

### НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

И. Д. КУТЯВИН, Д. И. АНДЕРМАН

В практике нередко возникает необходимость изготовления трансформаторов небольшой (порядка нескольких *кВа*) мощности на напряжение до 100 кВ. Такие трансформаторы находят применение в качестве лабораторных и в ряде других случаев. При изготовлении их в единичном количестве наиболее экономичной является масло-барьерная конструкция изоляции. Основное требование при проектировании — минимизация по весу или стоимости активных материалов.

В имеющейся литературе рассматриваются либо трансформаторы мощностью свыше 40 000 *кВа* на класс напряжения 110 кВ [1], либо трансформаторы мощностью до 1 *кВа* на напряжение не выше 36 кВ [2].

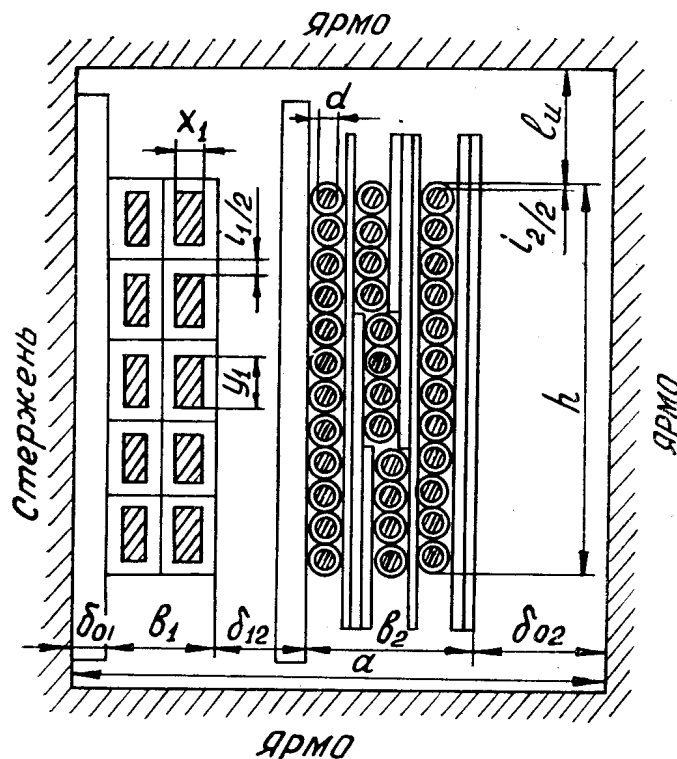


Рис. 1. Эскиз продольного сечения обмоток трансформатора

Нами принята конструкция обмоток, представленная на рис. 1. Каскадная конструкция изоляции вторичной (высоковольтной) обмотки позволяет снизить среднюю толщину междуслойной изоляции  $\delta_{сл. ср}$  и повысить коэффициент заполнения медью как площади вторичной обмотки  $k_{м2}$ , так и всего окна в целом  $k_m$ . При разделении всего слоя на  $n$  каскадов толщина междуслойной изоляции первого каскада должна быть рассчитана на напряжение  $\frac{2U_{сл}}{n}$ , где  $U_{сл}$  — слоевое напряжение; второго каскада  $2 \cdot \frac{2U_{сл}}{n}$ ;  $n$ -го каскада —  $2U_{сл}$ . Средняя толщина междуслойной изоляции рассчитывается на напряжение

$$2U_{сл. ср} = 2U_{сл} \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{1}{n} + 1 \right). \quad (1)$$

При изменении  $n$  от 1 до  $\infty$   $2U_{сл. ср}$  изменяется в диапазоне от  $2U_{сл}$  до  $U_{сл}$ . Наиболее рациональным является разделение слоя на 2—4 каскада. Тогда, воспользовавшись рекомендуемой [1, стр. 153] толщиной межслойной изоляции, можно рекомендовать следующую схему конструкции изоляции.

Таблица 1

Суммарное рабочее напряжение двух слоев обмотки.	Средняя толщина междуслойной изоляции $\delta_{сл. ср}$ , мм	Конструкция изоляции: количество каскадов, число слоев кабельной бумаги на толщину листов, мм
До 1000	0,24	не каскадная: 2×0,12
От 1001 до 2000	0,36	не каскадная: 3×0,12
» 2001 » 3000	0,36	3 каскада: 4×0,12; 3×0,12; 2×0,12
» 3001 » 4000	0,54	2 каскада: 6×0,12; 3×0,12
» 4001 » 4500	0,6	3 каскада: 7×0,12; 5×0,12; 3×0,12
» 4501 » 5500	0,72	3 каскада: 9×0,12; 6×0,12; 3×0,12

