

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА  
МОЩНОСТЬЮ 100 МВА С РУЛОННОЙ ОБМОТКОЙ  
НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**

И. Д. КУТЯВИН, Г. А. СТАРОВОЙТОВА

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций)

В статье рассматриваются вопросы оптимизации размеров и параметров мощных печных трансформаторов с рулонной обмоткой низшего напряжения (НН) и многослойной обмоткой высшего напряжения (ВН). Мощность трансформатора 100 МВА, напряжения 115/0,75 кВ, соединение обмоток  $\lambda/\Delta$ , регулирование напряжения обмотки НН путем изменения числа слоев обмотки в пределах 100—200%.

Обмотка НН располагается снаружи и выполняется из рулонной голы меди в виде спирали в два слоя ( $p_1=2$ ). Ширина ленты равна высоте обмотки  $h$ . Межвитковая изоляция выполняется изоляционными рейками, создающими осевые охлаждающие каналы шириной  $\delta_1=0,8$  см. Число слоев этой обмотки  $m_1$  равно числу витков  $N_1$ .

Обмотка ВН располагается внутри обмотки НН и выполняется многослойной, сложным проводом, состоящим из  $p_2$  параллельных элементарных прямоугольных проводников с эмалевой изоляцией толщиной на две стороны, равной  $i_3=0,01$ . На пучок  $p_2$  проводов наложена дополнительная бумажная изоляция толщиной на две стороны, равной  $i_2=0,2$ . Осевой размер меди элементарного проводника  $y_2$  и радиальный —  $z_2$ . Регулирование вторичного напряжения производится изменением числа включенных слоев обмотки ВН со стороны канала рассеяния. В связи с этим ширина канала рассеяния изменяется, изменяется и реактивная составляющая напряжения короткого замыкания (н.к.з.)  $U_p$  (табл. 2).

Для численной оптимизации размеров и параметров рассматриваемого трансформатора использованы основные соотношения, полученные в [1, 2], а результаты оптимизации приведены в табл. 1.

Исходные данные (размеры в сантиметрах):  $a_{02}=5$ ;  $a_{21}=5$ ;  $a_{11}=6$ ;  $a_{0я}=8$ ;

$i_1=0,01$ ;  $i_2=0,2$ ;  $\delta_1=0,8$ ;  $\delta_2=2,4$ ;  $K_c=0,85$ ;  $K_p=0,95$ ;  $K_T=1,3$ ;  $K_M=0,9$ ;

$K_{п}=0,8$ ;  $K_{дс}=1,093$ ;  $K_{д1}=1,0833$ ;  $\rho=2,14 \cdot 10^{-6}$  Ом/см;  $\gamma_m=8,9 \frac{2}{\text{см}^3}$ ;

$\gamma_c=7,65 \frac{2}{\text{см}^3}$ ;  $V_c=1,65$  Т л;  $\alpha_c=1,46$ ;  $p_n=0,125$ ;

$p_a=0,06$ ;  $Z_{ук}=212$  руб/кВт;  $Z'_{уэ}=6,6$  руб/кВт·час;  $Z''_{уэ}=7,3$  руб/кВт·час;  $q_1=q_2=0,3$  Вт/см<sup>2</sup>;  $\alpha_1=\alpha_2=22,4 \cdot 10^4$ ;  $T_{max}=6000$  час;  $\tau=4600$  час;

