

# МАШИНОБУДУВАННЯ І ТРАНСПОРТ

---

УДК 66.045.3

**С. В. Ільїн;**

**І. Г. Яковлєва,** д-р техн. наук, проф.;

**М. С. Мальований,** д-р техн. наук, проф.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ МАТЕРІАЛІВ У ГАЛУЗІ ТРАНСФОРМАТОРОБУДУВАННЯ

*Досліджено теплообмін та гідродинаміку в процесі природного руху охолоджувальної рідини в каналах обмоток трансформаторів. Проведено комп'ютерне моделювання. Отримані результати можуть бути використані для виведення критеріальних рівнянь.*

### Вступ

У сучасному електромашинобудуванні проблеми високої напруги й охолодження щораз частіше висуваються на перший план. Зростання довжини мереж вимагає збільшення напруг електропередачі; це у свою чергу приводить до зростання випробувальних напруг апаратів, що підключаються. Однак за високої напруги і малої номінальної потужності вартість машини виходить значна, так що вимоги економіки змушують будувати щораз більші машини. У таких електричних машинах вирішення питань охолодження стає дедалі актуальнішим [1].

Сучасна тенденція підвищення номінальних напруг і потужностей машин збільшує обсяги використовуваних ізоляційних матеріалів, що укладаються товстішими шарами. У зв'язку з цим зростають труднощі охолодження великих високовольтних машин. Та обставина, що майже всі відомі ізоляційні матеріали з якісними діелектричними властивостями мають низьку теплопровідність і що значна їх частина швидко руйнується за підвищених температур, ще ускладнює положення. Тому ідеальний ізоляційний матеріал повинен мати не тільки якісні діелектричні та механічні властивості, але також високу теплопровідність і нечутливість до впливу високих температур [2].

Принципові вимоги, які необхідно враховувати в процесі проектування електричних машин, зводяться до таких:

1. В процесі проектування необхідно прагнути, щоб усередині машини не перевищувалася певна середня температура. Максимальні температури всередині активних частин вимагають особливого обмеження та контролю.

2. Для того, щоб у заданій конструкції визначити розрахунковим шляхом середні та максимальні перевищення температури, відповідні певним навантаженням, повинні бути розроблені необхідні аналітичні методи, а також експериментальне обладнання.

В умовах світової економічної кризи більшого значення набуває питання економії металу та ізоляційних матеріалів, які використовуються в трансформаторі.

Для того, щоб досягти зниження витрат матеріалів під час побудови трансформатора, треба зменшити розмір горизонтальних каналів в обмотках трансформатора. Крім того, це зменшить витрати трансформаторного масла, яке виконує функцію охолоджувального середовища [3].

На сьогоднішній день в трансформаторобудуванні застосовуються електричні машини з шириною горизонтального каналу між котушками обмоток більше 3 мм. Новаторською є пропозиція сконструювати трансформатор з шириною горизонтального каналу близько 1 мм. Але в такому разі виникає проблема відводу тепла від обмоток трансформатора. На сьогоднішній день немає вичерпних результатів досліджень процесів теплообміну в обмотках трансформатора.

Температура в машині не повинна перевищувати нормованої величини, а для того, щоб не виходити за її межі, необхідно утримувати на відповідно низькому рівні величину питомого теплового потоку, що за зростаючих лінійних розмірів, які характеризуються радіусом  $r$ , відповідно до

вищенаведених положень, є досяжним тільки шляхом зниження питомих витрат на одиницю об'єму  $q$ . Як відомо, це зниження витрат зумовлюється зменшенням електромагнітних навантажень, а збільшення розмірів машин приводить до збільшення вартості матеріалів на одиницю потужності. Щоб уникнути цього для збереження величини  $q$ , незмінної за зростаючих розмірів електричних машин, необхідно збільшувати поверхні охолодження як шляхом індивідуалізації охолодження тіл, що виділяють тепло, так і за допомогою розміщення додаткових охолоджувальних поверхонь.

### Матеріали та методи. Результати та їх обговорення

Предмет дослідження — теплообмін та гідродинаміка в процесі природного руху охолоджувальної рідини в каналах обмоток трансформаторів. Як модель для досліджень було обрано теплові моделі котушкових обмоток з радіальною шириною 50 мм. Кількість варіантів обмоток, передбачених для дослідження, з різним сполученням геометричних розмірів охолодних каналів наведено в таблиці [1].

Таблиця

Геометричні розміри обмоток

Позначення моделі	Радіальна ширина котушок $b$ , мм	Висота горизонтального каналу $h$ , мм	Ширина вертикального каналу $b_1/b_2$ , мм	Кількість котушок
1.1.8	50	1	8/8	79
1.2.8	50	2	8/8	79

Вказані теплові моделі обмоток виготовлені з обмотувальних зразків ПБ (2,44×9,3)/0,55. Усталені теплові режими 60...65 °С, досягались підтримкою постійних теплових втрат в обмотках за середньої температури масла в баку уздовж висоти обмотки. Методи дослідження базувались на числовому методі кінцевих елементів, класичної теорії гідродинаміки та теплообміну. Всі розрахунки були виконані в програмі ANSYS FLOTTRAN.

