

**СОКРАЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЕРЕГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ
ОБМОТКИ ДОБАВОЧНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ
ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

А. С. ЛЯЛИКОВ, Г. И. ФУКС

Из уравнений стационарного теплообмена добавочного сопротивления (катушки), находящегося в корпусе прибора,

$$P = \alpha'' (t_3 - t_f) F_K'' \quad (1)$$

$$P = \frac{\lambda_K}{\Delta_K} (t_2 - t_3) \frac{F_K' + F_K''}{2} \quad (2)$$

$$P = \frac{\lambda_\partial}{\delta_\partial} (t_1 - t_2) \sqrt{F_1 \cdot F_K'} + \varepsilon C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

или

$$P = (t_1 - t_2) \left(\frac{\lambda_\partial}{\delta_\partial} \sqrt{F_1 \cdot F_K'} + \varepsilon C_0 F_1 \Theta \right) \quad (3)$$

следует

$$t_3 - t_f = \frac{P}{\alpha'' \cdot F_K''} \quad (1')$$

$$t_2 - t_3 = \frac{P}{\frac{\lambda_K}{\Delta_K} \frac{(F_K' + F_K'')}{2}} \quad (2')$$

$$t_1 - t_2 = \frac{P}{\frac{\lambda_\partial}{\delta_\partial} \sqrt{F_1 \cdot F_K'} + \varepsilon C_0 F_1 \Theta} \quad (3')$$

Суммируя правые и левые части и решая относительно P , получим

$$P = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha'' F_K''} + \frac{1}{\frac{\lambda_K}{\Delta_K} \frac{(F_K' + F_K'')}{2}} + \frac{1}{F_K' \left(\frac{\lambda_\partial}{\delta_\partial} \sqrt{\frac{F_1}{F_K'}} + \varepsilon C_0 \frac{F_1}{F_K'} \Theta \right)}} \quad (4)$$

Учитывая, что F_K' и F_K'' близки по величине, можно считать

$$F_K' \approx F_K'' \approx \frac{F_K' + F_K''}{2} = F_{K, \text{ср}}$$

Тогда

$$P = \frac{(t_1 - t_f) F_{к.ср}}{\frac{1}{\alpha''} + \frac{\Delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\frac{\lambda_{\partial}}{\delta_{\partial}} \sqrt{\frac{F_1}{F_k}} + \varepsilon C_0 \frac{F_1}{F_k}} \Theta} = K_{1-f} \cdot \vartheta \cdot F_{к.ср}. \quad (5)$$

Здесь

$$K_{1-} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha''} + \frac{\Delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\frac{\lambda_{\partial}}{\delta_{\partial}} \sqrt{\frac{F_1}{F_k}} + \varepsilon C_0 \frac{F_1}{F_k}} \Theta} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{\alpha''} + \frac{\Delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_{1-к}}} \quad (6)$$

и

$$\alpha_{1-к} = \frac{\lambda_{\partial}}{\delta_{\partial}} \sqrt{\frac{F_1}{F_k}} + \varepsilon C_0 \frac{F_1}{F_k} \Theta. \quad (7)$$

Выражение (6) представляет условный коэффициент теплопередачи для системы катушка-корпус-окружающая среда, выраженный на единицу средней площади корпуса $F_{к.ср}$, а (7) является условным коэффициентом теплоотдачи от катушки к корпусу, отнесенным также к $F_{к.ср}$; $\alpha_{1-к}$ учитывает передачу тепла от катушки к корпусу теплопроводностью, конвекцией и излучением. Обозначение других величин приведено в [1].

Из (5) перегрев поверхности обмотки добавочного сопротивления

$$\vartheta = \frac{P}{K_{1-f} \cdot F_{к.ср}} = \frac{P''_к}{K_{1-f}}, \quad (8)$$

$P''_к$ — удельная мощность на единицу поверхности корпуса.

Вся тяжесть расчета перегрева ложится на определение коэффициента теплопередачи системы K_{1-f} , а по существу на определение условного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{1-к}$, входящего в K_{1-f} .

В связи с этим проанализируем уравнение (7).