При аппроксимации  $\delta_{сл. ср}$  ( $2U_{сл}$ ) получаем прямую

$$\delta_{сл. ср} = 0,15 + 10^{-4} \cdot 2U_{сл} (\text{мм}).$$

Выразим веса активных материалов через размеры трансформатора (рис. 1). Вес стали магнитопровода

$$G_c = \gamma_c \cdot q_c \cdot \{h + 2l_u + k_{уя} \cdot [h + 2l_u + D + 2(r + a)]\}, \quad (2)$$

где

$q_c$  — площадь сечения сердечника

$$q_c = k_c \cdot \frac{\pi D^2}{4};$$

$D$  — диаметр окружности, описанной около ступенчатого стержня;

$k_c = k_{кр} \cdot k_{зс}$  — коэффициент заполнения сталью площади этой окружности, равный произведению коэффициентов межлистовой изоляции  $k_{зс}$  и коэффициента формы сечения стержня  $k_{кр}$  [1];

$h$  — высота обмоток,

$l_u$  — изоляционный промежуток,

$k_{уя}$  — коэффициент усиления яра,

$a$  — ширина окна  $a = \delta_{01} + \delta_{12} + \delta_2 + \delta_{02}$ ;

$b_1$  и  $b_2$  — радиальная ширина обмоток

$$b_1 = n_1(x_1 + i_1),$$

$$\theta_2 = n_2(p + i_2 + \delta_{\text{сл. ср}}) \cdot k_{\text{в}2},$$

$n_1, n_2$  — число слоев, соответственно, первичной и вторичной обмоток,

$k_{\text{в}2}$  — коэффициент выпучивания вторичной обмотки [2],

$r$  — толщина ярма, которую, при ширине ярма  $\tau$ , можем определить из равенства

$$k_{\text{зс}} \cdot \tau \cdot r = 0,5 \cdot k_{\text{уя}} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot k_{\text{зс}} \cdot k_{\text{кр}},$$

откуда

$$r = 0,125 \cdot k_{\text{уя}} \cdot k_{\text{кр}} \cdot \frac{\pi D^2}{\tau}.$$

Вес меди первичной обмотки

$$G_{\text{м}1} = \gamma_{\text{м}} \cdot \pi D_{\text{ср}1} \cdot h \cdot \theta_1 \cdot k_{\text{м}1}, \quad (3)$$

вторичной

$$G_{\text{м}2} = \gamma_{\text{м}} \cdot \pi D_{\text{ср}2} \cdot h \cdot \theta_2 \cdot k_{\text{м}2}, \quad (4)$$

где

$D_{\text{ср}1}, D_{\text{ср}2}$  — средняя длина витков первичной и вторичной обмоток:

$$D_{\text{ср}1} = D + 2\delta_{01} + \theta_1,$$

$$D_{\text{ср}2} = D + 2\delta_{01} + 2\theta_1 + 2\delta_{12} + \theta_2;$$

$k_{\text{м}1}$  и  $k_{\text{м}2}$  — коэффициенты заполнения медью площади первичной и вторичной обмоток:

$$k_{\text{м}1} = \frac{I_1}{\Delta_1(y_1 + i_1)(x_1 + i_1)k_{\text{у}1}},$$

$$k_{\text{м}2} = \frac{I_2}{\Delta_2 \cdot (d + i_2)(d + i_2 + \delta_{\text{сл. ср}})k_{\text{у}2} \cdot k_{\text{в}2}},$$

$I_1$  и  $I_2$  — первичный и вторичный токи;

$\Delta_1$  и  $\Delta_2$  — плотности тока в обмотках;

$k_{\text{у}1}$  и  $k_{\text{у}2}$  — коэффициенты укладки обмоток [1, 2].

Стоимость активных материалов

$$C_{\text{а}} = \alpha G_{\text{с}} + \beta G_{\text{м}}. \quad (5)$$

Значения  $\alpha$  и  $\beta$  имеются в [1].

Из полученных выражений для весов активных материалов и их стоимости видно, что трансформатор будет спроектирован наилучшим образом при оптимальных значениях величин

$$D, h, x_1, y_1, d, n_1, n_2, \Delta_1 \text{ и } \Delta_2,$$

соответствующих минимуму веса либо стоимости активных материалов. Перечисленные величины будем называть переменными. Функциональную связь переменных с техническими характеристиками зададим через «физические ограничения»:

1. Мощность трансформатора

$$S = KD^2h \cdot \frac{\Delta_1 \cdot x_1 \cdot y_1 \cdot n_1}{(y_1 + i_1) \cdot k_{\text{у}1}}, \quad (6)$$

где

$$K = 1,11\pi \cdot B \cdot f \cdot k_{\text{с}} \cdot 10^{-4}.$$

2. Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_{\text{р}} = \frac{7,92 \cdot f \cdot S \cdot \pi \cdot D_{12} \cdot \delta_{\text{д}} \cdot k_{\text{R}} \cdot 10^{-8}}{hu_{\text{в}}^2}, \quad (7)$$

где

$$D_{12} = D + 2\delta_{01} + 2\delta_1 + \delta_{12},$$

$$\delta_p = \frac{\delta_{12}D_{12} + D_{cp1} \cdot \frac{\delta_1}{3} + D_{cp2} \cdot \frac{\delta_2}{3}}{D_{12}},$$

$$U_B = KD^2,$$

$k_R$  — коэффициент Роговского.

