

С.Г. НЕРСЕСЯН, Ю.А. ОГАНЕСЯН, А.А. КИРАКОСЯН

РАСЧЕТ НАИБОЛЕЕ НАГРЕТОЙ ТОЧКИ ОБМОТКИ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ СУХОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Исследовано тепловое поле обмотки низшего напряжения трансформатора с воздушным охлаждением. Определены температура наиболее нагретой точки и ее местонахождение. Сравнение результатов расчета предложенной методики с экспериментальными данными, полученными в НИИ "Андрон", показало, что погрешность расчета не превышает 8%.

Ключевые слова: теплообмен, теплопроводность, температура, цилиндрическая обмотка, охлаждение.

При проектировании энергетического и электротехнического оборудования в связи с ростом удельных нагрузок возникает вопрос точности тепловых расчетов. Так как в элементах конструкций с внутренними источниками тепла существуют большие градиенты температуры, то тепловой расчет по средней температуре недопустим. В связи с этим необходим расчет теплового поля, основанный на решении сопряженных задач конвективного теплообмена, которые, в силу известных математических сложностей, трудно внедряются в инженерную практику. Имеется небольшое количество работ, где решались внутренние сопряженные задачи, результаты которых можно было бы использовать. Например, в [1] рассматривалось течение жидкостей в каналах с равномерным или параболическим профилем скорости, с термически тонкими стенками канала и т.д. Нагрев обмоток трансформатора зависит от интенсивности теплообмена между поверхностями катушки и окружающей средой. В охлаждающей среде имеются дополнительные движения и завихрения. Составляющая коэффициента теплоотдачи путем конвекции обычно определяется из критериальных уравнений, полученных в результате обработки теоретических и опытных данных в основном на классических моделях (пластина, цилиндр) [2], а составляющая коэффициента теплоотдачи путем излучения - по известным законам радиационного теплообмена [3]. Для теплового расчета проектируемых обмоток сухих трансформаторов необходимо определить мощность тепловыделения и расход воздуха по охлаждающим каналам, которые существенно влияют на максимальный перегрев наиболее нагретой точки обмоток в установившемся режиме. В [2] приведены разностные схемы для сопряженных задач в гладких каналах, но не представлены результаты исследования всех факторов, влияющих на интенсивность теплообмена и максимальную температуру стенки.

В настоящей работе предлагается достаточно простой алгоритм решения сопряженных задач вертикальных каналов. Используются уравнения пограничного слоя с учетом влияния всех факторов на интенсивность теплообмена, вследствие чего методика становится приемлемой для инженерных расчетов.

Эффективный размер теплового канала a_z между двумя узлами

трансформатора можно определить уравнением

$$a_{\text{э}} = [2 + 0,625(1 - \xi)](288 / RaK_1)^{0,25} \cdot H,$$

где ξ - соотношение плотностей тепловых потоков двух охлаждающих концентрических цилиндрических тел, $\xi = q_{1\text{хол}} / q_{2\text{топ}}$ (для внутреннего канала обмотки $\xi=1$); Ra - критерий Релея по [2]; K_1 - коэффициент эффективности охлаждения по [3].

В случае, если полученный размер канала $a_{\text{э}}$ меньше электрического изоляционного расстояния между двумя узлами [4], принимается размер канала, равный изоляционному расстоянию. Исходя из этого, в настоящей работе предлагается тепловой расчет обмоток силовых сухих трансформаторов, дифференциальное уравнение которых имеет вид

$$\lambda_r \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) + \lambda_z \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + q_v = 0, \quad (1)$$

где λ_r , λ_z - эквивалентные коэффициенты теплопроводности по радиусу и высоте обмотки, Вт/мК; $\vartheta = t - t_0$ - перепад температуры обмотки над температурой окружающей среды, °С; q_v - удельная мощность внутренних источников тепла, Вт/м³; r , z - текущий радиус и высота обмотки, м.

Эквивалентные коэффициенты теплопроводности обмоток можно определить с помощью метода аналогии (рис. 1).

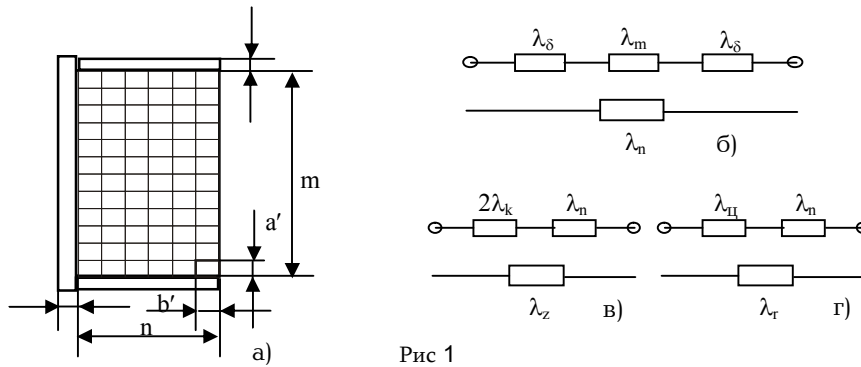


Рис 1

Для определения коэффициентов теплопроводности предварительно находим их составляющие части (рис. 1 б):

$$\lambda_R = \frac{(\delta_u + n(2\delta_u + a'))\lambda_u\lambda_{\text{ц}}\lambda_m}{\delta_u\lambda_m\lambda_u + n(2\delta_u\lambda_m\lambda_{\text{ц}} + a'\lambda_u\lambda_{\text{ц}})}, \quad (2)$$

$$\lambda_z = \frac{(2\delta_k + m(2\delta_u + b'))\lambda_u\lambda_k\lambda_m}{2\delta_k\lambda_m\lambda_u + m(2\delta_u\lambda_m\lambda_k + a'\lambda_u\lambda_k)}, \quad (3)$$

