

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОБМОТОК ДОБАВОЧНЫХ  
СОПРОТИВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Л. С. КОНОВАЛОВА, А. С. ЛЯЛИКОВ

(Представлена прсф. докт. Г. И. Фуксом)

В основу расчета положены уравнения [1]

$$t(r, y) = \frac{q_v}{2\lambda\varepsilon} \left[ -\frac{r^2}{2} r_0^2 \ln r - (\varepsilon - 1)y^2 + \frac{\lambda(R_2^2 - r_0^2)}{\alpha_n R_2} + \frac{R_2^2 - 2r_0^2 \ln R_2}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{3} L^2 \right] + t_{ж}, \quad (1)$$

$$r_0^2 = \frac{R_1 R_2 [2\lambda(\alpha_n R_1 + \alpha_b R_2) + \alpha_b \alpha_n (R_2^2 - R_1^2)]}{2\lambda(\alpha_n R_2 + \alpha_b R_1) + 2\alpha_n \alpha_b R_1 R_2 \ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{3\lambda\alpha_t}{\alpha_t L^2 + 3\lambda L} \left\{ \frac{R_2}{2\alpha_n} \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{R_2} \right)^2 \right] + \frac{R_2^2}{\lambda} \left[ \frac{1}{8} - \frac{1}{8} \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2 - \frac{1}{4} \left( \frac{r_0}{R_2} \right)^2 - \left( \frac{r_0}{R_2} \right)^2 \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2 \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{2 \left[ 1 - \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2 \right]} \right] \right\} + 1. \quad (3)$$

$\varepsilon$  и  $r_0$  могут быть определены из номограмм, которые здесь не приводятся, что значительно облегчает расчет.

Чтобы воспользоваться (1) ÷ (3), необходимо знать эффективные коэффициенты теплоотдачи по поверхностям охлаждения обмотки  $\alpha_n$ ,  $\alpha_b$ ,  $\alpha_t$ . Вычисление  $\alpha_n$ ,  $\alpha_b$ ,  $\alpha_t$  по известным критериальным уравнениям требует знания температур соответствующих поверхностей, которые в поставленной задаче являются искомыми величинами. Обычно такие задачи решаются методом последовательных приближений. Трудоемких операций этого метода можно избежать, если обобщить экспериментальный материал по перегревам поверхностных точек обмотки и обобщенные уравнения использовать для расчета средних перегревов поверхностей обмотки.

Методика проведения эксперимента описана в работе [2]. На 25 образцах катушек добавочных сопротивлений температура измерялась в 6 точках (рис. 1), что позволило найти средние перегревы

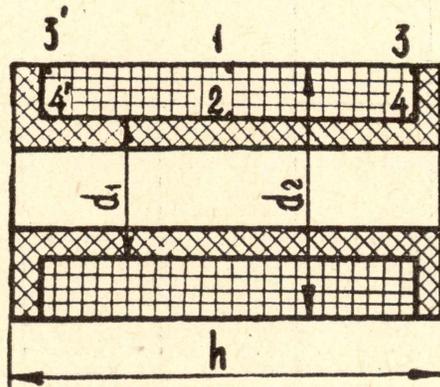


Рис. 1

по наружной, внутренней и торцевым поверхностям охлаждения обмотки

$$\bar{\vartheta}_H = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_3}{2}, \quad \bar{\vartheta}_B = \frac{\vartheta_2 + \vartheta_4}{2}, \quad \bar{\vartheta}_T = \frac{\vartheta_3 + \vartheta_4}{2}.$$

Записав уравнения для  $\bar{\vartheta}_H, \bar{\vartheta}_B, \bar{\vartheta}_T$  согласно (1) в безразмерной форме, получим

$$\frac{1}{Po_H} = \frac{1}{4\varepsilon} \left[ \frac{1}{2Bi_H} \frac{R_2^2 - r_0^2}{L^2} - \frac{1}{3} (\varepsilon - 1) \right], \quad (4)$$

$$\frac{1}{Po_T} = \frac{1}{4\varepsilon} \left[ \frac{1}{2} \frac{R_2^2 - R_1^2}{L^2} + \left( \frac{r_0}{L} \right)^2 \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{Bi_H} \frac{R_2^2 - r_0^2}{L^2} - \frac{4}{3} (\varepsilon - 1) \right], \quad (5)$$

$$\frac{1}{Po_B} = \frac{1}{4\varepsilon} \left[ \frac{R_2^2 - R_1^2}{L^2} + 2 \left( \frac{r_0}{L} \right)^2 \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{Bi_H} \frac{R_2^2 - r_0^2}{L^2} - \frac{1}{3} (\varepsilon - 1) \right], \quad (6)$$