А. При $\frac{F_1}{F_k} \rightarrow 0$ (большой корпус и малая катушка) $\alpha_{1-к} \rightarrow 0$, при

этом $K_{1-f} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha''} + \frac{\Delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{0}}$ также $\rightarrow 0$.

Б. При $\frac{F_1}{F_k} \rightarrow 1$ (размеры катушки и корпуса близки)

$$\alpha_{1-к} = \left(\frac{\lambda_{\partial}}{\delta_{\partial}} + \varepsilon C_0 \Theta \right) \rightarrow \infty, \text{ так как } \delta_{\partial} \rightarrow 0.$$

Может показаться, что случай $\alpha_{1-к} \rightarrow \infty$ вообще не может иметь смысла. Здесь уместно отметить, что $\alpha_{1-к}$ как коэффициент теплоотдачи является величиной условной, а $\frac{1}{\alpha_{1-к}}$ как термическое сопротивление переходу тепла от катушки к корпусу имеет реальный смысл.

Тогда и математически и физически стремление $\alpha_{1-k} \rightarrow \infty$ при $\frac{F_1}{F_k} \rightarrow 0$ означает, что термическое сопротивление при передаче тепла от катушки к корпусу стремится к нулю, а следовательно,

$$K_{1-f} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha''} + \frac{\Delta_k}{\lambda_k}}. \quad (9)$$

На основании (9) при $F_1/F_k \rightarrow 1$ коэффициент теплопередачи K_{1-f} с точностью до значения термического сопротивления корпуса $\frac{\Delta_k}{\lambda_k}$ равен коэффициенту теплоотдачи корпуса, уменьшенного до размера катушки, т. е. коэффициенту теплоотдачи катушки в неограниченном объеме

$$K_{1-f} = \alpha'' = \alpha_{\text{кат}} = (\alpha_k + \alpha_{\text{л}})_{\text{кат}}. \quad (10)$$

Это означает, что вместе со значением $\alpha_{1-k} \rightarrow 0$ при $\frac{F_1}{F_k} \rightarrow 1$ термическое сопротивление, а следовательно, и перегрев обмотки ϑ , полностью определяются величиной $\alpha_{\text{кат}}$ в условиях свободной конвекции.

Если воспользоваться диаграммой с двумя ординатами α_{1-k} и α_{1-k} , (K_{1-f}) и абсциссой $\frac{F_1}{F_k}$, то результаты приведенного анализа дают возможность нанести только предельные значения α_{1-k} : при $\frac{F_1}{F_k} \rightarrow 0$ $\alpha_{1-k} \rightarrow 0$ и при $\frac{F_1}{F_k} \rightarrow 1$ $\alpha_{1-k} \rightarrow \infty$ ($K_{1-f} \rightarrow \alpha_{\text{кат}}$) (рис. 1, А и В).

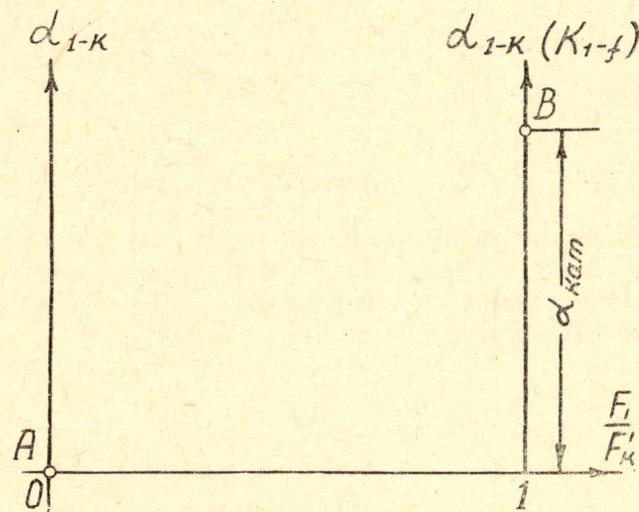


Рис. 1.

