

Математичне моделювання гідравлічних процесів в горизонтальних каналах обмоток трансформатора менше 3 мм

С. В. ЛЬІН

Запорізька державна інженерна академія

Описывается способ создания численной модели горизонтального канала трансформаторной обмотки. Ширина горизонтального канала составляет 1 миллиметр, циркуляция охлаждающей среды – естественная. В качестве метода исследования выбрано математическое моделирование с помощью метода конечных элементов. Приведены результаты расчета полей скоростей течения охлаждающей среды в радиальном канале модели обмотки трансформатора. Продемонстрировано наличие циркуляции масла в радиальном канале шириной 1 мм, выявлены зоны втекания и вытекания масла в местах входа в канал. Однако, наличие застойных зон в центральной части канала свидетельствуют об отсутствии сквозного течения охлаждающей среды в канале, который рассматривается.

Описується спосіб створення чисельної моделі горизонтального каналу трансформаторної обмотки. Ширина горизонтального каналу складає 1 міліметр, циркуляція охолоджуючого середовища - природна. В якості методу дослідження обрано математичне моделювання за допомогою методу кінцевих елементів. Наведено результати розрахунку поля швидкостей течії охолоджуючого середовища в радіальному каналі моделі обмотки трансформатора. Продемонстровано наявність циркуляції мастила в радіальному каналі шириною 1 мм, виявлені зони втікання і витікання мастила в місцях входу в канал. Однак, наявність застійних зон в центральній частині каналу свідчать про відсутність наскрізної течії охолоджуючого середовища в каналі, який розглядається.

This article describes the method to create a numerical model of the transformer windings horizontal channel. 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 results of cooling medium velocity field calculation in the transformer radial channel model are described. It has been demonstrated the oil flow presence in the radial channel width of 1 mm were identified oil zones of inflow and outflow in the ground in the entrance channel. However, the dead zones presence in the central part of the channel indicate the absence of coolant through-flow in the channel, which is discussed in the article.

Вступ. На сучасному етапі розвитку трансформаторобудування, в умовах постійного зростання цін на метал, трансформаторне мастило, а також зростання цін на транспорт, все більшого значення набувають питання зниження розмірів електричних машин, що означає зниження матеріалоемності трансформатора та зростання його конкурентоспроможності. Одним з варіантів зменшення розмірів трансформатора є зменшення ширини горизонтальних (радіальних) каналів його обмоток. Крім того, великий інтерес представляє зниження витрат електроенергії на організацію циркуляції мастила в каналах обмоток трансформаторів, шляхом заміни вимушеної циркуляції охолоджуючого середовища на природну.

Проте, необхідно враховувати що наведені вище заходи здешевлення виготовлення та експлуатації трансформаторів призведуть до погіршення умов відводу теплоти від котушок до навколишнього середовища через ускладнення циркуляції трансформаторного мастила. Це, в свою чергу може призвести до передчасного руйнування ізоляційних матеріалів, виходу трансформатора з ладу та виникнення аварійної ситуації.

Отже при проектуванні нових електричних машин виникає питання детального дослідження характеру руху охолоджуючої рідини в радіальних каналах обмоток трансформатора.

Предметом дослідження є процеси гідродинаміки охолоджуючої рідини в радіальних каналах обмоток трансформатора. Методи дослідження базуються на чисельному методі кінцевих елементів, класичній теорії гідродинаміки і теплообміну. В якості об'єкта дослідження прийнята тепла модель котушкових обмоток шириною 50 мм. Циркуляція охолодної рідини в каналах обмотки – природна [1].

Аналіз досліджень і публікацій. В роботі [2] досліджено характер руху мастила в вертикальних каналах трансформаторної обмотки, де підтверджено, що швидкість руху мастила в вертикальному каналі набагато перевищує швидкість течії в радіальному. Таким чином, саме відсутність наскрізної течії в радіальних каналах являє собою найбільшу загрозу перегріву активної частини трансформатора.

В [3] та [4] детально проаналізовано характер руху мастила в мастильних каналах трансформатора. Проте, ширина радіального каналу в цих роботах прийнята не менше 3 мм. Таким чином, ці роботи можуть продемонструвати лише загальний характер розподілу мастила в обмотці трансформатора, що не може вирішити питання, які поставлені в цій статті.

Метою роботи є аналіз характеру розподілу трансформаторного мастила в трансформаторній обмотці з шириною радіального каналу в 1 мм.

Основна частина. Для дослідження розподілу швидкостей мастила методом чисельного моделювання створена чисельна модель каналу обмотки трансформатора, яка має вигляд прямокутника зі сторонами 1 мм та 50 мм. Швидкість на горизонтальних сторонах моделі дорівнює 0 м/с (імітація стінок котушок). На ці сторони прикладено навантаження у вигляді щільності теплового потоку 3500 Вт/м^2 [1]. Температура мастила на бокових сторонах моделі дорівнює 60°C .