3. Допустимая плотность теплового потока с внешней поверхности обмотки НН.

$$\sigma_1 = \frac{\rho_M \cdot \Delta_1 \cdot I_1 \cdot n_1}{(y_1 + i_1) \cdot k_{y1} \cdot k_{p1}}, \quad (8)$$

где

$k_{p1}$  — коэффициент покрытия поверхности обмотки рейками и другими изоляционными деталями.

То же с поверхности обмотки ВН:

$$\sigma_2 = \frac{\rho_M \cdot \Delta_2 \cdot n_2 \cdot I_2}{k_{p2} \cdot k_{y2} \cdot (d + i_2)}. \quad (9)$$

4. Равенство намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток

$$\frac{I_1 \cdot n_1}{(y_1 + i_1) k_{y1}} = \frac{I_2 \cdot n_2}{(d + i_2) \cdot k_{y2}}. \quad (10)$$

5. Токи в обмотках связаны с размерами проводов соотношениями:

$$I_1 = \Delta_1 \cdot x_1 \cdot y_1, \quad (11)$$

$$I_2 = \Delta_2 \cdot \frac{\pi d^2}{4}. \quad (12)$$

Используя приведенные семь уравнений (6) — (12), можно исключить семь переменных, одну из них, а именно  $n_1$ , можно принять в качестве исходной величины. Тогда оптимизация функций веса, стоимости активных материалов и суммарных потерь сведется к минимизации их по одной независимой переменной, в качестве которой выбрана плотность тока  $\Delta_1$ . Кроме того, желательно исследование зависимости функций  $G$ ,  $C_a$  и  $\Sigma P$  от реактивной составляющей напряжения короткого замыкания. В связи с этим минимизация функций проведена одновременно по обоим переменным  $\Delta_1$  и  $U_p$ .

Исследовался диапазон мощностей от 1,6 до 160 кВа при изменении  $\Delta_1$ , в пределах от 1,6 до 2,6 а/мм<sup>2</sup> и  $u_p$  от 4 до 40%.

Влияние изменения  $u_p$  и  $\Delta_1$  на вес трансформатора мощностью 16,2 кВа, стоимость активных материалов и суммарные потери представлено на рис. 2. Минимум веса наблюдается при  $u_p = 8\%$ ,  $\Delta_1 = 2$  а/мм<sup>2</sup> минимум стоимости активных материалов при  $u_p = 4\%$  и  $\Delta_1 = 2,2$  а/мм<sup>2</sup> и минимум суммарных потерь при  $u_p = 6\%$  и  $\Delta_1 = 1,6$  а/мм<sup>2</sup>. При увеличении мощности минимум веса, стоимости активных материалов и потерь смещается в сторону меньших  $u_p$  при этом оптимальная плотность тока уменьшается (рис. 3).

В близком к оптимальному по весу и стоимости материалов варианте получены следующие размеры трансформатора мощностью 16,2 кВа:  $D = 8,408$  см;  $h = 70,9$  см;  $x_1 = 3,378$  мм;  $y_1 = 9,08$  мм;  $d = 0,265$  мм;  $b_1 = 0,7756$  см;  $b_2 = 3,8$  см,  $\Delta_2 = 3,2$  а/мм<sup>2</sup> при  $u_p = 6\%$ ,  $\Delta_1 = 2,4$  а/мм<sup>2</sup>. Вес стали 75,01 кг, вес меди 30,59 кг, потери в меди 611 Вт, в стали 108 Вт. Отметим, что при  $u_p = 10\%$  возможно спроектировать трансформатор приблизительно такого же веса и с такими же потерями, как в

