

ЛИТЕРАТУРА

1. Blair R. D., Lafontaine F. The Economics of Franchising. N. Y. : Cambridge University Press. 2005. — 338 p.
2. Ménard C. The Economics of Hybrid Organizations // Journal of Institutional and Theoretical Economics. — 2004. — V. 160. — P.345—376.
3. Ramírez-Hurtado J. M., Rondán-Cataluña F. J., Guerrero-Casas F. M., Berbel-Pineda J. M. Identifying the franchisee profiles franchisors prefer // Journal of Business Economics and Management. — 2011. — V.12. — Issue 4. — P.567—588.

пост.21.10.14

Дослідження характеру руху масла в обмотках силового трансформатора з радіальними каналами шириною 1 мм

І. Г. ЯКОВЛЄВА, С. В. ІЛЬІН

Запорізька державна інженерна академія

Проведен аналіз руху охолоджуючої рідини в радіальному (горизонтальному) каналі трансформаторної обмотки при різних швидкостях течія на вході в канал. Ширина горизонтального каналу – 1 міліметр, циркуляція охолоджуючої середовища – природна. Дослідження проведені на основі методу кінцевих елементів. Виявлено залежність надлишкового тиску охолоджуючої рідини в радіальному каналі шириною 1 мм дискової обмотки трансформатора від швидкості масла на вході в канал. Отримано рівняння, що зв'язує надлишковий тиск масла і його швидкість на вході в канал. Приведені результати розрахунку поля швидкостей руху охолоджуючої середовища в радіальному каналі моделі обмотки трансформатора.

Проведено аналіз руху охолоджуючої рідини в радіальному (горизонтальному) каналі трансформаторної обмотки при різних швидкостях течія на вході в канал. Ширина горизонтального каналу – 1 міліметр, циркуляція охолоджуючої середовища – природна. Дослідження проведені на основі методу кінцевих елементів. Виявлено залежність надлишкового тиску охолоджуючої рідини в радіальному каналі шириною 1 мм дискової обмотки трансформатора від швидкості мастила на вході в канал. Отримано рівняння, що зв'язує надлишковий тиск мастила та його швидкість на вході в канал. Наведено результати розрахунку поля швидкостей руху охолоджуючої середовища в радіальному каналі моделі обмотки трансформатора.

The cooling fluid motion in the radial (horizontal) channel transformer windings at different flow velocities at the inlet to the channel was analyzed. The width of the horizontal canal is 1 millimeter, the circulation of the cooling medium is natural. The mathematical modeling with the finite element method was chosen as a research method in this study. The dependence of the excess pressure in the radial coolant channel width of 1 mm on the speed of the oil at the inlet to the channel was received. An equation relating the pressure of oil and its velocity at the channel inlet was received. The results of cooling medium velocity field calculation in the transformer radial channel model are described.

Вступ. В сучасних економічних умовах одним з ключових питань в галузі трансформаторобудування стає зменшення матеріалоемності електричних машин. Це, в свою чергу, призводить до зменшення габаритних розмірів трансформаторів, наприклад за рахунок зменшення ширини радіальних каналів. Проте, необхідно враховувати, що це призведе до погіршення умов відводу теплоти від активної частини трансформатора до навколишнього середовища. Зменшення кількості теплоти, що відводиться від обмоток, може стати причиною значного перегріву трансформатора, викликати передчасне старіння ізоляції та призвести до аварійної ситуації.

Метою роботи є дослідження характеру руху трансформаторного масла в трансформаторній обмотці з шириною радіального каналу в 1 мм.

Аналіз досліджень та публікацій. Проблемам охолодження силових трансформаторів присвячена велика кількість публікацій. В [1] та [2] розглядаються теплові та гідравлічні процеси, які мають місце в обмотках трансформаторів при природній циркуляції охолоджуючої рідини, в [3] та [4] – при вимушеній. Комплексний підхід до проблем трансформаторобудування представлений в [5] та [6]. Проте, в усіх цих роботах приведені дослідження процесів відводу теплоти від трансформаторних обмоток з шириною радіального каналу не менше 3 мм.

Метою роботи є аналіз впливу швидкості масла на вході в радіальний канал на розподіл надлишкового тиску в цьому каналі. Метод дослідження базується на чисельному методі кінцевих елементів.

Для дослідження теплових процесів в обмотках трансформатора обрано циліндричну систему координат.

нат (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:

$$g_{0x} = -g; \quad g_r = 0; \quad g_\varphi = 0, \quad (1)$$

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

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:

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

де q_v - середня щільність теплових втрат в об'ємі провідника, Вт/м³, W - швидкість течії рідини, м/с, λ - коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(м·К), ρ - щільність рідини, кг/м³, c_p - теплоємність рідини, Дж/(кг·К).

