

УДК 621.314.212

- Ільїн С. В.** канд. техн. наук, доцент кафедри теплоенергетики та гідроенергетики Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна, e-mail: svizp1@gmail.com;
- Чейлитко А. О.** канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри теплоенергетики та гідроенергетики Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна, e-mail: cheilytko@i.ua;
- Матказіна Р. Р.** доцент кафедри теплоенергетики та гідроенергетики Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна, e-mail: rimmaamina77@gmail.com

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ МАСЛА В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ШИРИНОЮ РАДІАЛЬНОГО КАНАЛУ В 1 ММ

**Мета роботи.** Підвищення ефективності охолодження обмоток силового трансформатора з шириною перетину радіального каналу менш ніж 3 мм, при природньому русі охолоджуючої рідини, шляхом вдосконалення геометричних параметрів системи охолодження за умови зниження матеріалоємності електричної машини є актуальним напрямом наукових досліджень.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань виконано аналіз та обрано теоретичні методи, прилади, методики експериментальних досліджень. Найбільш повно використано наступні методи: математичне моделювання гідродинамічних процесів у дисковій обмотці масляного силового трансформатора, яке базується на розв'язанні диференційного рівняння теплопровідності та рівняння Нав'є-Стокса зі змінними умовами однозначності методом кінцевих елементів, з використанням спеціальних пакетів програмного забезпечення; методи статистичної обробки експериментальних даних з використанням спеціальних пакетів програмного забезпечення.

**Отримані результати.** Надлишковий тиск масла в каналах обмотки збільшується при зростанні порядкового номеру котушки. Виявлено, що зі зростанням швидкості масла на вході в горизонтальний канал значення надлишкового тиску в ньому зростають в квадратичному ступені. Встановлено, що в маслі горизонтального каналу виникає підйомна сила, про що свідчить зростання надлишкового тиску біля верхньої границі каналу.

Вперше отримано аналітичну залежність надлишкового тиску масла в радіальному каналі дискової обмотки силового трансформатора від швидкості течії масла на вході в цей канал.

**Наукова новизна.** Дістали подальший розвиток наукові уявлення про характер руху охолоджуючого трансформаторного масла в каналах дискових обмоток за відсутності направляючих перегородок. Було отримано залежності надлишкового тиску в горизонтальних каналах шириною перетину 1 мм від швидкості течії масла на вході в цей канал, що дозволяє розрахувати швидкість, завдяки якій можливо організувати наскрізну циркуляцію масла в каналі за умови недопущення надмірного зростання надлишкового тиску в каналі, що може запобігти аварійній ситуації.

**Практична цінність.** Запропоновано нову математичну модель пов'язаних між собою теплообмінних та гідродинамічних процесів, що мають місце в дискових обмотках силового трансформатора, яка, на відміну від існуючих, враховує ширину горизонтального каналу менше 3 мм, що дозволяє спрогнозувати характер розповсюдження теплоти в обмотці та визначити можливі місця перегріву котушок та передчасного руйнування ізоляційних матеріалів.

**Ключові слова:** масляний трансформатор; теплообмін; енергетичне обладнання; система охолодження.

### ВСТУП

В сучасних економічних умовах одним з ключових питань в галузі трансформаторобудування стає зменшення матеріалоємності електричних машин. Це, в свою чергу, призводить до зменшення габаритних розмірів трансформаторів, наприклад, за рахунок зменшення ширини радіальних каналів в системі його теплового захисту. 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.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Трансформатори є найважливішим обладнанням в системі трансмісії та розподілу, які ефективно обслуговують різноманітні потреби: внутрішній та зовнішній розподіл, середня напруга, висока напруга, додаткова висока напруга та застосування надвисокої напруги. Проблемам охолодження силових трансформаторів присвячена велика кількість публікацій [1, 2]. За допомогою математичного аналізу та експериментальних вимірювань проведено діагностику розподілу масляних трансформаторів з точки зору механічної міцності обмотки. Аналіз зростання температури при різних навантаженнях є дуже важливим, оскільки дозволяє визначити вантажну ємність і перевантаження трансформатора при різних робочих умовах і дотримуватися змінної температури навколишнього середовища [3].

В переважній кількості наукових робіт з трансформаторобудування приведені дослідження процесів відводу теплоти від трансформаторних обмоток з шириною радіального каналу не менше 3 мм.