Для выяснения характера зависимости $\alpha_{1-k} = f\left(\frac{F_1}{F_k}\right)$ при значениях $\frac{F_1}{F_k}$, отличных от 0 и 1, были проведены опыты по определению перегрева 3 добавочных сопротивлений (8 ПА. 732.022, 8 ПА. 732.024

и 8 ПА.732.032), помещенных в корпус из покрытого черной масляной краской плексигласа толщиной $\Delta_k = 2$ мм с различными $\frac{F_1}{F_k}$. Опыты проводились на 2 режимах для каждой комбинации катушки и корпуса. Схема и методика ведения этих опытов описаны в [1].

По опытным данным были определены значения $K_{1-f} = \left(\frac{P}{\vartheta \cdot F_{k.c.p.}} \right)_{оп}$ и далее из выражения (6) вычислены $\alpha_{1-к}^{оп}$, которые нанесены на графики $\alpha_{1-к} = f\left(\frac{F_1}{F_k}\right)$ (рис. 2, 3 и 4 — кружки). Вместе с этим для условий, соответствующих условиям проведения опытов, произведены вычисления $\alpha_{1-к}$ по уравнению (7), результаты которых также нанесены на рис. 2, 3, 4 (крестики).

Рассмотрение графиков позволяет отметить, что:

а) характер экспериментальной зависимости $\alpha_{1-к} = f\left(\frac{F_1}{F_k}\right)$ хорошо согласуется с видом этой зависимости, полученной расчетом по (7);

б) в области малых значений $\frac{F_1}{F_k}$ имеется заметное отклонение расчетной кривой от экспериментальной, причиной которого может быть изменение характера теплообмена—от теплообмена в замкнутом объеме к теплообмену в неограниченном объеме—и недопустимость в связи с этим расчетов такой области по уравнениям, используемым для расчета теплообмена в замкнутом объеме;

в) наблюдается существенное отклонение расчетной кривой от экспериментальной также при малых щелях между катушкой и корпусом (последние восходящие участки во всех случаях получены при уменьшении щелей до размеров, меньших 5 мм). Но такая плотная компоновка катушек в корпусе практически не применяется;

г) экспериментальные кривые $\alpha_{1-к} = f\left(\frac{F_1}{F_k}\right)$ исходят из начала координат и в области $\frac{F_1}{F_k} < 0,4$ представляют линии, близкие к прямым, которые своим продолжением проходят вблизи предельной точки B с ординатой $\alpha_{кат}$. Наличие такой взаимосвязи между $\alpha_{1-к}$ и теплоотдачей катушки в условиях свободного охлаждения $\alpha_{кат}$ позволяет вычислить $\alpha_{1-к}$ из пропорции

$$\frac{\alpha_{1-к}}{F_1/F_k} = \frac{\alpha_{кат}}{1}, \quad (11)$$

$$\alpha_{1-к} = \frac{F_1}{F_k} \cdot \alpha_{кат},$$

и расчет перегрева поверхности обмотки одиночных добавочных сопротивлений производить методом, сущность которого состоит в следующем:

1. Определяется средний перегрев катушки в условиях свободного охлаждения

$$\vartheta_{св} = \frac{1}{\alpha_{кат}} \cdot \frac{P}{F_1} = \frac{P'_{кат}}{\alpha_{кат}}. \quad (12)$$

