

# К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ С ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПРИ РАСЧЁТАХ ТРЕХМЕРНОГО ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР

Кутарев А.М., Падеев А.С.

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

Наибольшую трудность в тепловых расчётах трансформаторов малой мощности (ТММ) представляет определение коэффициента теплоотдачи (КТО). Обычно в качестве КТО берут значения, полученные при эксперименте с конкретной установкой и условиями [1]. Если нет возможности экспериментально определить КТО, то пользуются критериальными уравнениями или расчётными зависимостями, полученными при анализе теплообмена на поверхности, которые затем уточняют при проведении эксперимента [2, 3,4, 5].

Теплоотдача с нагретой поверхности в газовой среде осуществляется одновременно конвекцией, излучением и теплопроводностью. Результирующий КТО при естественном воздушном охлаждении рассчитывается по выражению [3]

$$\sigma_{рез} = Nu \cdot \frac{\lambda}{l} + 5,67 \cdot \varepsilon_1 \cdot k_t, \quad (1)$$

где  $Nu$  - критерий Нуссельта;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности пограничного слоя;

$\varepsilon_1$  – степень черноты поверхности;

$k_t$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры на значение КТО.

Первое слагаемое в формуле (1) представляет собой конвективную составляющую КТО. В практике расчётов часто принимается для обычных трансформаторов малой мощности (ТММ) ламинарный режим течения воздуха вдоль поверхности охлаждения, для которого, с достаточной степенью точности, для конвективной составляющей КТО, можно записать [6,7]

$$\alpha_{кв} = A_k \cdot \left( \frac{\Theta}{l} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где  $A_k$  - коэффициент, зависящий только от определяющей температуры пограничного слоя, данные для определения  $A_k$  приводятся, например, в [7];

$\Theta$  – превышение средней температуры поверхности над температурой охлаждающей среды;

$l$  – определяющий размер, м.

За определяющий размер обычно принимают: для вертикальной поверхности –

размер по вертикали, для горизонтальной поверхности – меньший из размеров площадки. Если КТО получен по формуле (2) при базовых значениях температуры и размера ( $\Theta_{\delta}$  и  $l_{\delta}$ ), то  $\alpha_{крз} = \alpha_{\delta}$ .

Второе слагаемое в формуле (1) учитывает лучевую составляющую КТО. Значение степени черноты приводится в литературе в зависимости от типа материала поверхности, её обработки и температуры [3, 7]. Значение коэффициента  $k_t$  можно определить по формуле

$$k_t(T1 + T2) \cdot (T1^2 + T2^2) \cdot 10^{-8}, \quad (3)$$

где  $T1, T2$  – абсолютные температуры нагретых тел.  $T1 = 273 + \Theta_1 + t_{oc}$  и  $T2 = 273 + \Theta_2 + t_{oc}$ ;  
 $t_{oc}$  – температура окружающей среды.

Если полученная в результате теплового расчёта средняя поверхностная температура  $\Theta$  отличается от базовой температуры  $\Theta_{\delta}$ , то производится перерасчёт  $\alpha_{крз}$  по формуле

$$\alpha_{крз} = \alpha_{\delta} \cdot \left( \frac{\Theta}{\Theta_{\delta}} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{\delta}$  – средний по высоте катушки базовый коэффициент теплоотдачи при температуре  $\Theta_{\delta}$ .

Выражение (4) справедливо для всех температур в диапазоне от 40 до 120 °С [6].

При необходимости изменение координаты вдоль высоты катушки для КТО часто учитывают по следующему выражению

$$\alpha_{крз} = \alpha_{\delta} \cdot \left( \frac{l_{\delta}}{l} \right)^{0,125}, \quad (5)$$

где  $\alpha_{\delta}$  – средний по высоте катушки базовый коэффициент теплоотдачи при базовом размере  $l_{\delta}$  и при базовой температуре  $\Theta_{\delta}$ .

Выражение (5) справедливо для всех высот катушек в пределах от 10 мм до 100 мм [6].