Проведено моделювання підвищення коефіцієнтів передачі для підйому газових бульбашок у рідині та проведено експерименти для вивчення цього явища, яке забезпечує новий спосіб охолодження масляних трансформаторів [4].

Ефірні рідини пропонують потенціал для більш безпечних та більш екологічно чистих силових трансформаторів. Це може заощадити значні цивільні витрати в установках, зменшивши вимоги до пожежної безпеки та спростивши стримування. Ці переваги були використані при розподілі напруги протягом майже чотирьох десятиліть у багатьох областях застосування[5].

За звичайних умов експлуатації встановлюються рівняння, що описують теплові явища в трансформаторі. Розроблено алгоритми прогнозування температур у критичних точках в нестационарних станах, що відбуваються на діаграмах навантаження/часу[6]. Запропоновано визначити провідності матеріалів теплового захисту залежно від температури та постійних ємностей еквівалентних теплових ланцюгів трансформатора.

На сьогоднішній день виконано дослідження методики створення систем теплового захисту енергетичного обладнання [7]. Створення теплової ізоляції (на базі набору перфорованих металевих пластин), що володіє простотою виготовлення, має оптимальні теплофізичні характеристики й високу міцність, що дозволяє використовувати конструктивні елементи як з одного матеріалу, так і комбінації різних.

Проведено ґрунтовні дослідження основних правил проектування обмоток силових трансформаторів [8] та основних режимів роботи енергетичного обладнання [9].

Детально розглянуто теплообмінні та гідродинамічні процеси, які мають місце в радіаторах систем охолодження силових трансформаторів при відведенні теплоти від масла до навколишнього середовища[10]. Описано експериментальну установку, яку створено для проведення досліджень. Проведено порівняння результатів, отриманих експериментальним шляхом з результатами математичного моделювання.

Наведено результати застосування оригінальної нелінійної нестационарної теплової моделі масляних силових трансформаторів [11]. Основною перевагою створеної моделі є точне врахування впливу тепловіддачі нелінійної конвекції на перехідний тепловий процес [12]. Метою проведення дослідження є визначення точності застосування отриманих параметрів у трансформаторі в нормальному режимі роботи. З цією метою виконано точний розрахунок розподілу втрат потужності необхідний і запропонований у роботі [13].

У більшості випадків для створення конкурентоспроможного трансформаторного устаткування застосовуються ефективні методи охолодження обмоток [14, 15].

Одним з таких методів є природна циркуляція охолоджуючої рідини в горизонтальних і вертикальних каналах обмоток за умови ширини горизонтальних каналів не більше, ніж 3 мм. Реалізація такого виду охолодження дозволяє знизити матеріалоемність трансформатора за рахунок зменшення його габаритних розмірів, виключити з системи охолодження наоси за рахунок зміни примусової циркуляції на природну, зменшити масу і розміри трансформатора, що, в свою чергу, призведе до зменшення витрат.

Проте, окрім видимих зисків у заміні виду циркуляції охолоджуючого середовища в обмотках трансформатора, є ряд проблем, які мають бути вирішеними [16]. Серед них: застій масла в горизонтальних каналах обмоток, місцевий перегрів катушок, утворення зон, в яких кількість масла, що протікає, недостатня для ефективного відводу теплоти від катушок. У зв'язку з цим, необхідно точно прогнозувати характер температурного поля таких обмоток для розробки заходів по забезпеченню надійного охолодження обмоток трансформатора. Існуючі методи розрахунку теплового стану обмоток використовуються лише у випадках, коли ширина перетину горизонтальних каналів становить більше 3 мм. Тому теоретичне та експериментальне дослідження гідродинаміки в охолоджуючих каналах обмоток з розміром горизонтальних каналів менше

3 мм та природною циркуляцією охолоджуючого середовища є актуальним завданням.

**Математична модель обмотки силового трансформатора**

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 вибраній координатній системі буде мати вигляд:

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

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:

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

де  $q_v$  – середня щільність теплових втрат в об'ємі провідника, Вт/м<sup>3</sup>,  $W$  – швидкість течії рідини, м/с,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(мК),  $\rho$  – щільність рідини, кг/м<sup>3</sup>,  $C_p$  – теплоємність рідини, Дж/(кгК).