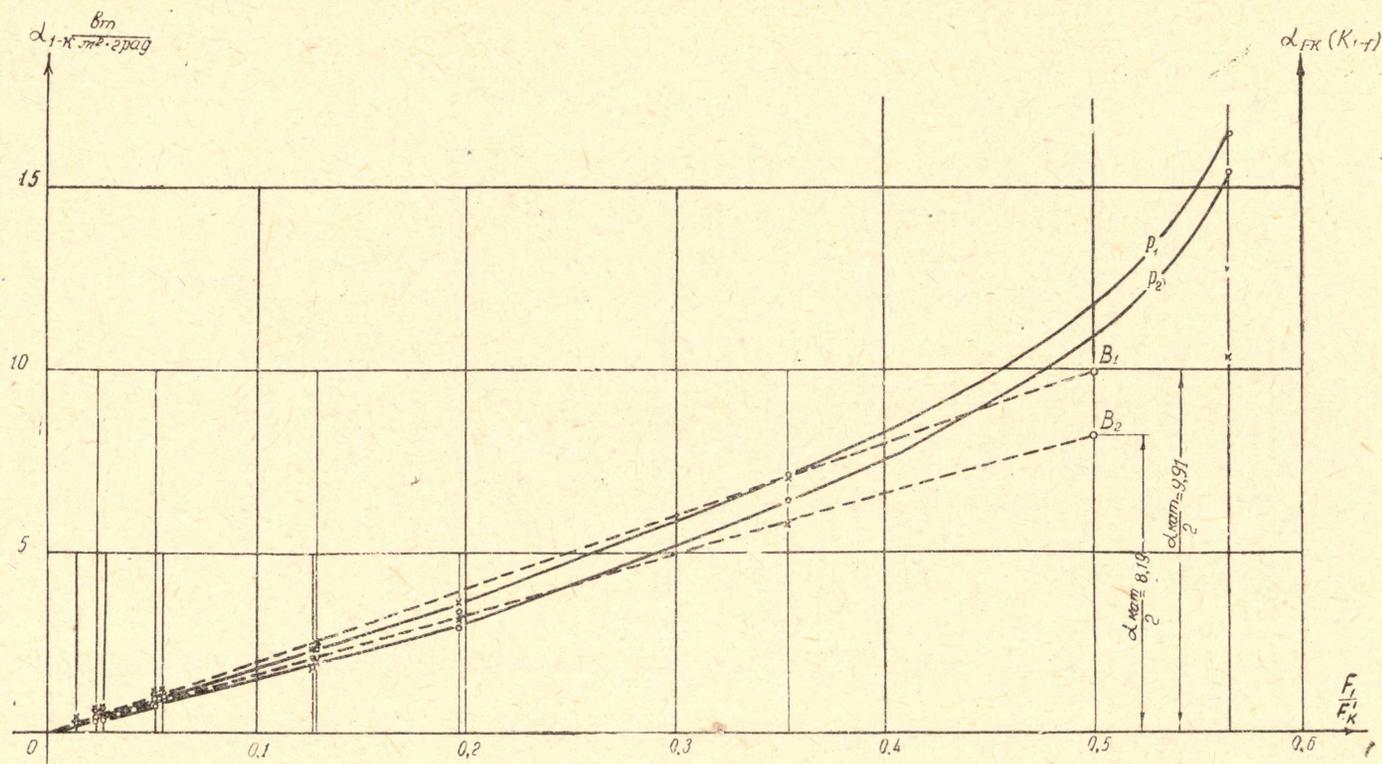


Рис. 2. катушка 8ПА.732.022: $F_1 = 0,597 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; $d_2 = 10 \text{ м.м.}$;
 $P_1 = 0,858 \text{ Вт}$; $\vartheta_{\text{св}} = 72,5^\circ\text{C}$; $\alpha_{\text{кат}} = 19,82 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{град}}$;
 $P_2 = 0,354 \text{ Вт}$; $\vartheta_{\text{св}} = 36,2^\circ\text{C}$; $\alpha_{\text{кат}} = 16,38 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{град}}$.



