cfd- програми дозволяють будувати Cfd-моделі, які являють собою фізико-математична цифрова вистава досліджуваного об'єкта й/або процесу, засноване на чисельному розв'язку системи рівнянь Нав'є - Стокса й збереження енергії.

Під розробкою Cfd-моделі мається на увазі процес комп'ютерної вистави таких складових Cfd- моделі, як геометрія досліджуваного об'єкта, оптимальної розрахункової сітки, граничних, початкових умов і фізичних властивостей використовуваних матеріалів, а також параметрів вибору конкретного алгоритму й наступного чисельного розв'язку повної системи рівнянь Нав'є - Стокса. При використанні Cfd-технологій з'являється принципова можливість використання повної детальної тривимірної геометричної моделі теплообміну в сполученій постановці досліджуваного об'єкта без яких-небудь істотних спрощень. Сполучена постановка завдань означає одночасний погоджений розрахунок полів температур, швидкостей і тисків для всіх складових досліджуваного об'єкта, що дозволяє уникнути необхідності в спрощенні спільних фізичних процесів і завданні коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях обтікання твердих деталей досліджуваної системи рідиною. Стосовно до трансформаторів, поля температур можуть розраховуватися в довільній кількості локальних крапок. Таким чином, Cfd-моделі теплового стану в сполученій постановці позбавлені недоліків, властивих методикам розрахунків усереднених температур і, потенційно, мають більш високу точність, а також значно більшою інформативністю[3].

Тому обчислювальний експеримент на основі Cfd-моделей наближається по своїх якостях до натурального експерименту, а самі моделі часто називають віртуальними стендами. Cfd-моделі або віртуальні стенди мають потенційні можливості доповнення або заміни натурних стендів або натурних експериментів для одержання нових даних по теплообміну, зокрема у вигляді критеріальних залежностей або практичних інженерних методик розрахунків.

У зв'язку з вищевикладеним, такі роботи є досить актуальними, мають практичну цінність для проектування й дослідження силових масляних трансформаторів і реакторів з новими перспективними видами конструкції обмоток і систем охолодження, можуть служити засобами забезпечення випуску надійного й конкурентоспроможного трансформаторного встаткування.

В основі роботи ANSYS лежить кінцево-елементний аналіз. Finite Element Analysis - спосіб моделювати навантаження конструкцій і аналізувати відгук конструкції на це навантаження. Конструкція моделюється за допомогою дискретних блоків, які називаються елементами (elements). Кожний елемент містить у собі точні рівняння, що описують його відгук на певне навантаження. "Сума" відгуків усіх елементів моделі дає сумарний відгук конструкції. Елементи мають кінцеве число невідомих, тому й називаються кінцевими елементами (finite elements). Кінцево-елементна модель, що має кінцеве число невідомих, може тільки апроксимувати відгук фізичної системи, що має нескінченне число невідомих.

Предмет дослідження, яке описується в даній статті - процеси теплообміну й гідродинаміки при природному русі охолодної рідини в каналах обмоток трансформаторів.

Методи дослідження базуються на чисельному методі кінцевих елементів, класичній теорії гідродинаміки й теплообміну.

У якості об'єкта дослідження прийняті теплові моделі котушкових обмоток з радіальною шириною 50 мм. Циркуляція охолодної рідини в каналах обмотки – природня.

Розв'язок типового завдання за допомогою Flotran складається із семи основних етапів [4]:

- а. Визначення розрахункової області.
- б. Завдання режиму плинину.
- в. Генерація звичайно - елементної сітки.
- г. Накладення граничних умов.
- д. Установка параметрів розв'язку.
- е. Розв'язок завдання.
- ж. Перегляд результатів.

а. Визначення розрахункової області.
Необхідно правильно визначити розрахункову область завдання. Визначаємо граничні умови. Якщо не відомі точні граничні умови або не виходить їх обчислити, задаємо наближені значення граничних умов і не розташовуємо їх у безпосередній близькості від зони, що представляє інтерес, де присутні значні варіації параметрів, що обчислюються.

Іноді може не бути відомостей про наявність значних варіацій поблизу виходу або в іншому місці, розв'язуваної моделі, поки не переглянемо результати розрахунків. Якщо з'ясувалося, що наближені граничні умови задані поблизу зон, де присутні значні варіації параметрів, що обчислюються, то перевизначаємо граничні умови й знову вирішуємо завдання.

- б. Завдання режиму плинину.

При розв'язку гідравлічних завдань необхідно знати характер плинину потоку. Характер плинину визначається властивостями рідини, геометрією моделі й приблизним значенням швидкості потоку.