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

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

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial W_\varphi}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial W_\varphi}{\partial x} + W_r \frac{\partial W_\varphi}{\partial r} + \frac{W_\varphi}{r} \frac{\partial W_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{W_\varphi W_r}{r} \right) = \rho g_\varphi - \\ & - \frac{\partial p}{r \partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \left( \frac{\partial W_\varphi}{\partial x} + \frac{\partial W_x}{r \partial \varphi} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu \left( \frac{\partial W_\varphi}{\partial r} + \frac{\partial W_r}{r \partial \varphi} \right) \right) + \\ & + \frac{2\mu}{r} \left( \frac{\partial W_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \varphi} - \frac{W_\varphi}{r} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( 2\mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial W_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{W_r}{r} \right) \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu \left( \frac{\partial W_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \varphi} - \frac{W_\varphi}{r} \right) \right). \quad (3) \end{aligned}$$

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

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

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. Площа поверхні кожної котушки дорівнює 500 мм<sup>2</sup>.

Початкові умови при вирішенні цієї моделі:

- початкова температура масла 60 °С;
- температура навколишнього середовища 30 °С;
- щільність теплового потоку 3500 Вт/м<sup>2</sup>.

**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Очевидним є те, що підвищення швидкості течії масла на вході в радіальний канал системи теплового захисту силового трансформатора призведе до значного зростання інтенсивності тепловіддачі від розігрітої міді котушок до охолоджуючого середовища. Проте, для комплексної оцінки позитивності такого зовнішнього впливу необхідно провести аналіз залежності надлишкового тиску трансформаторного масла в горизонтальному каналі енергетичного обладнання 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 рисунку 1.

На рисунку 1 видно, що в правій частині каналу системи теплового захисту енергетичного обладнання 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. 1а) 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. 1б) 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 напрямком прикладеного навантаження, тобто вплив на модель позитивної за знаком швидкості, що застосована до лівої границі, ідентичний впливу негативної швидкості на правій границі каналу.

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 умови наявності швидкості масла на вході в радіальний канал, що дорівнює 10 м/с, організувати наскрізну циркуляцію масла уздовж усього 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 (рисунок 2).

В якості надлишкового тиску, який відображено на діаграмі, прийнято максимальний надлишковий тиск в каналі (позначка «МХ» на рис. 1б).

Надлишковий тиск охолоджуючого середовища в системі теплового захисту енергетичного обладнання 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 знайдено апроксимаційне рівняння:

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

де  $x$  – швидкість масла на вході в радіальний канал, м/с,

$y$  – максимальне значення надлишкового тиску, Па.

### ВИСНОВКИ

Значення надлишкового тиску масла в радіальному каналі системи теплового захисту енер-

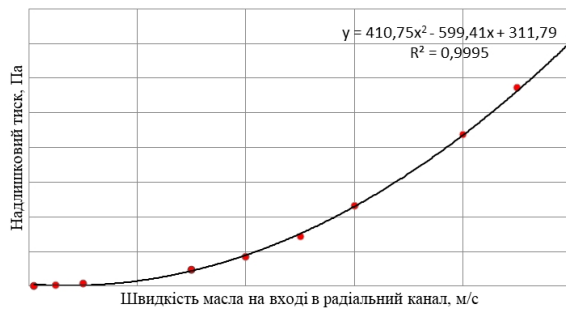


Рисунок 2. Залежність надлишкового тиску масла від швидкості його течії на вході в горизонтальний канал

гетичного обладнання знаходиться в квадратичній залежності від швидкості масла на вході в канал. Отже збільшення швидкості масла призведе до значно більшого зростання надлишкового тиску охолоджуючої рідини.

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

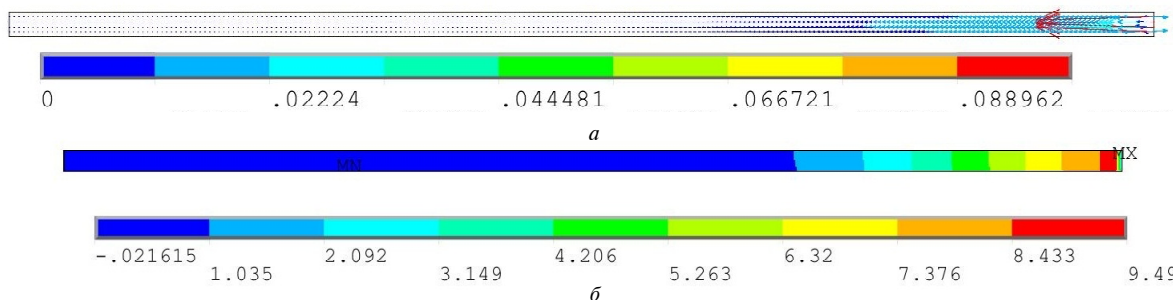


Рисунок 1. Розподіл швидкостей масла в радіальному каналі трансформатора (а) та розподіл надлишкового тиску масла (б) в радіальному каналі трансформатора при швидкості на вході в радіальний канал 0,1 м/с

кількість тепла від котушок та запобігти перегріву активної частини трансформатора. Проте організувати наскрізну циркуляцію охолоджуючого середовища в умовах, що розглядаються, практично неможливо.

