

УДК 621.314

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ КАНАЛОВ В ОБМОТКАХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ "М"**

**С.Г. Нерсесян**

*Национальный политехнический университет Армении*

Для охлаждения обмоток силовых масляных трансформаторов предусматриваются каналы, в которых циркулирует охлаждающее масло. Так как радиусы коаксиальных цилиндрических поверхностей обмоток имеют большие размеры, то расчеты свободно-конвективного теплообмена можно рассматривать как задачу плоского канала. Дается определение ширины плоского канала в обмотках силовых масляных трансформаторов при свободно-конвективном теплообмене с системой охлаждения "М" для практически "спокойной" среды, где имеют место дополнительное движение и завихрение охлаждающего масла. Результаты аналитического исследования подтверждены экспериментально полученными данными.

**Ключевые слова:** трансформатор, обмотка, канал, температура, теплообмен.

**Введение.** В активной части работающего трансформатора возникают потери энергии, приводящие к нагреву магнитопровода и обмоток. Если температура нагрева превышает допустимое значение, то из-за нарушения изоляционного материала обмоток трансформатор выходит из строя, и в обмотках создаются охлаждающие каналы.

В литературе приводятся табличные значения ширины целевых каналов, полученные экспериментальным путем [1,2]. Числовые значения расстояния между обмотками низкого и высокого напряжений (НН и ВН) в зависимости от мощности силового масляного трансформатора 25...1000 кВА соответственно составляют 8...10 мм.

Однако эти значения при аналитических исследованиях теплообмена неприемлемы. Целью настоящей работы является аналитическое решение задачи и определение ширины каналов в зависимости от мощности силового трансформатора и физических параметров охлаждающего трансформаторного масла.

Так как радиусы коаксиальных цилиндрических поверхностей обмоток, образующих каналы, применяемые при проектировании силовых масляных трансформаторов, имеют большие размеры, то расчеты свободно-конвективного теплообмена можно рассматривать как задачу плоского канала.

**Методы исследования.** В [3,4] проведено аналитическое исследование интенсивности теплообмена при свободно-конвективном теплообмене для данных плоских каналов в идеально “спокойной” среде в условиях отсутствия дополнительного движения и завихрения охлаждающего масла.

В данной работе рассматривается свободно-конвективный теплообмен в случае гидравлически замкнутой системы охлаждения “М” и определяется ширина плоского канала для практически “спокойной” среды с учетом дополнительного движения и завихрения охлаждающего масла. Охлаждающее масло входит в пограничный слой с начальной скоростью  $w_0$ . При этом скорость движущегося слоя можно представить следующим образом [3]

$$w = w_x \bar{y} (1 - \bar{y})^2 + w_0 \bar{y} (2 - \bar{y}), \quad (1)$$

где  $\bar{y} = \frac{y}{\delta}$  – относительная координата;  $\delta$  – толщина пограничного слоя охлаждающего масла у поверхности стенки, м;  $w_x$  – продольная составляющая скорости охлаждающего масла, м/с.

Продольная составляющая скорости определяется из уравнения движения пограничного слоя и без учета инерционных сил имеет вид [3]

$$w_x = \frac{\beta g \nu_{cm} \delta^2}{3\nu_t} - 2w_0, \quad (2)$$

где  $w_0$  – скорость входящего масла у кромки канала, м/с;  $\nu_{cm} = t_{cm} - t_o$ ;  $t_{cm}, t_o$  – температура поверхности обмотки и масла у входа в канал, °С;  $\nu_t$  – коэффициент кинематической вязкости трансформаторного масла, м<sup>2</sup>/с;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения масла, 1/К;  $g$  – гравитационное ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Интегрируя уравнение (1) по высоте канала, получим среднюю скорость охлаждающего трансформаторного масла по сечению пограничного слоя, т.е.

$$w_{cp} = \int_0^1 w d\bar{y} = \frac{\beta g \nu_{cm} \delta^2}{36\nu_t} + \frac{w_0}{2}. \quad (3)$$

Толщина пограничного слоя определяется на обеих стенках канала по уравнению [3]

$$\delta = \frac{2\lambda}{\alpha}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на поверхностях плоского щелевого канала,  $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности трансформаторного масла,  $Вт/м \cdot ^\circ C$ .

Подставляя значение (4) в выражение (3), для средней скорости масла получим

$$w_{cp} = \frac{\beta g v_{cm}}{36 v_t} \cdot \left( \frac{2\lambda}{\alpha} \right)^2 + w_0/2. \quad (5)$$

После простого преобразования выражения (5) в критериальной форме получим

$$Re_{cp} = \frac{1}{9} Gr Nu^{-2} + \frac{Re_0}{2}, \quad (6)$$

где  $Re_{cp} = \frac{w_{cp} H}{v_t}$ ;  $Re_0 = \frac{w_0 H}{v_t}$  – критерий Рейнольдса;  $Gr = \frac{\beta g v_{cm} H^3}{v_t^2}$  – критерий

Грасгофа;  $Nu = \frac{\alpha H}{\lambda}$  – критерий Нуссельта.