Проте, в рівняння (2) входять значення проекцій швидкості течії масла на координатні осі. Для їх визначення необхідно приєднати до (2) рівняння руху (Нав'є-Стокса) в циліндричних координатах:

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

$$\begin{aligned} + \frac{2\mu}{r} \cdot \left(\frac{\partial W_\varphi}{\partial r} - \frac{\partial W_r}{r \cdot \partial \varphi} - \frac{W_\varphi}{r} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(2\mu \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial W_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial W_\varphi}{\partial \varphi} \right) \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\mu \left(\frac{\partial W_\varphi}{\partial r} + \frac{\partial W_r}{r \cdot \partial \varphi} - \frac{W_\varphi}{r} \right) \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Для розрахунку невідомої в (3) величини тиску p , використаємо рівняння нерозривності:

$$\frac{dW_x}{dx} + \frac{dW_r}{dr} + \frac{dW_\varphi}{r \cdot d\varphi} + \frac{W_r}{r} = 0. \quad (4)$$

Таким чином, процес конвективного теплообміну в циліндричних координатах описується рівняннями (2) – (4). За умови стаціонарного теплообміну похідні часу стають рівними нулю.

В якості об'єкта дослідження прийняті теплові моделі горизонтального каналу котушкових обмоток з радіальною шириною 50 мм [7]. Площа поверхні кожної котушки дорівнює 500 мм².

Початкові умови при вирішенні цієї моделі:

- початкова температура масла 60°C;
- температура навколишнього середовища 30°C;
- щільність теплового потоку 3500 Вт/м².

Результати досліджень. Очевидним є те, що підвищення швидкості течії масла на вході в радіальний канал призведе до значного зростання інтенсивності тепловіддачі від розігрітої міді котушок до охолоджуючого середовища [8]. Проте, для комплексної оцінки позитивності такого зовнішнього впливу необхідно провести аналіз залежності надлишкового тиску трансформаторного масла в горизонтальному каналі від швидкості середовища на його вході. Для цього на правій вертикальній границі каналу були встановлені штучні значення швидкостей масла. Дослідження проведені для наступних величин швидкостей: 0,1 м/с, 0,5 м/с, 1 м/с, 3 м/с, 4 м/с, 5 м/с, 6 м/с, 8 м/с, 9 м/с та 10 м/с.

Отримані в результаті розрахунків поля швидкостей та надлишкового тиску в горизонтальному каналі при швидкості 0,1 м/с на вході в нього відображені на *рис.1* та *2* відповідно.

На *рис.1* видно, що в правій частині каналу спостерігається не лише рух масла в канал, а й витікання з нього в верхній і нижній частині каналу. Це свідчить про те, що рідині легше здолати швидкість, що прикладена на вході в канал (0,1 м/с) і виштовхнути масло назад, ніж проштовхнути все масло вздовж нього.

Велика щільність ліній току в правій частині каналу (*рис.1*) свідчить про інтенсивний рух рідини на цій ділянці моделі, проте, з просуванням вліво по каналу, інтенсивність ліній току значно зменшується, і, приблизно за п'яту частину довжини каналу, зовсім зникає. Розподіл тиску (*рис.2*) повністю повторює контури поля швидкостей, та в зоні, де відсутні лінії току, чисельні значення надлишкового тиску коливаються близько 0 Па. Вибір сторони каналу, до якої прикладена швидкість, впливу на кінцевий результат не має. Також суттєво не впливає на результати напрямок прикладеного навантаження, тобто вплив на модель позитивної за знаком швидкості, що застосована до лівої границі, ідентичний впливу негативної швидкості на правій границі каналу.

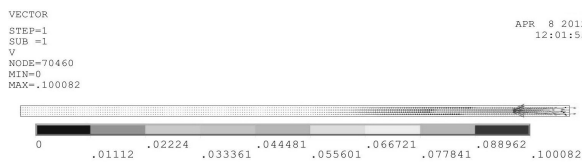


Рис. 1. Розподіл швидкостей масла в радіальному каналі трансформатора при заданій швидкості (0,1 м/с) на вході в радіальний канал

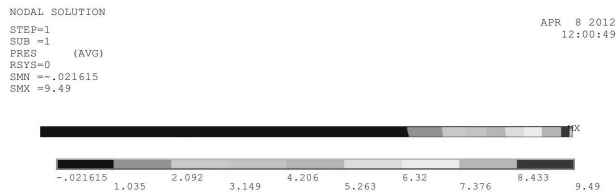


Рис. 2. Розподіл надлишкового тиску масла в радіальному каналі трансформатора при заданій (0,1 м/с) швидкості на вході в радіальний канал

Взагалі, ідентичний характер полів швидкостей та надлишкового тиску спостерігається при всіх умовах, що розглядаються. Очевидним є те, що ділянка, на якій спостерігається інтенсивний рух рідини в радіальному каналі залежить від швидкості масла на вході. Проте, при швидкості масла на вході в канал, що дорівнює 1 м/с, починає спостерігатися відрив рідини від стінок правої частини каналу. Особливо чітко це явище можна дослідити при швидкості 10 м/с на вході в канал. Характер розподілу надлишкового тиску при швидкості масла на вході в горизонтальний канал, що дорівнює 1 м/с та 10 м/с ідентичний до характеру при 0,1 м/с. Суттєвою відмінністю є лише зміщення точки з найменшим тиском в праву частину каналу, що викликано відривом течії від стінок і утворенням зони розрідження. Очевидним є те, що навіть за умов наявності швидкості масла на вході в радіальний канал, що дорівнює 10 м/с, організувати наскрізну циркуляцію масла уздовж усього каналу неможливо. Про це свідчить наявність зон каналу, в яких надлишковий тиск коливається близько 0 Па, та в яких практично відсутні лінії току.

