

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].

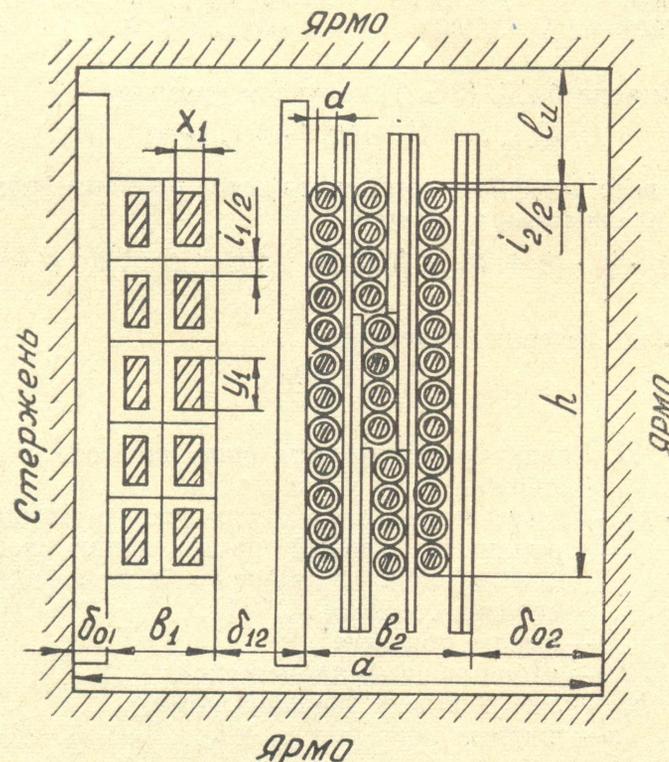


Рис. 1. Эскиз продольного сечения обмоток трансформатора

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 $k_{м}$. 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 ∞ $2U_{сл. ср}$ 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 ярма,

a — ширина окна $a = \delta_{01} + \nu_1 + \delta_{12} + \nu_2 + \delta_{02}$;

b_1 и b_2 — радиальная ширина обмоток

$$\nu_1 = n_1(x_1 + i_1),$$

$$v_2 = n_2(p + i_2 + \delta_{\text{сл. ср}}) \cdot k_{\text{в}2},$$

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 τ , 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

$$G_{\text{м}1} = \gamma_{\text{м}} \cdot \pi D_{\text{ср}1} \cdot h \cdot v_1 \cdot k_{\text{м}1}, \quad (3)$$

вторичной

$$G_{\text{м}2} = \gamma_{\text{м}} \cdot \pi D_{\text{ср}2} \cdot h \cdot v_2 \cdot k_{\text{м}2}, \quad (4)$$

где

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

$$D_{\text{ср}1} = D + 2\delta_{01} + v_1,$$

$$D_{\text{ср}2} = D + 2\delta_{01} + 2v_1 + 2\delta_{12} + v_2;$$

$k_{\text{м}1}$ 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;

Δ_1 и Δ_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 α и β 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 Δ_1 . Кроме того, желательное исследование зависимости функций G , C_a и ΣP от реактивной составляющей напряжения короткого замыкания. В связи с этим минимизация функций проведена одновременно по обоим переменным Δ_1 и U_p .

Исследовался диапазон мощностей от 1,6 до 160 кВА при изменении Δ_1 , в пределах от 1,6 до 2,6 а/мм² и u_p от 4 до 40%.

Влияние изменения u_p и Δ_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/мм² минимум стоимости активных материалов при $u_p = 4\%$ и $\Delta_1 = 2,2$ а/мм² и минимум суммарных потерь при $u_p = 6\%$ и $\Delta_1 = 1,6$ а/мм². 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/мм² при $u_p = 6\%$, $\Delta_1 = 2,4$ а/мм². 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