где $\delta_{\text{ц}}$, δ_k - соответственно толщина внутреннего цилиндра и картонов верхнего и нижнего укреплений ($\delta_{\text{кн}} = \delta_{\text{кв}}$), м; $\lambda_{\text{ц}}$, λ_k - соответственно коэффициенты теплопроводности материалов внутреннего цилиндра и картонов укрепления [5]; a' , b' - соответственно ширина и высота голого провода, м.

Используя метод суперпозиции, уравнение (1) можно представить в виде двух отдельных выражений [6]: $\vartheta = \vartheta_z + \vartheta_r$, $q_v = q_{vz} + q_{vr}$, т.е.

$$\lambda_z \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} + q_{vz} = 0 \text{ и } \frac{\lambda_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) + q_{vr} = 0. \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (4), получаем

$$\vartheta_z = -\frac{q_{vz} z^2}{2\lambda_z} + C_1 z + C_2, \quad (5)$$

$$\vartheta_r = -\frac{q_{vr} r^2}{4\lambda_r} + C_3 \ln r + C_4, \quad (6)$$

где C_1 , C_2 , C_3 и C_4 - постоянные коэффициенты интегрирования, определяемые из граничных условий третьего рода, т.е.

$$\pm \frac{\partial \vartheta_z / (z=\pm 1)}{\partial Z} + Bi_{1,2} \vartheta_z / (z=\pm 1) = 0, \quad Z = \frac{\bar{z}}{L}, \quad (7)$$

$$\pm \frac{\partial \vartheta_r / (R=R_2; R_1)}{\partial R} + Bi_{3,4} \vartheta_r / (R=R_2; R_1) = 0, \quad R = \frac{\bar{r}}{r_1}, \quad R_2 = \frac{r_2}{r_1}, \quad R_1 = 1. \quad (8)$$

Здесь $L = H/2$; H , r_1 , r_2 - соответственно высота, внутренний и наружный радиусы цилиндрической обмотки (рис. 2 а); Bi_1 , Bi_2 , Bi_3 и Bi_4 - соответственно числа Био на поверхности обмотки (рис. 2 б), равные

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 L}{\lambda_z}, \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2 L}{\lambda_z}, \quad Bi_3 = \frac{\alpha_3 r_1}{\lambda_r}, \quad Bi_4 = \frac{\alpha_4 r_2}{\lambda_r}. \quad (9)$$

В (9) можно принять $\alpha_1 = 0,7\alpha$, $\alpha_2 = 1,3\alpha$ и $\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha$ [7], где α - среднее значение коэффициента теплоотдачи на цилиндрической поверхности обмотки [3].

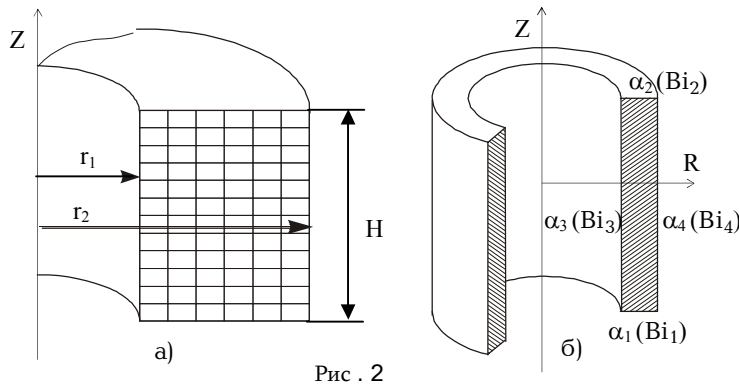


Рис. 2

Решая (5) и (6) по граничным условиям (7) и (8), получаем

$$\vartheta_z = \frac{q_{vz} L^2}{2\lambda_z} \left(1 - \frac{z^2}{L^2} + \frac{2(Bi_1 z - Bi_2 z + Bi_1 + Bi_2 + 2)}{Bi_1 + Bi_2 + 2Bi_1 Bi_2} \right), \quad (10)$$

$$\vartheta_r = \frac{q_{vr} r_1^2}{2\lambda_r} \left(\frac{1-R^2}{2} + M \cdot \ln R + \frac{M-1}{Bi_3} \right), \quad (11)$$

$$\text{где } M = \frac{1/Bi_3 + R_2^2/Bi_4 + (R_2^2 - 1)/2}{1/Bi_3 + 1/Bi_4 + \ln R_2}.$$