Як показали розрахунки, прийняті значення швидкостей дозволяють отримати результати, що в повній мірі відображують характер залежності надлишкового тиску масла від швидкості його течії на вході в горизонтальний канал (рис.3). В якості надлишкового тиску, який відображено на діаграмі, прийнято максимальний надлишковий тиск в каналі (позначка «МХ» на (рис.2).

Надлишковий тиск охолоджуючого середовища є тим параметром, який може викликати передчасний вихід трансформатора з ладу та привести до аварійної ситуації. Таким чином, виникає необхідність оцінювати значення максимального надлишкового тиску в радіальних каналах трансформатора. Для цього на графіку була додана лінія тренда, що усереднила отримані результати, яка описується рівнянням:

$$y=410,75x^2-599,41x+311,79, \quad (5)$$

де x – швидкість масла на вході в радіальний канал, м/с, y – максимальне значення надлишкового тиску, Па.

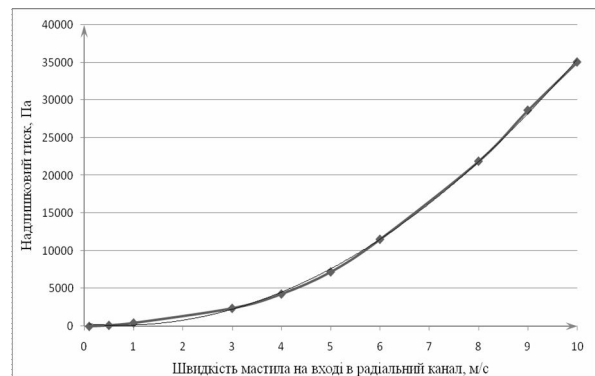


Рис.3. Залежність надлишкового тиску масла від швидкості його течії на вході в горизонтальний канал

Висновки

1. Значення надлишкового тиску масла в радіальному каналі знаходиться в квадратичній залежності від швидкості масла на вході в канал. Отже збільшення швидкості масла призведе до значно більшого зростання надлишкового тиску охолоджуючої рідини.

2. В радіальному каналі шириною в 1 мм виявлено циркуляцію рідини в зонах, які розташовані біля входу в цей канал. Такої циркуляції достатньо для того, щоб відводити достатню кількість тепла від котушок та запобігти перегріву активної частини трансформатора. Проте організувати наскрізну циркуляцію охолоджуючого середовища в умовах, що розглядаються, практично неможливо.

3. Наявність штучної швидкості масла на вході в радіальний канал не може організувати наскрізну циркуляцію в ньому. Крім того, що організувати наявність цієї швидкості технічно неможливо без внесення змін в конструкцію трансформатора, так це призведе до суттєвого зростання надлишкового тиску в радіальних каналах, що може призвести до порушення роботи електричної машини та спричинити аварійну ситуацію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Imre L., Bitai A. A simultaneous and hierar ohie network modeling reception of simulating the steady-state warming of naturally oil-cooled transformers / L. Imre, A. Bitai // Period polytechn. Mech. Eng. — 1978. — №4. — P.265—281.
2. Imre L., Danko G. A method for determining the steady-state temperature distribution in the winding discs of oil-cooled transformers / L. Imre, G. Danko // Period polytech. Elec. Eng. — 1976. — №2. — P.89—102.
3. Швидлер А. Б., Суворова С. Н., Михайловский Ю. А. Исследование теплоотдачи обмоток трансформаторов с принудительным движением масла в вертикальных каналах / А. Б. Швидлер, С. Н. Суворова, Ю. А. Михайловский // Электротехника. — 1973. — №3. — С.26—29.
4. Бурченков В. Н. Исследование теплообмена слоевых обмоток трансформаторов с принудительной циркуляцией масла в каналах / В. Н. Бурченков // Вопросы теории и расчета

-
- электрических машин и аппаратов. — 1975. — №1. — С.25—29.
5. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. Серия «Трансформаторы». Выпуск 36. Перевод с венгерского / Л. Киш. — М. : Энергия. — 1980. — 208 с.: ил.
6. Готтер Г. Нагрев и охлаждение электрических машин / Г. Готтер. — М. : нергоиздат. 1956. — 480с.: ил.
7. Протокол испытаний ОАХ 128 159. 066. Исследование теплоотдачи обмоток с радиальной шириной 50 мм при естественном движении масла. Введен 23.11.76 / Ю. А. Михайловский, Л. В. Васильев, И. И. Щукина. — Запорожье : ВИТ. 1976. — 68 с.: черт.
8. Яковлева І. Г. Математичне моделювання теплообмінних процесів в обмотках трансформаторів з висотою горизонтального каналу менше 3 мм / І. Г. Яковлева, С. В. Ільїн // Математичне моделювання. Науковий журнал. Дніпродзержинськ : 2010. — №1(22). — С.82—86.

пост.10.11.14