

## К РАСЧЕТУ МОЩНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С РУЛОННОЙ ОБМОТКОЙ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

И. Д. КУТЯВИН, С. А. СТЕПАНОВ

В статье рассматривается вопрос оптимизации размеров и параметров силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторов на минимум расчетных затрат при условии минимума добавочных потерь в меди от вихревых токов, вызванных осевой составляющей поля рассеяния. Вопрос решается применительно к трансформаторам V габарита с рулонной обмоткой низшего (НН) и многослойной обмоткой высшего напряжений (ВН). Обмотка НН выполняется из рулонной меди или алюминия, причем ширина ленты равна высоте обмотки  $h$ . Витковая изоляция обмотки НН может выполняться путем нанесения полиимидного слоя на боковые поверхности ленты или с помощью сплошной прокладки между витками из полимерной пленки.

В качестве оптимизируемой переменной величины принято число слоев обмотки НН  $m_1$ .

Основные соотношения, необходимые для решения задачи.

Номинальные токи в обмотках

$$I_{н1} = z_1 h \Delta_1, \quad I_{н2} = n_2 z_2 y_2 \Delta_2, \quad (1)$$

где  $z_1, z_2$  — радиальные толщины меди элементарных проводников обмоток;

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

$n_2$  — число элементарных параллельных проводников в обмотке ВН;

$y_2$  — осевая высота элементарного проводника обмотки ВН.

Намагничивающие силы на единицу высоты обмоток

$$\varphi_1 = p_1 z_1 m_1 \Delta_1, \quad \varphi_2 = p_2 z_2 m_2 \Delta_2 \frac{y_2}{y_2 + i_2}, \quad (2)$$

где  $p_1$  — число витков в слое обмотки НН;

$p_2$  — число рядов элементарного проводника в обмотке ВН;

$m_2$  — число слоев обмотки ВН;

$i_2$  — толщина изоляции на две стороны проводника обмотки ВН.

$\varphi_1 = \varphi_2$  для равновысоких обмоток.

Числа витков обмоток

$$N_1 = p_1 m_1, \quad N_2 = \frac{h m_2}{n_2 (y_2 + i_2)}. \quad (3)$$

Уравнения теплового баланса слоя обмоток на один сантиметр среднего витка:

$$2 k_{п1} q_1 h = \rho k_{\partial 1} \Delta_1^2 z_1 p_1 h; \quad 2 k_{п2} q_2 y_2 = \rho k_{\partial 2} \Delta_2^2 z_2 y_2 p_2, \quad (4)$$

где  $k_{п1}$ ,  $k_{п2}$  — коэффициенты закрытия поверхностей обмоток изолирующими конструкциями;

$q_1$ ,  $q_2$  — удельные теплоотдачи поверхностей обмоток;

$\rho$  — расчетное удельное сопротивление материала обмоток;

$k_{\partial 1}$ ,  $k_{\partial 2}$  — коэффициенты, учитывающие добавочные потери в меди обмоток от вихревых токов.

Из уравнений (4) можно найти плотности тока в обмотках:

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1}{k_{\partial 1} p_1 z_1}}; \quad \alpha_1 = \frac{2 k_{п1} q_1}{\rho}; \quad \Delta_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2}{k_{\partial 2} p_2 z_2}}; \quad \alpha_2 = \frac{2 k_{п2} q_2}{\rho}. \quad (5)$$

Оптимальные толщины меди слоев обмоток [2]:

$$x_{10} = p_1 z_1 = \sqrt{\frac{1,73}{c_1 m_1}}; \quad x_{20} = p_2 z_2 = \sqrt{\frac{1,73(y_2 + i_2)}{c_1 m_2 y_2}}; \quad c_1 = \frac{\pi f \mu_0}{\rho}, \quad (6)$$

где  $f$  — частота тока,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$  гн/см.

В [1] получена оптимальная зависимость

$$i_3 = \frac{(z_2 + i_3)^2 (2z_2 - i_3)}{3(x_2 + i_3)^2}, \quad (7)$$

которая дает связь между переменными  $p_2$  и  $z_2$ . После некоторых преобразований получим

$$3 p_2^2 = 3 \frac{(x_2 + i_3)^2}{(z_2 + i_3)^2} = \frac{2z_2 - i_3}{i_3}; \quad k_{\partial 2} = 1 + \frac{1}{3 p_2^2} = \frac{2z_2}{2z_2 - i_3}, \quad (8)$$

где  $i_3$  — изоляция на две стороны элементарного проводника обмотки ВН.