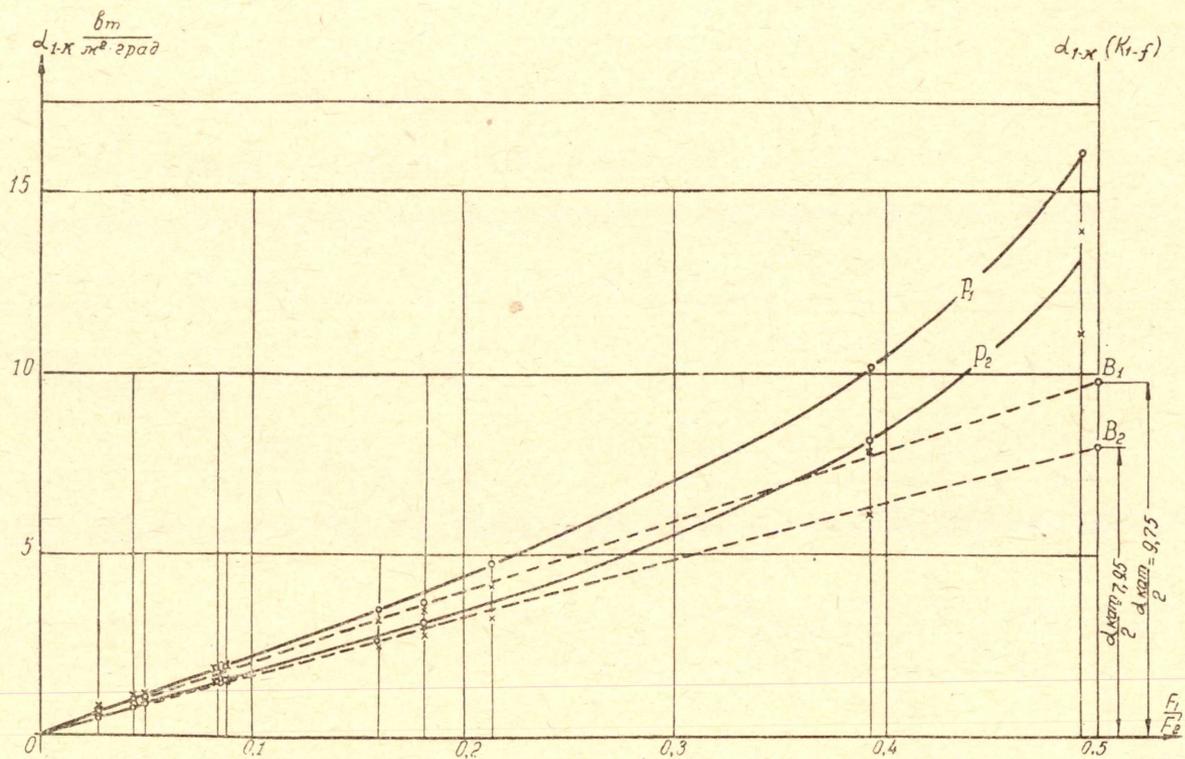


Рис. 3. Катушка 8ПА.732.024: $F_1 = 1,485 \cdot 10^{-3} м^2$; $d_2 = 22 мм$;
 $P_1 = 2,85 вт$; $\vartheta_{св} = 98,1^\circ C$; $\alpha_{кат} = 19,5 \frac{вт}{м^2 \cdot град}$;
 $P_2 = 1,17 вт$; $\vartheta_{св} = 49,4^\circ C$; $\alpha_{кат} = 15,9 \frac{вт}{м^2 \cdot град}$.