В общем случае, для  $\alpha_{крз}$  с поверхности охлаждения может быть записано

$$\alpha_{крз} = \alpha_{\delta} \cdot \left( \frac{l_{\delta}}{l} \right)^{0,125} \cdot \left( \frac{\Theta}{\Theta_{\delta}} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

Около нагретых горизонтальных поверхностей (например, поверхности 2, 3 на рисунке 1) движение охлаждающего агента имеет характер, в значительной мере зависящий от положения поверхности и ее размеров. Дульнев Г.Н. и Семяшкин Э.М. предлагают в своих работах для горизонтально ориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вверх, КТО увеличить в 1,3 раза относительно базового значения, а для поверхности, обращенной вниз – изменить в 0,7 раза [8].

На рисунке 1 показан эскиз ТММ выполненного на витом магнитопроводе типа ШЛ.

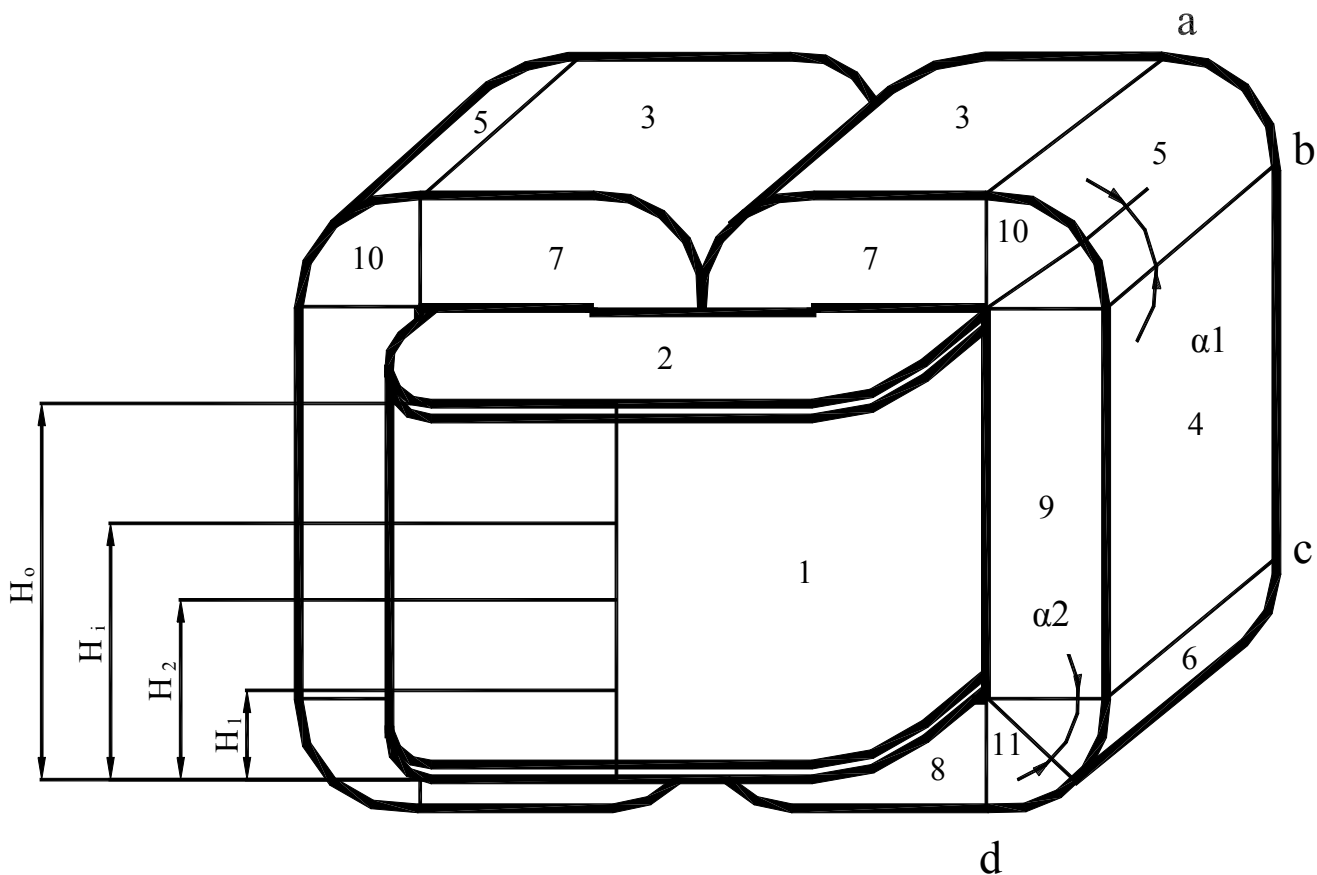


Рисунок 1 – К определению КТО с поверхностями охлаждения

При расчётах поля температуры численными методами, например, методом конечных разностей, можно учесть не только изменение коэффициентов теплоотдачи в зависимости от локальных значений температуры в ячейках сетки на поверхности охлаждения, но и изменение коэффициентов теплоотдачи с вертикальных поверхностей (поверхности 1, 4, 7, 8, 9 и т.д.) по высоте стенки.

Среднее значение функции на отрезке определяется по формуле

$$F_{cp} = \frac{1}{h} \int_0^h f(y) dy . \quad (7)$$

Для определения среднего значения коэффициента теплоотдачи для вертикальной поверхности охлаждения на основании (7) можем записать

$$\alpha_{крес} = \frac{1}{h} \int_0^h \alpha(y) dy. \quad (8)$$

Среднее значение КТО для вертикальной поверхности  $h_1$  (рисунок 1) определится по формуле

$$\alpha_{крес1} = \frac{1}{h_1} \int_0^{h_1} \alpha(y) dy, \quad (9)$$

а для поверхности высотой  $h_2$  по формуле

$$\alpha_{крес2} = \frac{1}{h_2} \int_0^{h_2} \alpha(y) dy. \quad (10)$$

Умножив левую и правую части равенства (10) на  $h_2$ , получим

$$\alpha_{крес} \cdot h_2 = \int_0^{h_2} \alpha(y) dy. \quad (11)$$