Из выражений (2) и (6) с учетом (5) и (8) определим отношение

$$\frac{m_2 y_2}{y_2 + i_2} = \varphi \sqrt[4]{\frac{12 i_3}{\alpha_2^2 (2z_2 - i_3)^2}} = \frac{3\sqrt{3} \cdot i_3}{c z_2^2 (2z_2 - i_3)}. \quad (9)$$

После некоторого упрощения (9) и замены  $v_2 = \frac{z_2}{i_3}$  получим

$$\sqrt[4]{v_2^4 (v_2 - 1)^{0,5}} = u_2 = \sqrt[4]{\frac{2z\alpha_2}{2\sqrt{3}\varphi^2 c_1^2 i_3^3}}. \quad (10)$$

Выражение (10) можно заменить расчетной кривой  $u_2 = f(v_2)$ , показанной на рис. 1. Тогда, определяя  $u_2$  из правой части (10), по расчетной кривой найдем  $v_2$  и вычислим  $z_2 = v_2 i_3$ . Для того чтобы спрямить расчетную кривую, из правой и левой частей (10) извлечем корень четвертой степени.

В качестве примера приведен расчет силового трехфазного трансформатора мощностью 250 МВА с напряжениями 15, 75/115 кВ с рунной обмоткой НН и многослойной обмоткой ВН.

Исходные данные для расчета (размеры в сантиметрах).  
 $i_1=i_3=0,01$  — толщина изоляции элементарных проводников на две стороны;  $i_2=0,2$  — дополнительная изоляция для  $p_2$  проводников обмотки ВН;

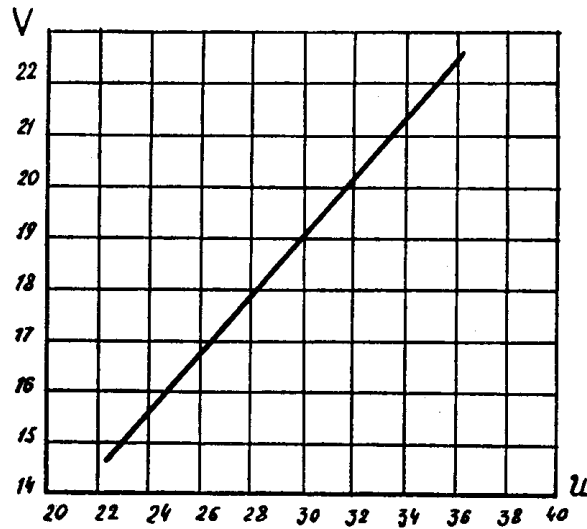


Рис. 1. Расчетная зависимость  $U=f(V)$ .

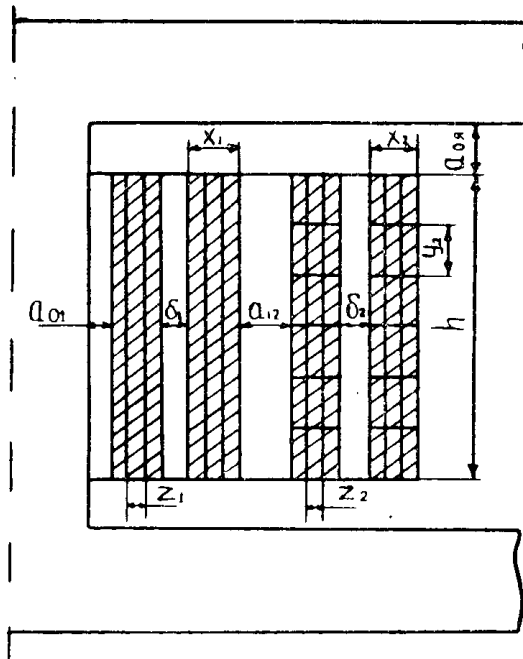


Рис. 2. Элемент обмоток трансформатора.

$\delta_2=0,8$  и  $\delta_2=2,4$  — радиальные размеры осевых охлаждающих каналов обмоток;

$a_{12}=5$ ,  $a_{01}=3$ ,  $a_{02}=8$ ,  $a_{22}=6$  — расстояния главной изоляции;

$U_p=10,5\%$  — реактивная составляющая напряжения к. з.;

$k_c=0,85$  — коэффициент заполнения сталью поперечного сечения сердечника;

$B_c=1,65$  ТЛ — расчетная индукция в стержне;

$k_p=0,95$  — коэффициент Роговского;