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

Щільність теплового потоку на поверхні твердого тіла (границя «мастило – поверхня котушки») пропорційна температурному градієнту поверхні. Ця залежність є законом Фур'є:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}t, \quad (2)$$

де λ – питома теплопровідність провідника, Вт/(м К),

t – температура поверхні провідника, К.

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

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial t}{r \cdot \partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (3)$$

де q_v – середня щільність теплових втрат в об'ємі провідника, Вт/м³.

Рівняння (3) є законом Пуассона в циліндричній системі координат та приймає вигляд (3) при дослідженні теплових процесів, що мають місце в провідниках, в яких є внутрішні джерела виділення теплоти.

Тепловиділення в ізоляційних матеріалах (трансформаторному картоні, гетинаксі, рейках, ізоляційних прокладках) майже відсутнє. Можна припустити, що в ізоляційних матеріалах відсутні внутрішні джерела виділення теплоти. Тоді рівняння (3) для ізоляції прийме вигляд рівняння Лапласа:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial t}{r \cdot \partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (4)$$

При дослідженні температурного поля трансформаторного мастила 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:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial t}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial t}{\partial x} + W_r \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{W_\varphi}{r} \frac{\partial t}{\partial \varphi} = \\ & = \frac{1}{\rho c_p} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\lambda \cdot \partial t}{r \cdot \partial r} \right) + \frac{q_v}{\rho c_p}, \end{aligned} \quad (5)$$

де W – швидкість течії рідини, м/с, ρ – щільність рідини, кг/м³, c_p – теплоємність рідини, Дж/(кг·К).

Проте, в рівняння (5) входять значення проекцій швидкості течії мастила на координатні осі. Для їх визначення необхідно приєднати до (5) 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), \quad (6) \\ & \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_r}{r \cdot \partial \varphi} \right) \right) + \\ & + \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 r} \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}$$

Для розрахунку невідомої в (6) величини тиску p , використаємо рівняння нерозривності:

$$\frac{dW_x}{dx} + \frac{dW_r}{dr} + \frac{dW_\varphi}{r \cdot \partial \varphi} + \frac{W_r}{r} = 0. \quad (7)$$

Таким чином, процес конвективного теплообміну в циліндричних координатах описується рівняннями (5) – (7). За умови стаціонарного теплообміну похідні часу стають рівними нулю.

В результаті виконання розрахунку моделі, було отримано поле швидкостей, що відображено на рис. 1.

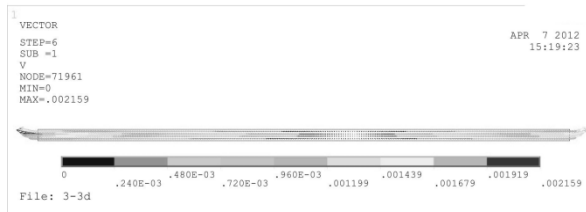


Рис.1 Поле швидкостей течії мастила в радіальному каналі обмотки трансформатора

На рис. 1 видно, що в радіальному каналі відсутня наскрізна течія мастила. Про це можна стверджувати виходячи з наявності зони, в якій швидкість течії мастила наближається до 0 м/с. Ця зона знаходиться в центральній частині каналу. Проте в лівій та правій частині спостерігається циркуляція рідини.

Розподіл тиску в радіальному каналі залежить від швидкості течії мастила в цьому каналі. В центральній частині каналу мастило прогрівається теплом, яке виділяється котушками, що утворили стінки каналу. Прогріте мастило має меншу щільність, в рідині виникає підйомна сила. Мастило, яке має більш високу температуру піднімається вгору поперек радіального каналу і зупиняється біля верхньої стінки. Охолоджуюча рідина прагне залишити об'єм каналу та піднятися вгору. Проте сила в'язкості не дозволяє їй це зробити. Таким чином, в центральній частині каналу виникає зона з найбільш високим надлишковим тиском.

В лівій та правій частинах каналу підйомна сила перевершує силу в'язкості, і, таким чином, в цих областях виникає невимушена циркуляція мастила, яка направлена з каналу біля верхньої котушки, та в протилежний бік біля нижньої.

Виходячи з отриманих результатів розрахунків, об'єм радіального каналу можна розділити на наступні зони, які представлені на рис. 2:

- 1 та 5 – вертикальні мастильні канали;
- 2 та 6 – зони втікання мастила в радіальний канал;
- 3 – зона застою мастила;
- 4 та 7 – зони витікання мастила з каналу.

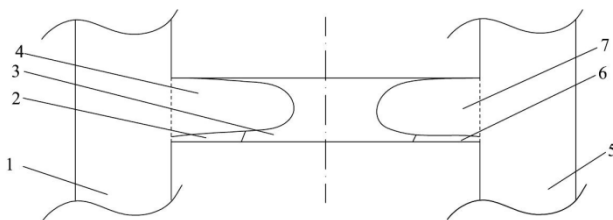


Рис.2 Характер руху мастила в горизонтальному каналі

Таким чином, в радіальних каналах відбувається рух рідини в зонах, які позначені на рис.2 цифрами 2, 4, 6 та 7. Отримані результати мають характер ідентичний з результатами, які отримані експериментальним шляхом [3].