В програмі ANSYS була створена математична модель обмоток трансформатора з шириною горизонтальних каналів 1 мм. Для цієї моделі були задані такі дані:

1. Геометричні параметри обмоток трансформатора (див. табл.).
2. Теплофізичні властивості твердих матеріалів (міді обмоток і ізоляційного паперу): густина ( $\rho_{\text{міді}} = 8890 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{\text{паперу}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ), теплоємність ( $c_{\text{міді}} = 390 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $c_{\text{паперу}} = 2000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ), коефіцієнт теплопередачі ( $\alpha_{\text{міді}} = 350 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ,  $\alpha_{\text{паперу}} = 0,2 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ).
3. Властивості текучого середовища, які були задані у вигляді коефіцієнтів, узятих з нормативних матеріалів, на підставі яких ANSYS самостійно розраховував такі параметри: густина, в'язкість, теплоємність, теплопровідність охолодного середовища — трансформаторного масла.

4. Як тип елемента був заданий FLUID 141, оскільки аналіз проводився у двох площинах. Також було встановлено, що система симетрична щодо осі Y.

5. Параметри навколишнього середовища (прискорення вільного падіння).

Були задані такі навантаження на модель:

1. Густина теплового потоку на границі мідь—папір ( $q = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ).
2. Нульові значення швидкостей на зовнішніх границях моделі (крім верхньої), а також на зовнішніх поверхнях котушок в обмотках.
3. Циркуляція трансформаторного масла була задана природного, тому встановлювались значення швидкостей на вході в обмотки.

В результаті проведення розрахунків з використанням створеної програми були отримані такі результати:

1. Поле швидкостей у всьому об'ємі моделі трансформатора (див. рис. 1).
2. Поле температур у всьому об'ємі моделі трансформатора (див. рис. 2).
3. Максимальні та мінімальні, а також середні значення швидкостей і температур (див. рис. 1 та 2).

## 4. Вектори руху охолоджуючого середовища (а отже, виявлені застійні зони масла) (див. рис. 1).

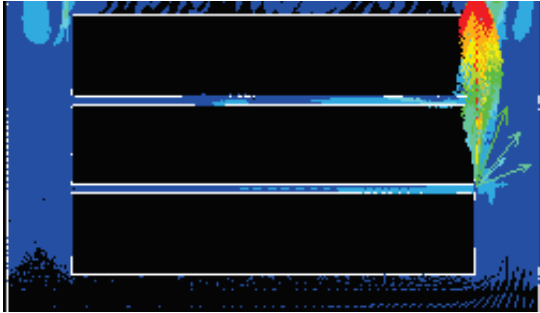


Рис. 1. Діаграма векторів швидкостей в каналах обмоток трансформатора

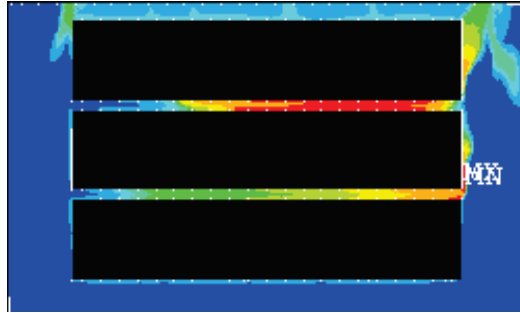


Рис. 2. Температурне поле в каналах обмоток трансформатора

Результати відображені на рисунках 1 та 2. Для наочності зображені три нижні котушки.

### Висновки

1. Для запобігання перегріву котушок необхідно замінити природну циркуляцію на вимушену, встановивши перекачувальний насос, оскільки піднімальної сили, що виникає через різницю густин мастила на вході і виході з баку явно недостатньо для того, щоб воно заходило в канали шириною в 1 мм і ефективно відводило тепло від котушок.

2. Найочевиднішим є те, що з переміщенням нагору трансформаторне масло щораз більше прогрівається від котушок, швидкість його руху збільшується. Температурний градієнт між маслом та міддю падає, отже, процес теплообміну відбувається все гірше, тому що кількість відведеної від котушки до масла теплоти прямопропорційна значенню різниці температур між ними — все менше тепла буде відводитись від котушок, що підвищуватиме температуру міді.

3. Незважаючи на всі складнощі організації відводу теплоти за допомогою природної циркуляції охолоджуючого середовища для малих розмірів горизонтальних каналів, проведений розрахунок показав, що існування такого трансформатора реально, хоча і накладає додаткові обмеження на стан тепловіддаючих поверхонь і самого трансформаторного масла. Для поліпшення процесів теплообміну як альтернативу можна запропонувати газоподібне охолодне середовище (елегаз), що забезпечить рівномірне омивання всіх котушок. Однак його собівартість перевищує вартість мастила приблизно в 10 разів, тому досить часто застосування його є нерациональним і економічно не вигідним.

4. Із проведених досліджень можна зробити висновок, що характер розподілу температури усередині бака трансформатора залежить, головним чином, від таких умов:

- геометрії обмоток трансформатора;
- характеру циркуляції охолоджуючого середовища;
- теплового навантаження;
- фізичних властивостей використовуваних матеріалів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика : учеб. для вузов по специальности «Гидравлические машины и средства автоматизации», кафедры гидравлики и гидроавтоматики МВТУ им. Н. Э. Баумана. — М. : Машиностроение, 1987. — 440 с.
3. Готтер Г. Нагрев и охлаждение электрических машин / Г. Готтер. — М. : «Энергоиздат». — 1956 г.

Рекомендована кафедрою екології та екологічної безпеки

Стаття надійшла до редакції 27.10.10

Рекомендована до друку 13.02.11

**Ільїн сергій Васильович** — асистент; **Яковлева Ірина Геннадіївна** — завідувач кафедри.

Кафедра теплоенергетики, Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя.

**Мальований Мирослав Степанович** — завідувач кафедри, екології та охорони навколишнього середовища, Національний університет «Львівська політехніка», Львів