| Расчетное выражение  | 4     | 5     | 6     | 7     |
|--|-------|-------|-------|-------|
| $m_1$  |       |       |       |       |
| $x_1(с.м)$   | 0,695 | 0,621 | 0,567 | 0,526 |
| $\Delta_1 \left( \frac{A}{с.м^2} \right)$  | 459   | 484   | 506   | 526   |
| $z_2(с.м)$   | 0,193 | 0,181 | 0,169 | 0,161 |
| $x_2(с.м)$   | 0,58  | 0,543 | 0,507 | 0,483 |
| $\Delta_2 \left( \frac{A}{с.м^2} \right)$  | 492   | 506   | 525   | 540   |
| $y_2(с.м)$   | 4,4   | 4,59  | 4,8   | 4,84  |
| $m_2$  | 5     | 6     | 7     | 8     |
| $m_1 x_1 + (m_1 - 1) \delta_1 = a_1(с.м)$  | 5,18  | 6,3   | 7,4   | 8,48  |
| $m_2 x_2 + (m_2 - 1) \delta_2 = a_2(с.м)$  | 12,5  | 15,3  | 18    | 20,7  |
| $\frac{\varphi a_p'}{2p} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4pa_0}{\varphi a_p}} \right) = d(с.м)$                     | 80    | 100   | 125   | 150   |
| $k_c \frac{\pi d^2}{4} = Q_c(\partial.м^2)$  | 42,6  | 66,7  | 104   | 150   |
| $\frac{U_{H1} \cdot 10^4}{222 B_c Q_c} = N_1(\text{ВИТК.})$  | 100   | 65    | 42    | 28    |
| $\frac{U_{H2} \cdot 10^4}{222 \sqrt{3} B_c Q_c} = N_2(\text{ВИТК.})$   | 476   | 274   | 177   | 121   |
| $\frac{I_{H1} N_1}{\sqrt{3} \varphi_1} = h(с.м)$   | 470   | 232   | 128   | 83,3  |
| $\frac{N_1}{m_1} = p_1$  | 25    | 13    | 7     | 4     |
| $\frac{x_1}{p_1} = z_1(с.м)$   | 0,028 | 0,048 | 0,081 | 0,132 |
| $p_1 m_1 z_1 h = Q_{M1}(с.м^2)$  | 1310  | 717   | 436   | 306   |
| $h \frac{m_2 x_2 y_2}{y_2 + i_2} = Q_{M2}(с.м^2)$  | 1300  | 717   | 441   | 309   |
| $3 \cdot \gamma_M \pi d_2 Q_{M2} 10^{-3} = G_{M2}(м)$  | 10    | 6,76  | 5,05  | 4,22  |
| $3 \cdot \gamma_M \pi d_1 Q_{M1} 10^{-3} = G_{M1}(м)$  | 12,8  | 8,7   | 6,25  | 5,25  |
| $G_{M2} + G_{M1} = G_M(м)$   | 22,8  | 15,5  | 11,3  | 9,47  |
| $\gamma_c Q_c t_c 10^{-3} = G_c(м)$  | 72    | 83,5  | 119   | 177   |
| $G_M + G_c = G_a(м)$   | 94,8  | 99    | 130   | 187   |
| $c + \beta G_M = G_n(м)$   | 152   | 138   | 158   | 212   |
| $4,9 \gamma_c Q_c d 10^{-3} = G_{cy}(м)$   | 13    | 25,5  | 49,6  | 86    |
| $k_{\partial c} \alpha_c (G_c + 0,93 G_{cy}) = P_c(\kappa Bт)$   | 135   | 171   | 264   | 410   |
| $\frac{\rho}{\gamma_M} (k_{\partial 1} \Delta_1^2 G_{M1} + k_{\partial 2} \Delta_2^2 G_{M2}) = P_M(\kappa Bт)$ | 1320  | 960   | 756   | 682   |
| $t \cdot p_c + \tau \cdot p_M S_*^2 = W \cdot 10^3(\kappa Bт \cdot час)$                                       | 6,47  | 5,35  | 5,33  | 6,3   |
| $3_{Ta} + 3_c + 3_n = 3(\text{тыс. руб.})$   | 104   | 87,9  | 91,2  | 113   |

$\gamma_m = 8,9 \frac{г}{см^3}$ ,  $\gamma_c = 7,8 \frac{г}{см^3}$  — удельные веса меди и стали;  
 $\beta = 3,5$ ,  $k_T = 1,3 \frac{руб}{кг}$ ,  $p_{II} = 0,125$ ,  $p_a = 0,06$ ,  $Z_{ик} = 212 \frac{руб}{кВт}$ ,  
 $k_m = 0,9$ ,  $Z'_{yэ} = Z''_{yэ} = 6 \frac{руб \cdot 10^{-3}}{кВт \cdot час}$ ,  $S_*^2 = 0,8$  — технико-экономические коэффициенты;  
 $k_{дс} = 1,093$  — коэффициент добавочных потерь в стали;  
 $\alpha_c = 1,46 \frac{Вт}{кг}$  — удельные потери в стали;  
 $t = 8760$  час,  $\tau = 500$  час — число часов использования трансформатора и число часов потерь в год;  
 $p_2 = 3$  — число рядов элементарного проводника в обмотке ВН;  
 $k_1 = 1$ ,  $k_{д2} = 1,037$  — коэффициенты добавочных потерь.  
 В приведенном расчете не учитывалась дискретность размеров проводникового материала.

### Выводы

1. Вариация числа слоев обмотки НН  $m_1$  в широком диапазоне нецелесообразна. При  $8 < m_1 < 5$  высота трансформатора и диаметр сердечника достигают нетехнологических размеров.
2. Минимум расчетных затрат соответствует  $m_1 = 5$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Д. Кутявин. Проектирование обмоток трансформаторов с минимальными потерями в меди. «Электротехника», 1969, № 7.
2. Dietrich W., Auslegung von Transformatorenwicklungen mit kleinsten Wirkwiderstand, Elektrotechn, 1965, № 6.