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 ще й призведе до суттєвого зростання надлишкового тиску в радіальних каналах, що може призвести до порушення роботи електричної машини та спричинити аварійну ситуацію.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1]. Mehta D. A review on critical evaluation of natural esters in mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part 1 / D. Mehta, P. Kundu, A. S. Jhala. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2016. – № 23 (2). – P. 873–880.
- [2]. Mehta D. A review on critical evaluation of natural esters in mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part 2 / D. Mehta, P. Kundu, A. S. Jhala // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2016. – № 23 (3). – P. 1705–1712.
- [3]. Janura R. Thermal processes in materials of oil transformers / R. Janura, M. Gutten, D. Korenciak. // Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE). – 2016. – № 1. – P. 14–19.
- [4]. Bashirov M. G. Increase of efficiency of cooling of the power oil transformers / M. G. Bashirov, M. R. Minlibayev, A. S. Hismatullin. // Oil and Gas Business. – 2014. – № 2. – P. 358–367.
- [5]. Lashbrook M. Review of the electrical and thermal behaviour of ester-based dielectric liquids for extra high voltage applications / M. Lashbrook, A. Gyore, R. Martin. // Electrical Insulation Conference (INSUCON). – 2017. – № 13. – P. 367–380.
- [6]. Kalić D. On the determination of characteristic temperatures in power oil transformers during transient states / D. Kalić, Z. Radaković, Z. Lazarević. // Archiv für Elektrotechnik. – 1993. –

№ 76. – С. 457–468.

- [7]. Cheilytko A. A. Creation of effective metallic thermal insulation constructions / A. A. Cheilytko, S. V. Ilin, M. A. Nosov. // Науковий вісник НГУ. – 2017. – № 6. – P. 103–108.
- [8]. Del Vecchio R. Transformer Design Principles With Applications 3e / R. Del Vecchio, B. Poulin, P. Feghali. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 612 p. – (Engineering & Technology).
- [9]. Franklin A. C. The J and P transformer book: a practical technology of the power transformer / A. C. Franklin, D. P. Franklin. – London : Butterworths, 2016. – 815 с.
- [10]. Ільїн С. В. Дослідження теплових та гідродинамічних процесів в радіаторній системі охолодження масляного трансформатора / С. В. Ільїн // Технологічний аудит и резерви производства. – 2013. – № 1. – С. 15–18.
- [11]. Radakovic Z. Numerical determination of characteristic temperatures in directly loaded power oil transformer / Z. Radakovic // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2003. – № 13. – P. 47–54.
- [12]. Zhang J., Li X., Vance M. Experiments and modeling of heat transfer in oil transformer winding with zigzag cooling ducts // Applied Thermal Engineering. – 2008. – Т. 28. – № 1. – С. 36–48.
- [13]. Dai J., Wang Z. D., Jarman P. Moisture and aging effect on the creepage discharge characteristics at the oil/transformer-board interface under divergent field // Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2008. CEIDP 2008. Annual Report Conference on. – IEEE, 2008. – С. 662–665.
- [14]. Eschenroeder A. Q., Faeder E. J. A Monte Carlo Analysis of Health Risks from PCB Contaminated Mineral Oil Transformer Fires // Risk Analysis. – 1988. – Т. 8. – № 2. – С. 291–297.
- [15]. Marulanda A. R. et al. Study of the vegetal oil as a substitute for mineral oils in distribution transformer // Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES. – IEEE, 2008. – С. 1–6.
- [16]. Zhang Y. et al. An artificial neural network approach to transformer fault diagnosis // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Т. 11. – № 4. – С. 1836–1841.