Если два значения высоты стенки отличаются на величину  $\Delta h$

$$h_2 = h_1 + \Delta h, \quad (12)$$

то можно записать

$$\int_0^{h_2} \alpha(y) dy = \int_0^{h_1} \alpha(y) dy + \int_{h_1}^{h_1+\Delta h} \alpha(y) dy, \quad (13)$$

или

$$\alpha_{крес2} \cdot h_2 = \alpha_{крес1} \cdot h_1 + \alpha_{крес12} \cdot \Delta h, \quad (14)$$

где  $\alpha_{крес12}$  - среднее значение коэффициента теплоотдачи на вертикальной поверхности между координатами  $y = h_1$  и  $y = h_2$ .

Решая уравнение (14) относительно  $\alpha_{крес12}$  получим

$$\alpha_{\text{крез}12} = (\alpha_{\text{крез}2} \cdot h_2 - \alpha_{\text{крез}1} \cdot h_1) / \Delta h . \quad (15)$$

Заменив коэффициенты теплоотдачи в правой части (15) на их выражения, получим

$$\alpha_{\text{крез}12} = \alpha_{\delta} \cdot (l_{\delta})^{0,125} \cdot [(h_2)^{0,875} - (h_1)^{0,875}] / \Delta h . \quad (16)$$

В общем случае для элемента сетки на вертикальной поверхности можно записать

$$\alpha_{\text{крез}i,i+1} = \alpha_{\delta} \cdot (l_{\delta})^{0,125} \cdot [(h_{i+1})^{0,875} - (h_i)^{0,875}] / \Delta h . \quad (17)$$

Поверхность витого магнитопровода типа ШЛ, имеет участки, например 5 и 6 (рисунок 1), которые являются переходными между вертикальными и горизонтальными поверхностями. На угловых участках магнитопровода конвективная составляющая КТО для плавного перехода от значений КТО горизонтального участка ярма к вертикальному участку корректируется по формуле:

$$\alpha_{yi} = \alpha_{\delta} - (\alpha_{\delta} - \alpha_2) \cdot \sin \alpha_i , \quad (18)$$

где  $\alpha_2$  - конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи с горизонтальной поверхности магнитопровода;

$\alpha_{\delta}$  - конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи с вертикальной поверхности магнитопровода;

$\alpha_i$  - центральный угол от конца вертикальной поверхности бокового ярма до середины ячейки сетки на поверхности углового участка магнитопровода.