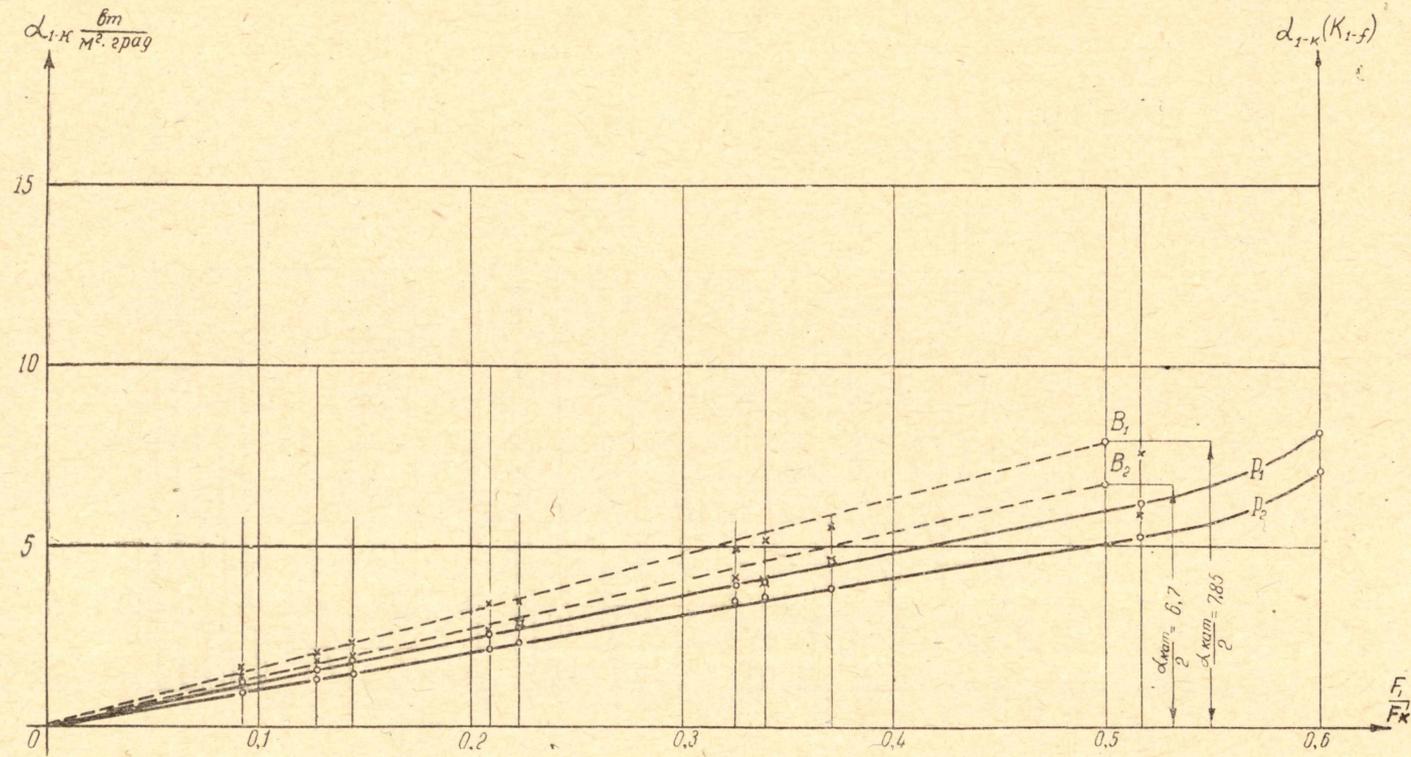


Рис. 4. Катюшка 8ПА.732.032: $F_1 = 7,319 \cdot 10^{-3} м^2$; $d_2 = 37 мм$;

$P_1 = 7,50 Вт$; $\vartheta_{св} = 65^\circ C$; $\alpha_{кат} = 15,7 \frac{Вт}{м^2 град}$;

$P_1 = 3,32 Вт$; $\vartheta_{св} = 34,1^\circ C$; $\alpha_{кат} = 13,4 \frac{Вт}{м^2 град}$.

— по $P'_{\text{кат}}$ и диаметру и обмотки d_2 с помощью номограммы рис. 5
 $\left(P'_{\text{кат}} = \frac{P}{F_1} \right)$ — удельная мощность катушки).

2. По $\vartheta_{\text{св}}$ и $P'_{\text{кат}}$ из (12) вычисляется $\alpha_{\text{кат}}$

$$\alpha_{\text{кат}} = \frac{P'_{\text{кат}}}{\vartheta_{\text{св}}}. \quad (13)$$

3. Находится

$$\alpha_{1-к} = \frac{F_1}{F_к} \alpha_{\text{кат}}.$$

4. Находится перегрев корпуса ϑ_3 с помощью номограммы [1] для корпуса, аналогичной номограмме рис. 5 для катушки—по диа-