Статья поступила в редакцию 28.03.2018

**Ильин С. В.**

канд. техн. наук, доцент кафедры теплоэнергетики и гидроэнергетики Запорожской государственной инженерной академии, Запорожье, Украина, e-mail: svizp1@gmail.com;

**Чейлытко А. А.**

канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры теплоэнергетики и гидроэнергетики Запорожской государственной инженерной академии, Запорожье, Украина, e-mail: cheilytko@i.ua;

**Матказина Р. Р.**

доцент кафедры теплоэнергетики и гидроэнергетики Запорожской государственной инженерной академии, Запорожье, Украина, e-mail: rimmaamina77@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ МАСЛА В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ШИРИНОЙ РАДИАЛЬНОГО КАНАЛА В 1 ММ

**Цель работы.** Повышение эффективности охлаждения обмоток силового трансформатора с шириной сечения радиального канала меньше, чем 3 мм, при естественном движении охлаждающей жидкости, путем совершенствования геометрических параметров системы охлаждения при снижении материалоемкости электрической машины является актуальным направлением научных исследований.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач проведен анализ и избраны теоретические методы, приборы, методики экспериментальных исследований. Наиболее полно использованы следующие методы: математическое моделирование гидродинамических процессов в дисковой обмотке масляного силового трансформатора, основанное на решении дифференциального уравнения теплопроводности и уравнения Навье-Стокса с меняющимися условиями однозначности методом конечных элементов с использованием специальных пакетов программного обеспечения; методы статистической обработки экспериментальных данных с использованием специальных пакетов программного обеспечения.

**Полученные результаты.** Избыточное давление масла в каналах обмотки увеличивается при росте порядкового номера катушки. Выявлено, что с ростом скорости масла на входе в горизонтальный канал значения избыточного давления в нем растут в квадратичной степени. Установлено, что в масле горизонтального канала возникает подъемная сила, о чем свидетельствует рост избыточного давления у верхней границы канала.

Впервые получена аналитическая зависимость избыточного давления масла в радиальном канале дисковой обмотки силового трансформатора скорости течения масла на входе в этот канал.

**Научная новизна.** Получили дальнейшее развитие научные представления о характере движения охлаждающего трансформаторного масла в каналах дисковых обмоток при отсутствии направляющих перегородок. Были получены зависимости избыточного давления в горизонтальных каналах шириной сечения 1 мм от скорости течения масла на входе в этот канал, позволяющий рассчитать скорость, благодаря которой возможно организовать сквозную циркуляцию масла в канале при условии недопущения чрезмерного роста избыточного давления в канале, может предотвратить аварийную ситуации.

**Практическая ценность.** Предложена новая математическая модель связанных между собой теплообменных и гидродинамических процессов, имеющих место в дисковых обмотках силового трансформатора, которая, в отличие от существующих, учитывает ширину горизонтального канала менее 3 мм, что позволяет спрогнозировать характер распространения теплоты в обмотке и определить возможные места перегрева катушек и преждевременного разрушения изоляционных материалов.

**Ключевые слова:** масляный трансформатор; теплообмен; энергетическое оборудование; система охлаждения.

**Ilin S. V.**

Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor of the Department of Heat and Power Engineering and Hydropower, Zaporizhzhia State Engineering Academy, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: svizp1@gmail.com;

**Cheilytko A. O.**

Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Doctoral of the Department of Heat and Power Engineering and Hydropower, Zaporizhzhia State Engineering Academy, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: cheilytko@i.ua;

**Matkazina R. R.**

Associate professor of the Department of Heat and Power Engineering and Hydropower, Zaporizhzhia State Engineering Academy, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: rimmaamina77@gmail.com

## INVESTIGATION OF EXHAUST OIL PRESSURE IN TRANSFORMER WINDINGS WITH A 1 MM RADIAL CHANNEL

**Purpose.** Increasing the cooling efficiency of the windings of a power transformer with a radial channel cross-sectional width of less than 3 mm, with the natural movement of the cooling liquid, by improving the geometric parameters of the cooling system, while reducing the material consumption of an electrical machine, is an actual line of scientific research.

**Methodology.** To solve the tasks set, analysis and theoretical methods, instruments, experimental research methods have been selected. The following methods are most fully used: mathematical modeling of hydrodynamic processes in the disk winding of an oil power transformer based on solving the differential heat equation and

the Navier-Stokes equation with the changing uniqueness conditions by the finite element method using special software packages; methods of statistical processing of experimental data using special software packages.