Завдання плинину рідини, розв'язувані в Flotran, включають гази й рідини, властивості яких можуть зна-

чно залежати від температури. Поведінка газів обмежена моделлю ідеального газу. Визначаємо чи залежить щільність, в'язкість і теплопровідність від температури. У багатьох випадках можна одержати адекватний розв'язок, використовуючи постійні властивості.

Визначаємо режим плинину (ламінальний або турбулентний) за критерієм Рейнольдса, який задає співвідношення інерційних сил і сил внутрішнього тертя.

Для того, щоб визначити стисливий потік або нестисливий обчислюємо число Маху. Число Маху в будь-якій крапці потоку є відношення швидкості потоку до швидкості звуку. Якщо число Маху більше 0.3, використовуємо стисливий алгоритм розв'язку. У випадку якщо число Маху перевищує 0.7, результати розв'язку по стисливому й нестисливому алгоритмах значно відрізняються друг від друга.

- в. Генерація кінцево - елементної сітки.

Існує наступний принцип налаштування к/е сітки - в області високих градієнтів детальність, що накладається к/е сітки повинна бути вище, чим в інших областях моделі. Наприклад, у випадку використання турбулентної моделі, біля стінок детальність к/е сітки повинна бути набагато вище, у порівнянні із частотою сітки у випадку ламінального режиму. У випадку використання занадто грубої сітки, виникне втрата точності розв'язку, оскільки така сітка не в змозі зафіксувати значні ефекти, викликані великими градієнтами. Найбільш точний результат дає використання розподіленої (mapped) к/е сітки.

У деяких випадках корисно використовувати шестигранні елементи в областях з високими градієнтами й чотиригранні елементи в менш критичних областях. Можна настроїти ANSYS на автоматичне створення пірамідальних елементів у прикордонному шарі. При аналізі потоків, особливо у випадку турбулентного режиму, не слід використовувати пірамідальні елементи поблизу стінок, оскільки це може привести до неточностей у розв'язку.

Елементи типу призми можуть бути корисні, коли на складний майданчик легко може бути накладена сітка із трикутників, які потім будуть видавлені (extruded). Для швидкого розв'язку можна використовувати елементи типу призми біля стінок. Однак, для одержання точних результатів, слід використовувати шестигранні елементи в цих областях.

- г. Накладення граничних умов.

Можна задати граничні умови перед або після створення звичайно - елементної моделі. Звичайно - елементна модель, це геометрична модель із накладеною на неї к/е сіткою. Якщо не задана умова, яке б визначала величину якогось параметра на який або границі моделі, передбачається нульовий градієнт цього параметра спрямований по нормалі до цієї границі.

Можна міняти граничні умови між повторними запусками розв'язку.

- д. Установка параметрів розв'язку.

Для використання таких опцій як турбулентна модель або розв'язок рівняння температури, необхідно активувати їх. В інших розділах цього документа даються рекомендації з установок параметрів для різних режимів плинину.

- е. Розв'язок завдання.

Можна відслідковувати збіжність розв'язку й стабільність аналізу, спостерігаючи хід зміни розв'язку

й відповідних параметрів. до цих параметрів відносять швидкість, тиск, температура, і (при необхідності) параметри турбулентності, такі як кінетична енергія (ступінь волі ENKE), коефіцієнт дисипації кінетичної енергії (ENDS), і ефективна в'язкість (EVIS).

Для одержання адекватних результатів необхідно провести багаторазові повторні запуски розв'язку.

ж. Перегляд результатів.

Виконуємо заключну обробку розрахованих параметрів і переглядаємо результати розв'язку моделі у файлі результатів.

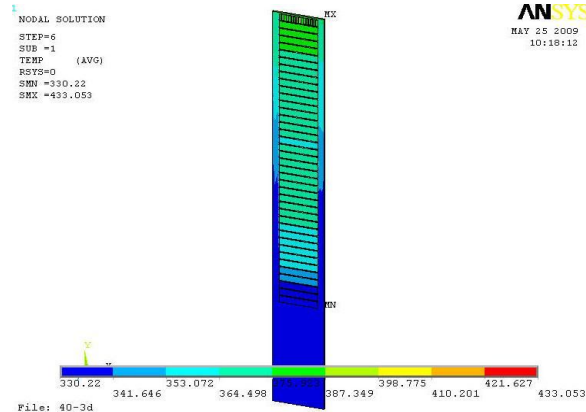


Рис. 1. Розрахункове температурне поле

Отримані результати зведемо в таблицю 1 і будемо графік залежності температури міді обмоток від порядкового номера котушки (рис 2)