Для повноти дослідження характеру руху мастила в радіальному каналі дискової обмотки трансформатора, отримані результати узагальнено у вигляді графіків залежності X- компоненти швидкості течії мастила

від довжини радіального каналу (рис. 3, а) та від його ширини (рис. 3, б). Саме наявність X- компоненти швидкості свідчить про наявність наскрізного руху через канал.

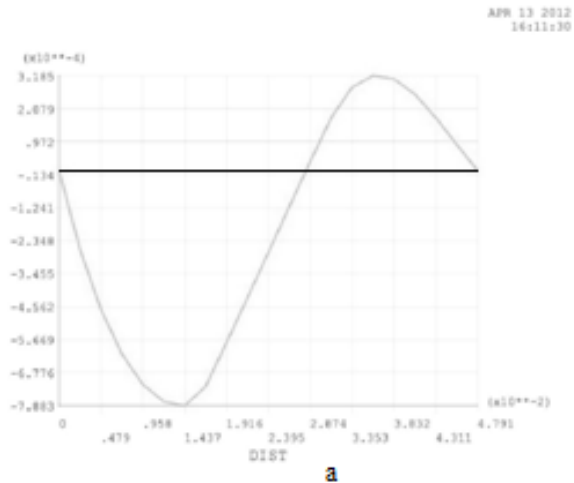
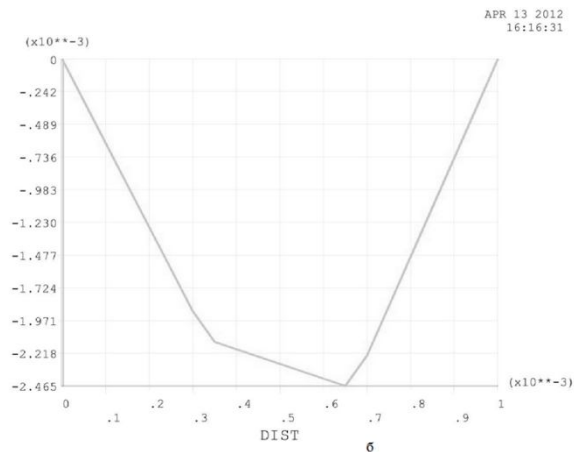


Рис.3 Компоненти швидкості течії мастила в радіальному каналі: а – X- компонента швидкості; б – Y- компонента



Чисельні значення швидкостей, які відображені на графіку, відповідають швидкостям на горизонтальній осі каналу та лівій границі відповідно. Одиницею виміру по вісі абсцис («DIST» на графіку) є метр, а по вісі ординат («VX» на графіку) - метр на секунду.

В лівій частині графіку, що представлено на рис. 3,а, швидкості мастила мають негативне значення. Це свідчить про те, що рух рідини на цій ділянці спрямовано в напрямку протилежному координатній вісі, а саме вліво. В правій частині значення мають позитивний знак, що свідчить про рух уздовж вісі абсцис. Перехід через нульове значення відбувається в центральній частині каналу, що в зайвий раз підтверджує наявність застійної зони саме на цій ділянці.

Негативні значення швидкостей на графіку, що представлено на рис. 3,б, є свідченням того, що мастило витікає з каналу. Найбільше значення швидкості знаходиться в верхній частині каналу. Це підтверджує висно-

вок, що саме в верхній частині каналу, спостерігається найбільш інтенсивне витікання мастила з каналу.

На обох графіках очевидним є те, що вони починаються та закінчуються на нульових значеннях швидкості через те, що швидкість на стінці каналу моделі дорівнює нулю.

Висновки. В радіальних каналах дискових обмоток трансформатора, ширина яких складає 1 мм, наявна природна циркуляція охолоджуючої рідини.

В нижній частині радіального каналу спостерігається втікання мастила в канал, а в верхній – витікання з нього. Швидкість течії мастила в центральній частині горизонтального каналу коливається біля значення 0 м/с (рис.3,а), а це означає, що наскрізний рух мастила в радіальному каналі при умовах, що досліджуються, неможливий.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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, — 976. — 68 с.
2. Льїн С. В. Дослідження методів зниження витрат матеріалів у галузі трансформаторобудування / С. В. Льїн, І. Г. Яковлева, М. С. Мальований // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 2., — С.139—141.
3. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. Серия «Трансформаторы». Выпуск 36. Перевод с венгерского/ Л. Киш — М. : Энергия, — 1980. — 208 с. : ил.
4. Готтер Г. Нагрев и охлаждение электрических машин/ Г. Готтер — М. : Энергоиздат, — 1956. — 480 с. : ил.

пост. 31.08.12