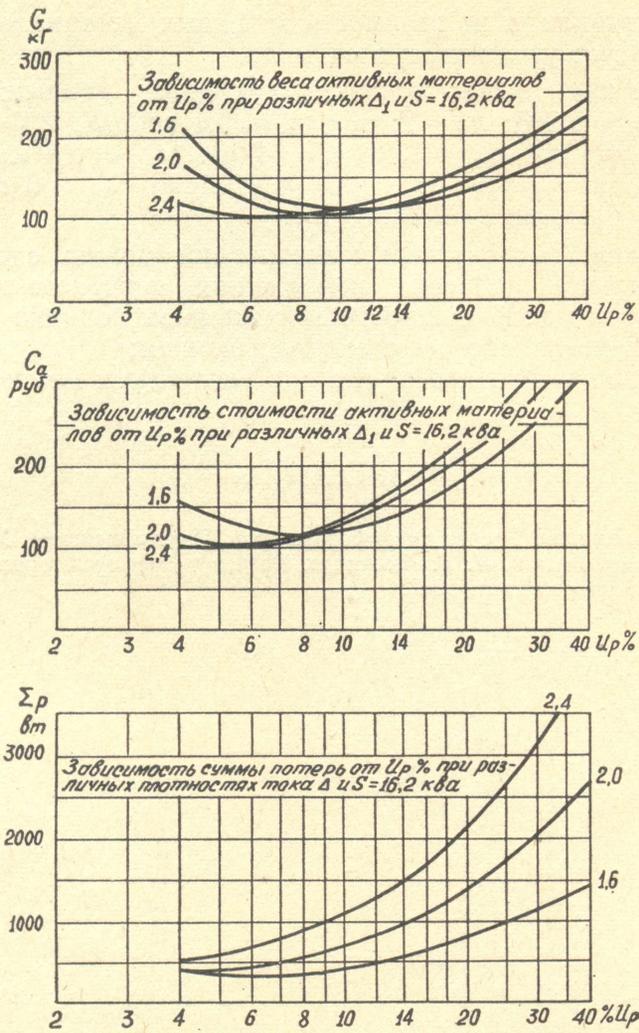


Рис. 2

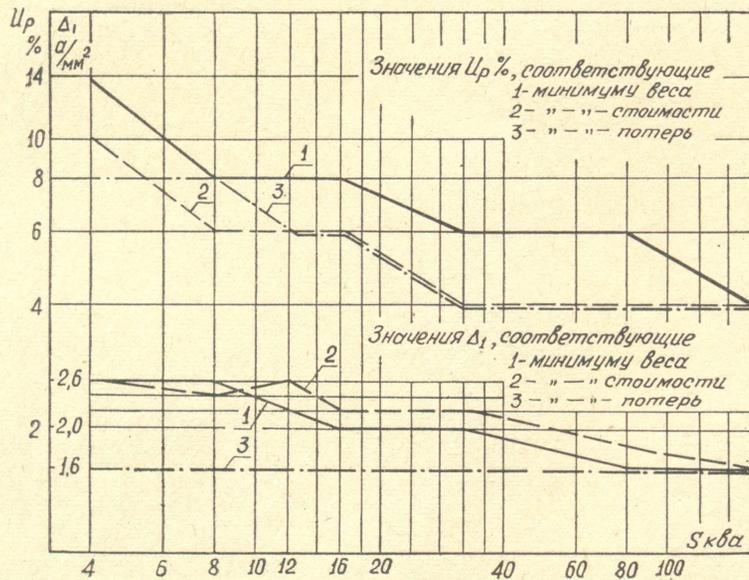


Рис. 3. Величины U_p и Δ_1 , соответствующие минимуму веса, стоимости активных материалов и суммарных потерь при изменении мощности

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

В расчете нами были приняты исходные данные: $B = 1,5 \text{ тл}$; $k_{зс} = 0,93$; $k_{кр} = 0,908$; $n_1 = 2$; $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,1 \text{ вт/см}^2$; $k_{р1} = 0,75$; $k_{р2} = 1$; $k_{у1} = 1,05$; $k_{у2} = 1,05$; $\kappa_{в2} = 1,12$; $l_u = 4 \text{ см}$; $\sigma_{01} = 0,8 \text{ см}$; $\sigma_{12} = 2 \text{ см}$, при $v_2 \geq 3 \text{ см}$ и $\sigma_{12} = 5 - v_2$ при $v_2 < 3 \text{ см}$; $\sigma_{02} = 6 \text{ см}$; $k_R = 0,94$; $k_{уя} = 1,1$; $i_1 = 0,05 \text{ см}$; $i_2 = 0,009 \text{ см}$.

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.