Для получения окончательного выражения температурного поля обмоток необходимо с учетом условия $t_{z\max}=t_{r\max}$ [4] определить q_{vr} и q_{vz} :

$$q_{vr} = \frac{q_v}{1 + \frac{\lambda_z A}{\lambda_r F} \left(\frac{r_1}{L} \right)}, \quad q_{vz} = q_v - q_{vr},$$

$$\text{где } A = (M-1) \left(\frac{1}{Bi_3} - \frac{1}{2} \right) + \frac{M}{2} \cdot \ln M,$$

$$F = 1 + \left(\frac{Bi_1 - Bi_2}{Bi_1 + Bi_2 + 2Bi_1 Bi_2} \right)^2 + \frac{2(Bi_1 + Bi_2 + 2)}{Bi_1 + Bi_2 + 2Bi_1 Bi_2}.$$

Месторасположение наиболее нагретой точки можно определить по координатам

$$\bar{z}_0 = \frac{Bi_1 - Bi_2}{Bi_1 + Bi_2 + 2Bi_1 Bi_2}, \quad (12)$$

$$\bar{r}_0 = \sqrt{M}. \quad (13)$$

Подставив (12) и (13) в (10) и (11), получаем температуру наиболее нагретой точки.

Для определения погрешности предложенной методики расчетные данные были сопоставлены с экспериментальными, полученными ВНИИКЭ, где проводилось тепловое испытание опытного образца сухого трансформатора с открытым исполнением мощностью 250 кВА, размерами обмоток $r_1=0,1025\text{м}$, $r_2=0,11\text{м}$ и $H=1,2\text{м}$. Обмотка НН изготовлена из алюминиевого провода с размерами $a' \times b' = 3 \times 12$ с изоляцией из фенифлона. При 250 и 380 кВА мощность внутренних тепловыделений обмотки составляет $q_{v250}=11 \cdot 10^4$ и $q_{v380}=25 \cdot 10^4$ Вт/м³. Вычисляя по (2) и (3), получим $\lambda_r=0,92$ Вт/м·К и $\lambda_z=1,58$ Вт/м·К.

После определения соответствующих коэффициентов теплоотдачи ([3] находим температуру для отдельных точек при установившемся режиме. В таблице приведены результаты расчета и экспериментальные данные максимально нагретой точки, координаты которой решаются по (12) и (13).

Таблица

Мощность, кВА	Перегрев максимально нагретой точки, °C	
	Расчетные данные	Экспериментальные данные
250	67,99	64,2
380	141,52	150

Как видно из таблицы, погрешность расчета и экспериментальных данных не превышает 8%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Никифоров А.Н., Паутова Н.А.** Численное моделирование сопряженного конвективного теплообмена в каналах // Изв. вузов. Электромеханика. – 1998. – С. 21-26.
2. **Нерсисян С. Г.** Некоторые вопросы охлаждения с внешней поверхности тепловых труб в практически "спокойном" пространстве // Межвуз. тем. сб. науч. труд. по энергетике. – Ер. 1984. – С. 81- 88.
3. **Киракосян А.А., Нерсисян С.Г., Оганесян Ю.А.** Исследование свободно-конвективного теплообмена цилиндрических нагретых поверхностей трансформатора в воздушном пространстве // Матер. год. науч. конф. ГИУА. – 1999. – С. 105-106.
4. **Диштреский В.С.** Расчет и конструирование электрической изоляции. – М.: Энергоиздат, 1981 –392с.
5. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 526 с.
6. **Готер Г.** Нагревание и охлаждение электрических машин. – М.; –Л.: ГЭИ, 1961. – 264 с.
7. **Романенко П.Н.** Теплопередача. –М.: Энергия 1969. – 431с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 30.09.2000.

Ս.Գ. ՆԵՐՏԵՍՅԱՆ, ՅՈՒ.Ա. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Ա.Ա.ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ

ԶՈՐ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐԻ ՑԱՐԳԱԳՈՒՅՆ ԼԱՐՄԱՆ ՓԱԹՈՒՅԹԻ ԱՌԱՎԵԼ ՏԱՔ ԿԵՏԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ

Հետազոտվել է օդային հովացումով տրանսֆորմատորի ցածրագույն լարման փաթույթի ջերմային դաշտը, որոշվել է առավել տաք կետի ջերմաստիճանը և տեղը: Առաջադրված մեթոդի հաշվարկային արդյունքների և □Անդրոն□ ԳՀԻ-ում փորձարկված բնական օդային հովացումով տրանսֆորմատորի տվյալների համեմատությունից հետևում է, որ հաշվարկի սխալանքը չի գերազանցում 8 %:

S.G. NERSESSYAN, Ju.A. HOVHANISSYAN, A.A. KIRAKOSSYAN

THE MOST HEATED POINT CALCULATION FOR THE LOWEST VOLTAGE WINDING OF THE DRY TRANSFORMER

The thermal winding field with the lowest voltage of the air-cooled transformer is studied. The temperature of the most heated point and its location are determined. The comparison of the proposed technique calculation results with experimental data, obtained at Scientific Research Institute "Andron", show that the error of calculation does not exceed 8%.