здесь

$$Po_H = \frac{q_v L^2}{\lambda \bar{\vartheta}_H}, \quad Po_B = \frac{q_v L^2}{\lambda \bar{\vartheta}_B}, \quad Po_T = \frac{q_v L^2}{\lambda \bar{\vartheta}_T} - \text{критерии Померанцева,}$$

$$Bi_H = \frac{\alpha_n R_2}{\lambda} - \text{критерий Био.}$$

Численные расчеты показали, что в пределах рассматриваемого экспериментального материала слагаемое правой части уравнений (4) ÷ (6), содержащее  $(\varepsilon - 1)$ , а также слагаемое  $\left( \frac{r_0}{L} \right)^2 \ln \frac{R_1}{R_2}$  относительно невелики, имеют различные знаки и, вследствие этого, не оказывают существенного влияния на результат. Исходя из предположения, что изменение  $\varepsilon$  и  $Bi_H$  мало, а  $r_0$  близко к  $R_1$ , можно ожидать, что критерий  $Po$  является функцией от геометрического комплекса  $\frac{R_2^2 - R_1^2}{L^2}$

$$\text{или} \quad Po \approx f \left( \frac{d_2^2 - d_1^2}{h^2} \right),$$

где

$$d_1 = 2R_1, \quad d_2 = 2R_2, \quad h = 2L.$$

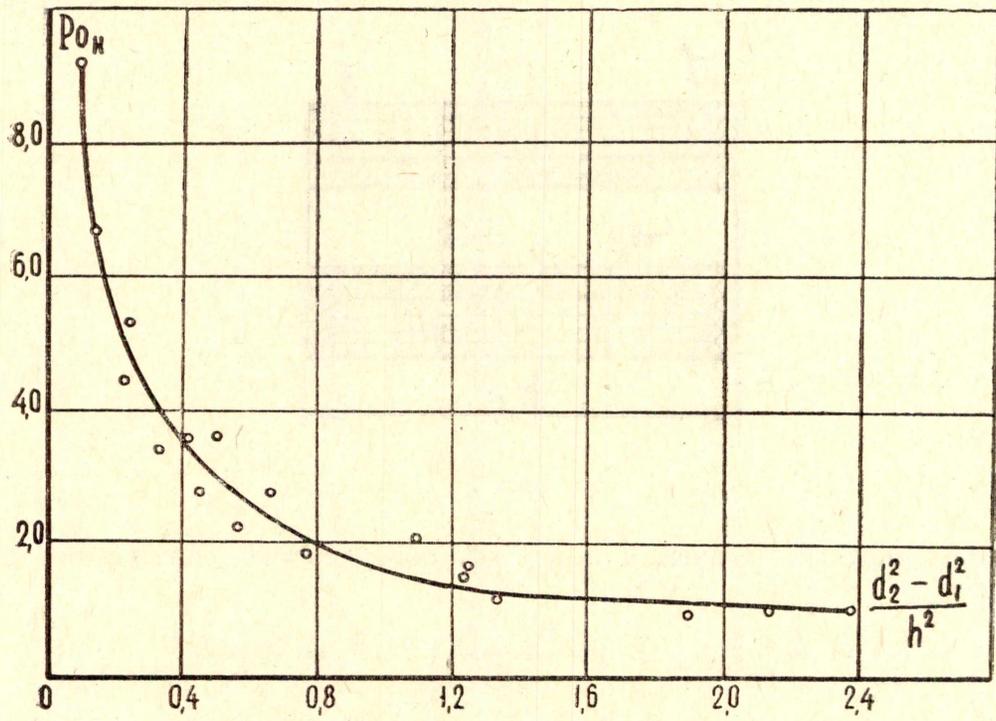


Рис. 2

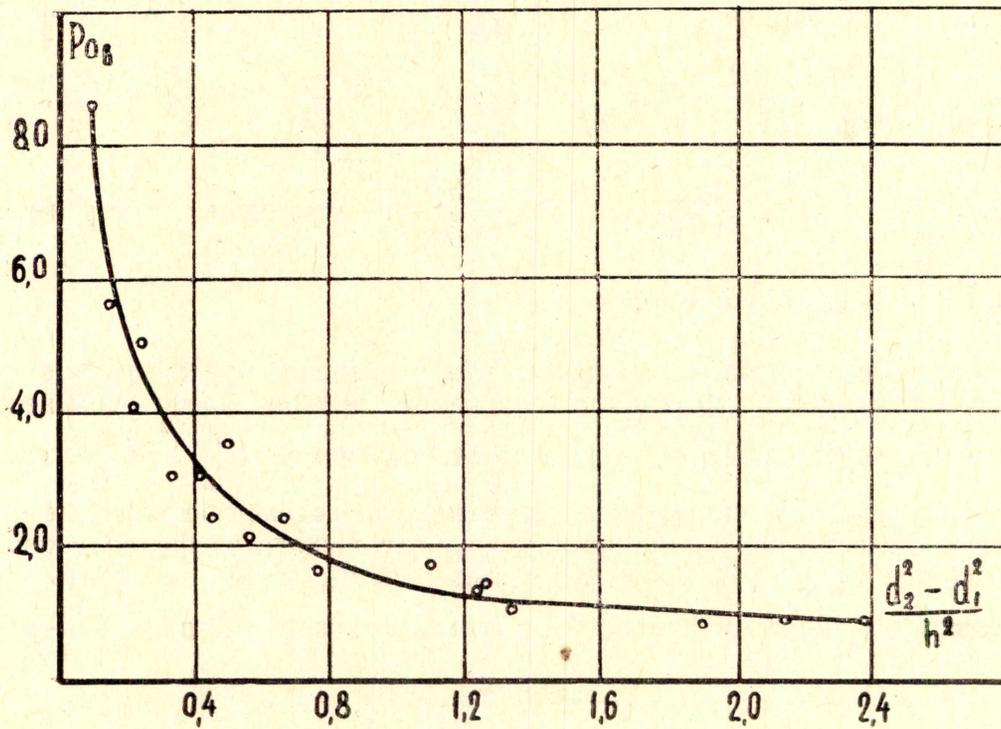


Рис. 3

Из этих соображений для каждой катушки были вычислены  $\frac{d_2^2 - d_1^2}{h^2}$ , а также критерии  $Ro_n$ ,  $Ro_z$ ,  $Ro_r$  для всех температурных режимов, которые затем усреднялись (для любой катушки отклонение среднего критерия  $Ro$  от истинных, вычисленных по наибольшим и наименьшим перегревам, не превышало 2—3%). Результаты вычислений графически представлены на рисунках 2, 3, 4.