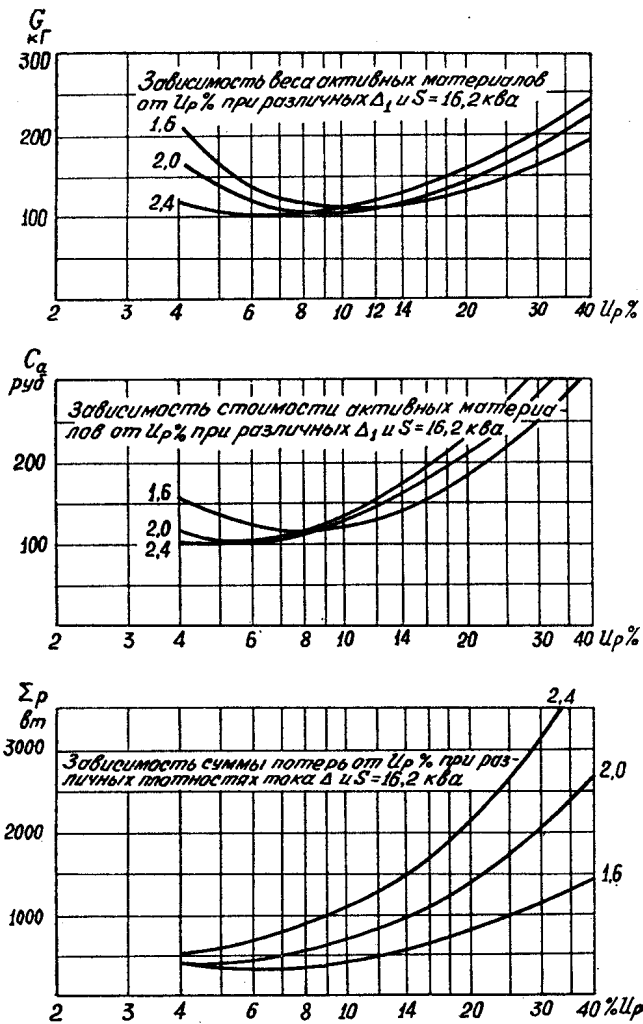


Рис. 2

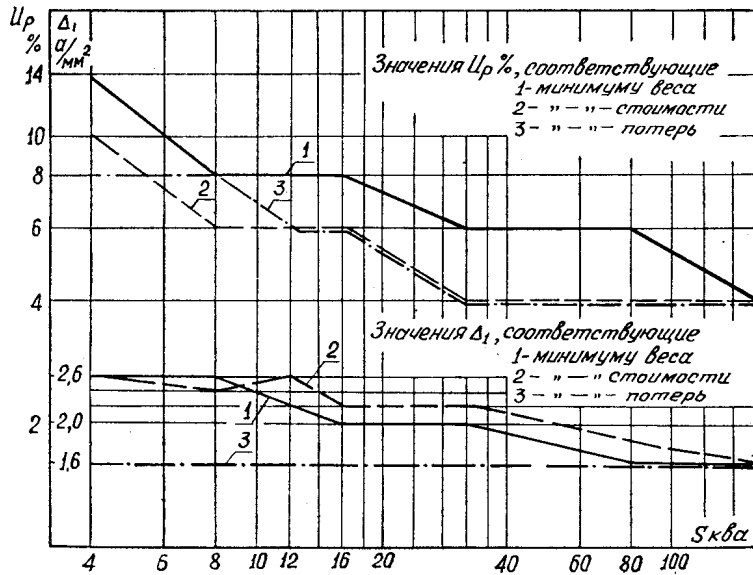


Рис. 3. Величины  $U_p$  и  $\Delta_1$ , соответствующие минимуму веса, стоимости активных материалов и суммарных потерь при изменении мощности

приведенном варианте, но стоимость активных материалов при этом на 20% выше за счет увеличения веса меди.

В расчете нами были приняты исходные данные:  $B = 1,5$  тл;  $k_{зс} = 0,93$ ;  $k_{кр} = 0,908$ ;  $n_1 = 2$ ;  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,1$  вт/см<sup>2</sup>;  $k_{р1} = 0,75$ ;  $k_{р2} = 1$ ;  $k_{у1} = 1,05$ ;  $k_{у2} = 1,05$ ;  $\kappa_{в2} = 1,12$ ;  $l_u = 4$  см;  $\sigma_{01} = 0,8$  см;  $\sigma_{12} = 2$  см, при  $\sigma_2 \geq 3$  см и  $\sigma_{12} = 5 - \sigma_2$  при  $\sigma_2 < 3$  см;  $\sigma_{02} = 6$  см;  $k_R = 0,94$ ;  $k_{уя} = 1,1$ ;  $i_1 = 0,05$  см;  $i_2 = 0,009$  см.

На основании проведенных исследований можно сделать выводы:

1) оптимальное значение напряжения короткого замыкания для трансформаторов малой мощности напряжением порядка 100 кВ зависит от мощности и увеличивается с ее уменьшением;

2) оптимальная плотность тока при увеличении мощности несколько снижается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П. М. Тихомиров. Расчет трансформаторов. Изд. «Энергия», М., 1968.
2. И. И. Белопольский, Л. Г. Пикалова. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Госэнергоиздат, 1963.