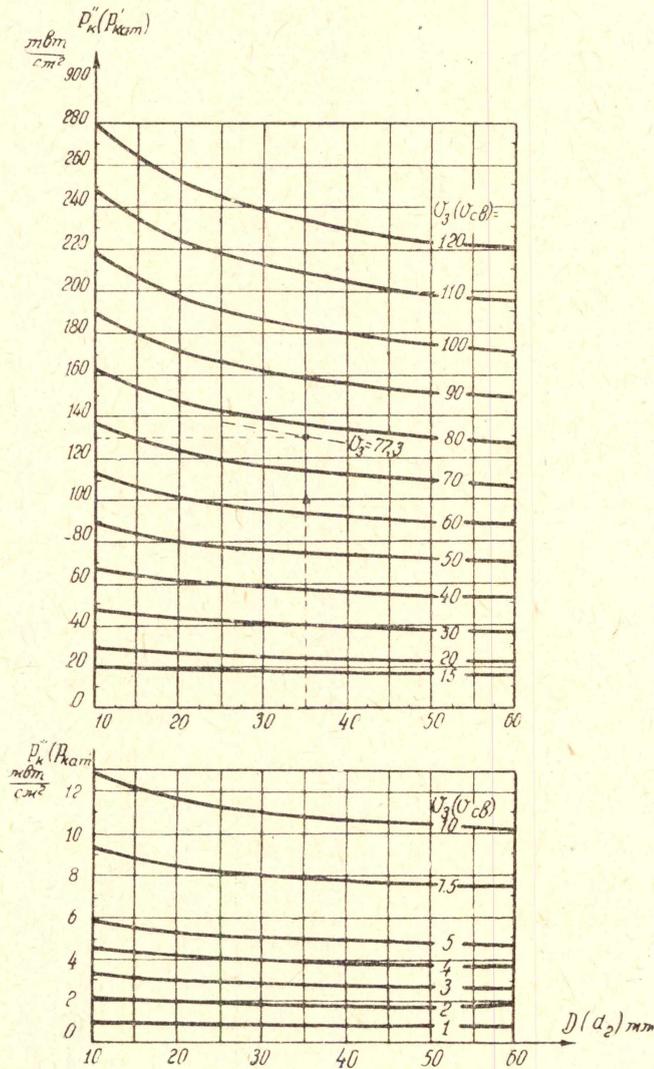


Рис. 5.

метру корпуса D и удельной мощности на корпусе $P''_к = \frac{P}{F_к}$.

5. По ϑ_3 и $P''_к$ вычисляется α''

$$\alpha'' = \frac{P''_к}{\vartheta_3}. \quad (14)$$

6. Определяется условный коэффициент теплопередачи

$$K_{1-f} = \frac{1}{1/\alpha'' + \frac{\Delta_k}{\lambda_k} + 1/\alpha_{1-k}}$$

7. Вычисляется перегрев обмотки

$$\vartheta = \frac{P_k''}{K_{1-f}}, \quad ^\circ\text{C}. \quad (15)$$

Результаты экспериментальной проверки согласования опытных и расчетных перегревов, вычисленных по изложенному методу, приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Расхождение расчетных перегревов с опытными (в %)

Режим	Катушка	8ПА.732.022		8ПА.732.024		8ПА.732.032	
	h, мм	2	50	2	50	2	50
	δ, мм						
I	5	-3,0	-15,2	+17,6	+7,5	-16,7	-17,3
	15	-8,9	-11,5	+6,9	+6,6	-15,5	-15,8
	30	-10,2	-11,2	+11,7	+8,0	-18,0	-15,5
	50	-10,9	-10,5	+13,3	+8,2	-17,0	-15,2
II	5	+8,6	-11,5	+17,0	+8,8	-16,5	-18,5
	15	-5,7	-11,1	+6,7	+3,6	-15,6	-18,2
	30	-6,6	-8,0	+10,4	+5,0	-20,2	-21,2
	50	-7,3	-7,9	+7,7	+4,3	-18,8	-20,0

Для щелей $\delta = 2$ мм результаты не приводятся, так как задача охватить расчетом область щелей $\delta < 5$ мм не ставилась.

I режим по току соответствует перегреву $\vartheta \approx 80^\circ\text{C}$ в условиях свободного охлаждения, II режим — то же, $\vartheta \approx 40^\circ\text{C}$. Катушка 8ПА.732.032 — секционированная.

Из таблицы видно, что сокращенный метод удовлетворительно согласуется с опытными данными.

Более существенные погрешности при расчете перегрева секционированной катушки 8ПА.732.032 и нахождение ошибок для каждой из катушек только в положительной или отрицательной области указывает на необходимость уточнения положения точки $\alpha_{\text{кат}} = (\alpha_k + \alpha_{\text{л}})_{\text{кат}}$

на диаграмме $\alpha_{1-k} = f\left(\frac{F_1}{F_k}\right)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Фукс, А. С. Ляликов. Расчет перегрева поверхности обмотки добавочных сопротивлений электроизмерительных приборов. В настоящем сборнике.