$t=8760$  час;  $\beta=3,5$

Таблица 1

№ п. п.	Число слоев обмотки НН	$m_1=N_1$	2	3	4	5	6
1	$x_{10} = \sqrt{\frac{1,73}{CN_1}}$	см	0,970	0,791	0,685	0,613	0,559
2	$d = \sqrt{\frac{4 Q_c}{N_1}}$	см	125	100	90	80	71
3	$Q_{сд} = K_c \frac{\pi d^2}{4}$	см <sup>2</sup>	10450	6680	5410	4270	3370
4	$\Delta_1 = \frac{454}{\sqrt{x_{10}}}$	А/см <sup>2</sup>	461	510	549	580	607
5	$h = \frac{I_{Н1}}{x_{10} \Delta_1}$	см	100	110	118	125	130
6	$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi = N_1 x_{10} \Delta_1$	А/см	895	1210	1505	1780	2040
7	$z_2 = V \cdot i_2$	см	0,247	0,216	0,195	0,182	0,171
8	$p_2 = \sqrt{\frac{2V-1}{3}}$	шт	4	4	4	3	3
9	$x_{20} = p_2 z_2$	см	0,988	0,864	0,780	0,546	0,513
10	$\Delta_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2}{K_{д2} x_{20}}}$	А/см <sup>2</sup>	471	504	530	634	650
11	$y_2 = \frac{I_{Н2}}{x_{20} \Delta_2}$	см	1,08	1,15	1,22	1,45	1,50
12	$m_2 = \frac{N_2(y_2 + i_2) K_y}{h}$	шт	2	3	4	5	6
13	$G_{M1} = 3 \gamma_M \cdot 10^{-6} \cdot \pi Q_{M1} d_1$	т	2,77	3,45	4,38	5,15	5,90
14	$G_{M2} = 3 \gamma_M \cdot 10^{-6} \cdot \pi Q_{M2} d_2$	т	2,05	2,60	3,17	3,00	3,37
15	$G_M = G_{M1} + 2G_{M2}$	т	6,87	8,64	10,72	11,06	12,70
16	$G_c = \gamma_c \cdot 10^{-6} Q_c d$	т	109	71	59	43	35
17	$G_{cy} = 4,9 \gamma_c \cdot 10^{-6} Q_c d$	т	39,2	27,5	24,0	20,0	16,5
18	$G_a = G_c + G_M$	т	115,9	79,7	69,6	54,0	47,7
19	$G_{\Pi} = G_c + \beta G_M$	т	133,0	101,3	96,0	81,7	79,5
20	$P_c = K_{дс} \alpha_c (G_c + 0,93 G_{cy})$	кВт	237	158	133	101	83
21	$P_M = \frac{\rho}{\gamma_M} (K_{д1} \Delta_1^2 G_{M1} + K_{д2} \Delta_2^2 G_{M2})$	кВт	267	396	562	748	920
22	$W = t P_c + K_M \tau P_M S_x^2$	тыс. кВт. час	3090	3020	3490	3973	4525
23	$\mathcal{Z}_{та} = K_T (p_H + p_a) G_{\Pi}$	тыс. руб.	32,0	24,4	23,0	19,7	19,1
24	$\mathcal{Z}_c = \mathcal{Z}_{уК} p_H (P_c + K_M P_M S_x^2)$	тыс. руб.	12,6	13,6	16,9	20,5	24,1
25	$\mathcal{Z}_{\Pi} = \mathcal{Z}_{у3} P_c t + \mathcal{Z}_{у3} \tau P_M S_x^2$	тыс. руб.	22,7	22,4	26,6	30,9	35,7
26	$\mathcal{Z}_p = \mathcal{Z}_{та} + \mathcal{Z}_c + \mathcal{Z}_{\Pi}$	тыс. руб.	67,3	60,4	66,5	71,1	78,9

При вычислении данных таблицы за независимую переменную принято число витков обмотки НН  $N_1$ , равное числу слоев этой обмотки  $m_1$ , которое варьировалось в пределах 2÷6. Радиальная толщина меди слоя  $x_{10}$  (оптимальная) определялась по выражению (21) [1] при  $y_1 = h$  и  $i_1 = 0$ . По известному числу витков  $N_1$  и номинальному напря-

жению обмотки НН находится диаметр стержня  $d$ , который округляется до нормализованной величины. После этого вычисляется уточненная площадь сечения стали стержня  $Q_{ст}$ . Плотность тока  $\Delta_1$  находилась из выражения (1—28) [2]. Затем вычислялась высота обмотки  $h$ , удельная намагничивающая сила  $\varphi_1 = \varphi_2$  (для равновысоких обмоток) и число витков обмотки ВН —  $N_2$ .

Для определения размеров элементарных проводников обмотки ВН использована зависимость (26) [1]:

$$3i_3(x_{20} + i_3)^2 = (z_2 + i_3)^2(2z_2 - i_3), \quad (1)$$

где  $x_{20}$  — оптимальная радиальная толщина меди слоя обмотки ВН, состоящая из  $p_2$  элементарных проводников радиальной толщиной  $z_2$ , так что

$$x_{20} \cong p_2 z_2; \quad 3p_2^2 = \frac{2z_2 - i_3}{i_3}; \quad K_{д2} = \frac{2z_2}{2z_2 - i_3}; \quad i_3 = 0; \quad (2)$$

Для определения  $x_{20}$  можно использовать выражение (21) [1]

$$x_{20} = \sqrt{\frac{1,73(y_2 + i_2)}{c m_2 y_2}}. \quad (3)$$

Тепловой баланс слоя обмотки ВН высотой  $y_2$  на один погонный сантиметр

$$2K_{п} y_2 q_2 = \rho K_{д2} \Delta_2^2 x_{20} y_2. \quad (4)$$

Плотность тока в обмотке ВН

$$\Delta_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2}{K_{д2} x_{20}}}; \quad \alpha_2 = \frac{2K_{п} q_2}{\rho}. \quad (5)$$

Удельная намагничивающая сила обмотки ВН с учетом (5)

$$\varphi_2 = \frac{m_2 x_{20} y_2 \Delta_2}{y_2 + i_2} = \frac{m_2 y_2}{y_2 + i_2} \sqrt{\frac{\alpha_2 x_{20}}{K_{д2}}}. \quad (6)$$

Определим из (3) и (6) отношение

$$\frac{m_2 y_2}{y_2 + i_2} = \frac{\sqrt{3}}{c x_{20}^2} = \varphi_2 \sqrt{\frac{K_{д2}}{\alpha_2 x_{20}}}; \quad x_{20} = \sqrt[3]{\frac{3\alpha_2}{K_{д2} c^2 \varphi_2^2}}. \quad (7)$$