Степень черноты  $\varepsilon_1$  в (1) определяется материалом и наличием покрытия поверхности ТММ. По технологии изготовления весь ТММ покрывается лаком, например МЛ-92. Поэтому, не допуская большой погрешности в расчётах, можно принять для всех поверхностей обмотки, каркаса и магнитопровода, примерно, одинаковую степень черноты, равную степени черноты поверхности, покрытой лаком. Некоторые значения  $\varepsilon_1$  приведены в работе [6]. Например, для поверхности, покрытой лаком, при температуре поверхности от  $40^{\circ}\text{C}$  до  $95^{\circ}\text{C}$   $\varepsilon_1$  составляет 0,8-0,9. Для расчётов можно принять среднее значение  $\varepsilon_1 = 0,85$ . Подставив полученные данные в (1) и с учётом (3), получим для лучевой составляющей КТО боковой поверхности обмотки  $\alpha_n \approx 6,555 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Расчёт конвективной составляющей КТО, например, с боковой вертикальной поверхности обмотки выполняется по формуле (2). За базовый размер обмотки ТММ, например, примем высоту  $l_{\delta} = 56 \text{ мм}$ . За базовое

превышение температуры примем  $\Theta_6 = 60^\circ \text{C}$  и  $t_{oc} = 20^\circ \text{C}$ . Приняв среднюю температуру пограничного слоя у вертикальной боковой поверхности обмотки  $50^\circ \text{C}$ , что обычно для ТММ стандартной конструкции [1], получим в (2) для коэффициента  $A_k$  значение  $A_k = 1,3175$ . Тогда расчёт по (2) даёт значение для  $\alpha_{кв} \approx 7,538 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Для результирующего КТО по формуле (1) получим  $\alpha_{рез} = 7,538 + 6,555 = 14,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Рассчитанный коэффициент теплоотдачи является средним по высоте обмотки трансформатора.

Аналогично определяются средние значения КТО с других поверхностей. Для угловых участков магнитопровода коэффициент теплоотдачи определяется по формуле (18). Учесть влияние изменения КТО на вертикальных поверхностях на результаты расчёта поля температуры можно, определив локальные средние, в пределах ячеек сетки, значения  $\alpha_{крэз i, i+1}$  по формуле (17).

#### Список литературы

- 1 Загирняк М.В., Анализ результатов тепловых испытаний и расчёт намагничивающих катушек электромагнитных сепараторов // *Электротехника*/ -1994. 1994. –с. 54-58.
- 2 Логинов В.С., Приближённый расчёт интенсивности теплообмена на поверхности магнитопроводов трансформаторов и бетатронов // *Электротехника*. -1983. №7. –с. 52-55.
- 3 Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. –М.: Энергия, 1973. -320 с.
- 4 Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент // *Справочник/Под общ. ред. Григорьева В.А. и Зорина В.М.* –М. :Энергоатом издат. 1988. – 559 с.
- 5 Фукс Л.Г. Свободная конвекция в нагретой вертикальной щели//*Известия вузов. Энергетика*. -1961. №3.
- 6 Бальян В.С., Трансформаторы для электроники. –М. :Советское радио. 1971. -720 с.:ил.
- 7 Сипайлов Г.А. и др. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчёты в электрических машинах: Учеб. для вузов по спец. «Электрические машины»/Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. –М. :Высш. шк., 1989. –с. 225.
- 8 Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. "Энергия", Л., 1968.;