Для определения  $Re_{cp}$  необходимо иметь числовое значение критерия  $Nu$ , которое вычисляется для практически “спокойной” среды уравнением [3].

$$Nu = \frac{0,1361}{Ra^{0,5}} \left[ \sqrt{Pe_0^2 + 8Ra} - Pe_0 \right]^{0,5} \cdot \left[ \sqrt{Pe_0^2 + 8Ra} + 2Pe_0 \right], \quad (7)$$

или для идеально “спокойной” среды, когда  $w_0 = 0$  ( $Re_0 = 0$ ), – уравнением [5].

$$Nu = 0,647 Ra^{0,25}, \quad (8)$$

где  $Pe_0 = \frac{w_0 H}{a_t}$  – критерий Пекле;  $Ra = Gr Pr$  – критерий Релея;  $Pr = \frac{v_t}{a_t}$  –

критерий Прандтля;  $a_t$  – коэффициент температуропроводности трансформаторного масла,  $м^2/с$ .

Таким образом, с помощью выражения (7) или (8) определяем число Нуссельта, после чего среднее значение числа Рейнольдса (6) и среднюю скорость циркуляции трансформаторного масла (3) с учетом дополнительной скорости  $w_0$  [2].

Расчеты выполнены для обмотки низкого напряжения силового масляного трансформатора типа ТВМА-25, имеющего цилиндрическую форму с внутренним –  $r_1=0,1$  м и внешним –  $r_2=0,16$  м радиусами с высотой  $H=0,4$  м.

Принимая температуру охлаждающего трансформаторного масла марки Т0-35К (ГОСТ 1167775)  $\nu_t = 30^\circ\text{C}$  ( $t_0 = 65^\circ\text{C}$ ), находим значения физических параметров [6]:  $\beta = 7.9 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$ ;  $\lambda = 0,128 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$ ;  $\nu_t = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\alpha_t = 7,371 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\text{Pr} = 82,7$ . Полагая, что  $w_0 = 5 \text{ мм/с}$  ( $\text{Pe}_0 = 2,71 \cdot 10^4$ ) [2], по выражениям критерия Рейнольдса вычисляем среднее значение, скорость циркуляции охлаждающего масла  $w_{cp} = 10,2 \text{ мм/с}$ . После определения

$$\text{Re}_{cp} = \frac{w_{cp} H}{\nu_t}; \quad \text{Re}_o = \frac{w_o H}{\nu_t}$$

вычисляем ширину канала по формуле  $a = 2\delta$ .

Числовое значение ширины канала для обмотки низкого напряжения силового масляного трансформатора типа ТВМА-25 равно 5,4 мм, что соответствует результатам экспериментальных исследований [2].

**Заключение.** Таким образом, представлена методика расчета ширины плоского канала в обмотках силовых масляных трансформаторов при свободно-конвективном теплообмене для практически “спокойной” среды, где имеют место дополнительное движение и завихрение охлаждающего масла. Результаты аналитического исследования были сопоставлены с экспериментальными данными, погрешность которых не превышала 10%.

### Литература

1. **Гончарук А.И.** Расчет и конструирование трансформаторов.- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 258 с.
2. **Боднар В.В.** Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.
3. **Азарян П.Е., Нерсесян С.Г.** Свободная конвекция и теплообмен вертикальной нагретой стенки трансформаторов в практически “спокойном” пространстве // Изв. АН АрмССР. – 1983.– Т. 36, № 5. – С. 42-46.
4. **Фукс Л.Г.** Свободная конвекция в нагретой вертикальной щели // Изв.вузов СССР. Энергетика. - 1961. - 3.- С. 59-65.
5. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 1975. – 488 с.
6. **Киш Л.** Нагрев и охлаждение трансформаторов / Под ред. Е.Г. Тарле. - М.: Энергия, 1980. - 180 с.

*Поступила в редакцию 16.03.2014.  
Принята к опубликованию 26.05.2016.*

**ՈՒժԱՅԻՆ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐՆԵՐԻ ՓԱԹՈՒՅԹՆԵՐԻ ՆԵՐՍՈՒՄ ՃԵՂՔԱՅԻՆ  
ԽՈՒՂԱԿՆԵՐԻ ԼԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ "M" ՀՈՎԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳՈՒՄ**

**Ա.Գ. Ներսեսյան**

Յուղային ուժային տրանսֆորմատորների փաթույթների հովացման համար նախատեսվում են ճեղքային խողակներ, որոնցում շրջանառություն է կատարում հովացնող յուղը: Քանի որ համառանցք փաթույթների մակերեսների շառավիղները մեծ են կրիտիկականից, ապա դիտվում է խնդիրը որպես բնական ջերմափոխանցում հարթ ճեղքային խողակներում: Որոշվել է ուժային յուղային տրանսֆորմատորների փաթույթներում ճեղքային խողակների լայնությունը ազատ կոնվեկցիայի դեպքում իրական հանգիստ պայմաններում, երբ առկա են հովացնող յուղի լրացուցիչ շարժումը և մրրկացումը: Վերլուծության արդյունքները հաստատված են փորձնական տվյալներով:

**Առանցքային բառեր.** տրանսֆորմատոր, փաթույթ, ճեղքային խողակ, ջերմաստիճան, ջերմափոխանակություն:

**DETERMINING THE WIDTH OF THE SLOT-HOLE CHANNELS IN THE  
WINDINGS OF POWER TRANSFORMERS WITH A COOLING "M" SYSTEM**

**S.G. Nersesyan**

For cooling the winding of power oil transformers, slot-hole channels are envisaged in which cooling oil circulates. Since the radii of coaxial cylindrical surfaces of the windings exceed the critical dimensions, the free-convective heat exchange is considered as a problem of flat slot channel. The width of the flat slot channel in the windings of power oil transformers at free-convective heat exchange for practically serene environment where there is extra traffic and an eddy of the cooling oil is defined. The data of analytical investigation are confirmed by experimentally obtained results.

**Keywords:** transformer, winding, slot-hole channel, temperature, heat exchange.