Возведем в квадрат обе части равенства (7), учтем соотношения (2) и введем новую переменную  $V = \frac{z_2}{i_3}$ . Тогда получим из (7)

$$V^2(2V - 1)^{1/4} = U = \frac{3}{c i_3 \varphi_2} \sqrt{\frac{V \sqrt{3} \alpha_2}{2 i_3}}. \quad (8)$$

На рисунке построена зависимость  $U(V)$ , которую можно использовать для вычисления  $z_2$   $p_2$ . Для этого из правой части (8) находится  $U$  и по кривой рис. 1 определяется  $V$ , а затем можно вычислить значения  $z_2$ ,  $p_2$ ,  $x_{20}$ ,  $K_{д2}$  и  $\Delta_2$ . Выражения для  $y_2$  и  $m_2$  приведены в таблице. Но  $m_2$  — число слоев нерегулируемой части обмотки ВН. Если желательно, чтобы напряжение обмотки НН регулировалось в два раза (от

$U_{н1}$  до  $0,5 U_{н1}$ ) при номинальном токе, то число слоев обмотки ВН должно составлять  $2m_2 = m_2^1$ . При этом сечение провода регулировочных слоев может быть понижено с учетом протекающего по ним тока. Определяются радиальные ширины сечений обмоток:

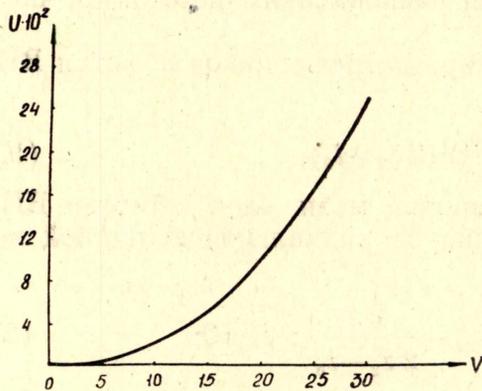


Рис. 1. Расчетная зависимость  $u = f(v)$ .

$$a_1 = N_1 x_{10} + (N_1 - 1) \delta_1;$$

$$a_2 = m_2' x_{20} + (m_2' - 1) \delta_2; \quad (9)$$

средние диаметры обмоток

$$d_2 = d + 2a_{02} + a_2;$$

$$d_1 = d_2 + a_2 + 2a_{21} + a_1; \quad (10)$$

средний диаметр канала рассеяния

$$d_{12} = d + 2a_{02} + 2a_2 + a_{21}; \quad (11)$$

ширина окна сердечника

$$a = 2(a_{02} + a_2 + a_{21} + a_1 + 0,5a_{11}); \quad (12)$$

площади сечений обмоток

$$Q_{м1} = x_{10} h N_1; \quad Q_{м2} = \frac{m_2' x_{20} y_2}{y_2 + i_2} h. \quad (13)$$

Формулы для определения весов меди и стали, потерь в них и расчетных затрат приведены в табл. 1. Наиболее выгодным оказался вариант с трехвитковой рулонной обмоткой НН. Расчетные затраты для этого варианта составляют 60,4 тыс. руб.

Таблица 2

№ п/п.	Число включенных слоев обмотки ВН при регулировании		4	5	6	7	8
1	Ток в обмотке ВН . . . . .	$I_2$	500	400	333	286	250
2	Число витков в обмотке ВН . . .	$N_2$	354	442	530	620	708
3	Число рядов провода в регулировочных слоях . . . . .	$p_2$	4	3	3	2	2
4	Радиальная толщина меди слоев	$x_2$	0,780	0,585	0,585	0,390	0,390
5	Средний диаметр обмотки ВН . . .	$d_2$	110,3	113,3	116,3	119,1	121,9
6	Средний диаметр обмотки НН . . .	$d_1$	158,9	158,9	158,9	158,9	158,9
7	Средний диаметр канала рассеяния . . . . .	$d_{21}$	137,2	140,2	143,2	146,0	148,8
8	Ширина приведенного канала рассеяния . . . . .	$a_p$	21,4	19,1	16,9	14,9	12,8
9	Напряжение к. з. . . . .	$U_p$	0,264	0,240	0,217	0,196	0,172
10	Ширина канала рассеяния . . . .	$a_{21}$	16,6	13,6	10,6	7,8	5,0

Изменение тока, числа витков обмотки ВН и других величин при регулировании напряжения обмотки НН переключением числа слоев обмотки ВН для варианта с четырехвитковой рулонной обмоткой показано в табл. 2. При включении в цепь ВН первых четырех слоев напряжение к. з. составляет 26,4% и при включении всех слоев — 17,2%.

#### ЛИТЕРАТУРА

- И. Д. Кутявин. Проектирование обмоток трансформаторов с минимальными потерями в меди. «Электротехника», 1969, № 7.
- И. Д. Кутявин и др. Некоторые вопросы оптимизации геометрии и параметров трансформаторов и автотрансформаторов. ТПИ, 1970.