**Findings.** The excess oil pressure in the winding channels increases with the growth of the coil number. It was found that with increasing oil velocity at the inlet to the horizontal channel, the value of the excess pressure in it grows in a quadratic degree. It is established that in the oil of the horizontal channel there is a lifting force, as evidenced by the increase in excess pressure at the upper boundary of the channel.

For the first time, an analytical dependence of the excess oil pressure in the radial channel of the winding of the power transformer of the oil flow velocity at the inlet to this channel was obtained.

**Scientific novelty.** The scientific ideas of the cooling transformer oil movement in the channels of the disk windings in the absence of directing partitions have been further developed. Dependences of the excess pressure in horizontal channels with a cross-sectional width of 1 mm on the flow velocity of the oil at the inlet to this channel were obtained, which makes it possible to calculate the rate through which it is possible to organize through circulation of oil in the channel, provided that excessive growth of excess pressure in the channel, that may prevent an emergency situation.

**Practical value.** A new mathematical model of the interconnected heat transfer and hydrodynamic processes taking place in the disk windings of the power transformer is proposed, which, unlike existing ones, takes into account the width of the horizontal channel less than 3 mm, which allows predicting the nature of heat propagation in the winding and determining possible places for overheating of the coils and premature failure of insulation materials.

**Keywords:** oil transformer; heat exchange; power equipment; cooling system.

## REFERENCES

- [1]. Mehta D., Kundu P., Jhala A. S. (2016). A review on critical evaluation of natural ester-based mineral oil insulating liquid for use in transformers. Part I IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 23 (2), 873–880.
- [2]. Mehta D. A., Kundu A. S. (2016). Jhala. review on critical evaluation of natural ester-based mineral oil insulating liquid for use in transformers. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 23 (3), 1705–1712.
- [3]. Janura R., M. Gutten D. Korenciak. (2016). Thermal processes in materials of oil transformers. Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE), 1, 14-19.
- [4]. Bashirov M. G., M. R. Minlibayev, A. S. (2014). Hismatullin. Increase of efficiency of cooling of the power oil transformers. Oil and Gas Business, 2, 358–367.
- [5]. Lashbrook M., A. Gyore R. (2017). Martin. Review of the electrical and thermal behaviour of ester-based dielectric liquids for extra-high voltage applications. Electrical Insulation Conference (INSUCON), 13, 367–380.
- [6]. Kalić D., Z. Radaković, Z. Lazarević. (1993). On the determination of characteristic temperatures in power oil transformers during transient states. Archiv für Elektrotechnik, 76, 457–468.
- [7]. Cheilytko A. A., Ilin S. V., Nosov M. A. (2017). Creation of effective metallic thermal insulation constructions. Naukovij visnik NGU, 6, 103-108.
- [8]. Del Vecchio R. Poulin B., Feghali P. – Boca Raton (2017). Transformer Design Principles With Applications CRC Press, 612.
- [9]. Franklin A. C., Franklin D. P. (2016). The J and P transformer book: a practical technology of the power transformer. London: Butterworths, 815.
- [10]. Il'in S. V. (2013). Doslidzhennja teplovih ta gidrodinamichnih procesiv v radiatornij sistemi oholodzhennja masljanogo transformatora. Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva., 1, 15–18.
- [11]. Radakovic Z. (2003). Numerical determination of characteristic temperatures in directly loaded power oil transformer. Radakovic: International Transactions on Electrical Energy Systems., 13, 47–54.
- [12]. Zhang J., Li X., Vance, M. (2008). Experiments and modeling of heat transfer in oil transformer winding with zigzag cooling ducts. Applied Thermal Engineering, 28(1), 36–48.
- [13]. Dai J., Wang Z. D., Jarman P. (2008). Moisture and aging effect on the creepage discharge characteristics at the oil/transformer-board interface under divergent field Electrical Insulation and Dielectric Phenomena., CEIDP. Annual Report Conference on.: IEEE, 662–665.
- [14]. Eschenroeder A. Q., Faeder E. J. A. (1988). Monte Carlo Analysis of Health Risks from PCB Contaminated Mineral Oil Transformer Fires : Risk Analysis, 8(2), 291–297.
- [15]. Marulanda, A. R. et al. (2008). Study of the vegetal oil as a substitute for mineral oils in distribution transformer Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 1–6.
- [16]. Zhang Y. et al. (1996). An artificial neural network approach to transformer fault diagnosis. IEEE Transactions on Power Delivery, 11(4), 1836–1841.