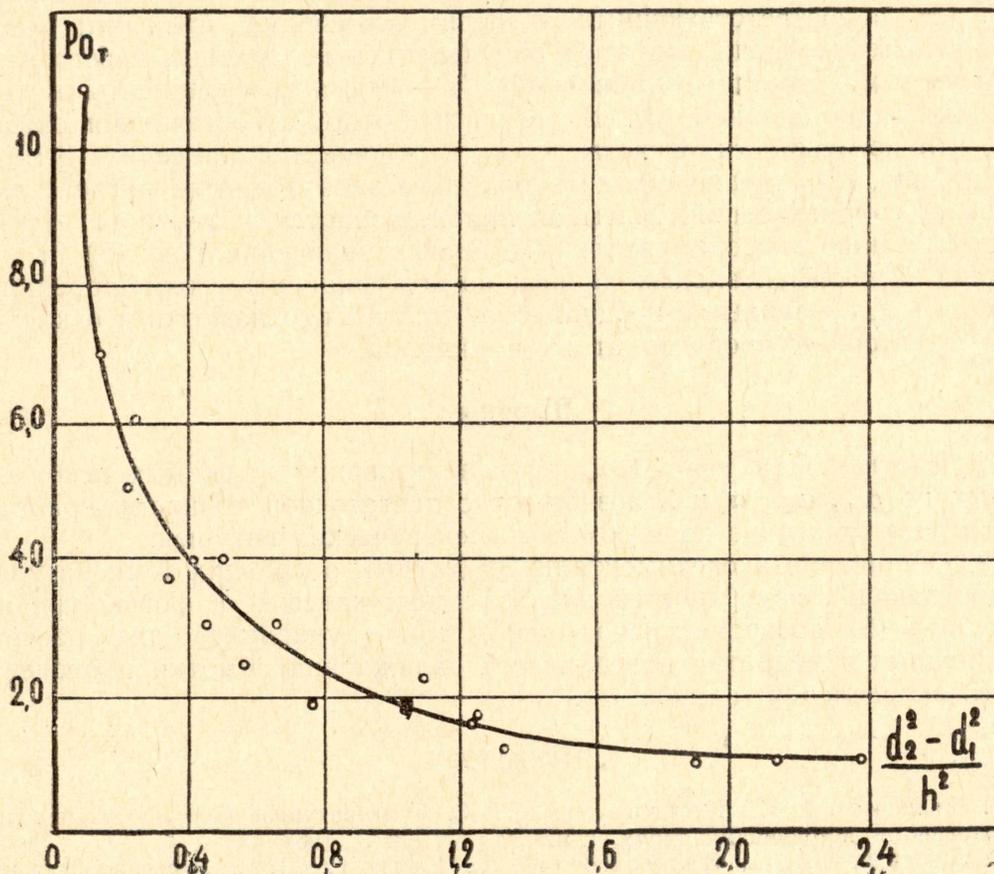


Рис. 4

Уравнения кривых  $Ro \approx f\left(\frac{d_2^2 - d_1^2}{h^2}\right)$ , полученные с помощью ЭЦВМ, имеют вид

$$Ro_n = 1,74 \left(\frac{d_2^2 - d_1^2}{h^2}\right)^{-0,75}, \quad (7)$$

$$Ro_z = 1,56 \left(\frac{d_2^2 - d_1^2}{h^2}\right)^{-0,775}, \quad (8)$$

$$Ro_r = 1,83 \left(\frac{d_2^2 - d_1^2}{h^2}\right)^{-0,8}. \quad (9)$$

Пределы применимости (7) ÷ (9) следующие:

$$0,5 < Ro < 23, \quad 0,033 < \frac{d_2^2 - d_1^2}{h^2} < 4,3.$$

Уравнения (7) ÷ (9) позволяют найти средние перегревы по поверхностям охлаждения катушки и далее по известным критериальным

уравнениям определить конвективную часть  $\alpha_{нк}$ ,  $\alpha_{тк}$ , а также полные значения  $\alpha_n$ , и  $\alpha_t$  с учетом того, что последние представляют сумму лучистой и конвективной составляющих. Тепло, рассеиваемое с внутренней поверхности катушки, вычислится из уравнения баланса

$$Q_v = Q - (Q_n + Q_t), \quad (10)$$

после чего  $\alpha_v$  найдется без затруднений.

Для 15 произвольно выбранных образцов было произведено сравнение перегревов, рассчитанных для точек 1, 2, 3, 4 и по уравнениям (1) ÷ (3), с соответствующими экспериментальными данными; коэффициенты теплоотдачи при этом определялись по средним перегревам, вычисленным с помощью уравнений (7) ÷ (9), а коэффициенты теплопроводности по данным [3]. В результате этого сопоставления оказалось, что погрешности расчета лежат в основном в пределах  $\pm 15\%$ . Естественно, что трудно ожидать более высокой точности расчета для реальных сопротивлений, учитывая приближенность решения (1) ÷ (3), аппроксимацию экспериментальных данных уравнения (7) ÷ (8) и колебания экспериментальных данных по коэффициентам теплопроводности обмоток, связанные с неодинаковой плотностью намотки и отклонением намоточных проводов от их номиналов.

### Выводы

1. Соотношения (1) ÷ (3) при использовании надежных исходных данных по  $\alpha_n$ ,  $\alpha_v$ ,  $\alpha_t$  и  $\lambda$  позволяют с достаточной точностью рассчитывать температурное поле обмоток электрических катушек.

2. Обобщение экспериментальных данных о средних температурах теплоотдающих поверхностей электрических катушек в форме уравнений (7) ÷ (9) позволяет использовать такие уравнения для расчета усредненных температур поверхностей охлаждения обмотки и последующего определения  $\alpha_n$ ,  $\alpha_v$ ,  $\alpha_t$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ляликов А. С., Коновалова Л. С. Температурное поле короткой трубы с внутренними источниками тепла. ИФЖ, т. XV, № 3, 1968.
2. Ляликов А. С., Загромов Ю. А., Ершова Л. С. Экспериментальные данные мощности рассеяния добавочных сопротивлений электроизмерительных приборов (в условиях свободной конвекции). Изв. ТПИ, т. 137, 1965.
3. Коновалова Л. С., Ляликов А. С. Коэффициенты теплопроводности обмоток из проволоки марки ПЭМС. В данном сборнике.