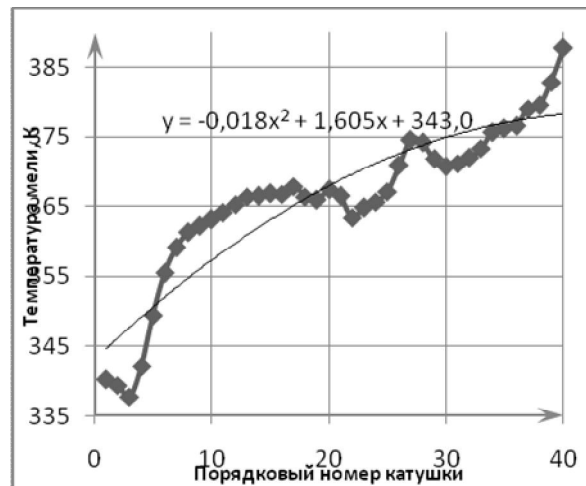


Рис. 2. Графік залежності температури міді обмоток трансформатора від порядкового номера котушки

Експериментальні значення температури котушок узяті із протоколів випробувань.[5]

Висновки

а. У місцях застою масла тепло через охолодне середовище передається від більш нагрітої котушки до

менш нагрітої, підвищуючи температуру останньої. Виходить, вони не віддають тепло, а одержують його ззовні, тобто від трансформаторного масла, нагрітого сусідньою котушкою з більш високою температурою.

б. З просуванням нагору трансформаторне масло усе більш прогрівається від котушок, швидкість його плинню збільшується. Температурний градієнт між маслом і міддю падає, отже, процес теплообміну відбувається усе гірше, тому що кількість відведеної від котушки до масла теплоти прямо пропорційно значенню різниці температур між ними, а виходить, усе менше тепла буде відводитися від котушок, що буде викликати ріст температури міді при просуванні нагору.

Таблиця 1. Температурне поле в обмотках трансформатора

№ катушки	Расчетная темпер. меди, °C	Эксперим. темпер. меди, °C	Относительная погрешность измерений, %
1	67,1	71,2	6,110283
2	66,2	69,7	5,287009
3	64,6	65,1	0,773994
4	69	68,4	0,869565
5	76,3	77,9	2,096986
6	82,3	84,5	2,673147
7	85,9	87,8	2,211874
8	88,2	89,1	1,020408
9	89,1	89,8	0,785634
10	90	90,5	0,555556
11	91	90,8	0,21978
12	92,1	91,9	0,217155
13	93,2	94,2	1,072961
14	93,3	95,1	1,92926
15	93,7	94,5	0,853789
16	93,6	95	1,495726
17	94,7	94,8	0,105597
18	93,2	92,1	1,180258
19	92,7	95,1	2,588997
20	94,2	96,9	2,866242
21	93,3	96,5	3,429796
22	90,3	93,9	3,986711
23	91,6	91,2	0,436681
24	92,5	93,4	0,972973
25	93,9	95,1	1,277955
26	97,7	96,8	0,921187
27	101,4	99,8	1,577909
28	101	100,8	0,19802
29	98,6	99,9	1,318458
30	97,5	98,8	1,333333
31	98	99,8	1,836735
32	98,8	100,4	1,619433
33	100,2	100,9	0,698603
34	102,5	101,2	1,268293
35	103	103,5	0,485437
36	103,4	104,1	0,676983
37	105,85	105,4	0,42513
38	106,3	105,9	0,376294
39	109,7	106,9	2,552416
40	114,6	110,8	3,315881

ЛІТЕРАТУРА

1. Сергеенков Б.Н., Киселев В.М. Электрические машины: Трансформаторы. М.: Высшая школа, 1989 – 352с.
2. Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Проблемы современного трансформаторостроения в России. – М.: Электричество, 2000 - 54с.
3. Круковский П.Г., Яцевский В.А., Конторович Л.Н., Иванков В.Ф. CFD - моделирование тепловых режимов обмоток и групп катушек силовых масляных трансформаторов с системой охлаждения. Соник докладов XII международной научно-технической конференции «Трансформаторостроение – 2009» - Запорожье, 2009
4. Электронный справочник «ANSYS. Руководство». 399 с
5. ОАХ 128 159. 066 Исследование теплоотдачи обмоток с радиальной шириной 50 мм при естественном движении масла. Протокол испытаний. Михайловский Ю.А., Васильев Л.В., Щукина И.И. Введен 23.11.76. – 68 с.

пост. 17.06.2010