

**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 λ/Δ , регулирование напряжения обмотки НН путем изменения числа слоев обмотки в пределах 100—200%.

Обмотка НН располагается снаружи и выполняется из рулонной голый 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): $a_{02}=5$; $a_{21}=5$; $a_{11}=6$; $a_{0я}=8$;

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

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

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

$p_a=0,06$; $Z_{ук}=212$ руб/кВт; $Z'_{y3}=6,6$ руб/кВт·час; $Z''_{y3}=7,3$ руб/кВт·час; $q_1=q_2=0,3$ Вт/см²; $\alpha_1=\alpha_2=22,4 \cdot 10^4$; $T_{\max}=6000$ 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 ²	10450	6680	5410	4270	3370
4	$\Delta_1 = \frac{454}{\sqrt{x_{10}}}$	А/см ²	461	510	549	580	607
5	$h = \frac{I_{H1}}{x_{10} \Delta_1}$	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 ²	471	504	530	634	650
11	$y_2 = \frac{I_{H2}}{x_{20} \Delta_2}$	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	$G_c = \gamma_c \cdot 10^{-6} Q_c l_c$	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	$\mathcal{Z}_c = \mathcal{Z}_{yc} p_H (P_c + K_M P_M S_X^2)$	тыс. руб.	12,6	13,6	16,9	20,5	24,1
25	$\mathcal{Z}_{\Pi} = \mathcal{Z}'_{y\beta} P_c t + \mathcal{Z}''_{y\beta} \tau P_M S_X^2$	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 Δ_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]:

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

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

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

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

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

Плотность тока в обмотке ВН

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

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)

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

На рисунке построена зависимость $U(V)$, которую можно использовать для вычисления z_2 и 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 Δ_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:

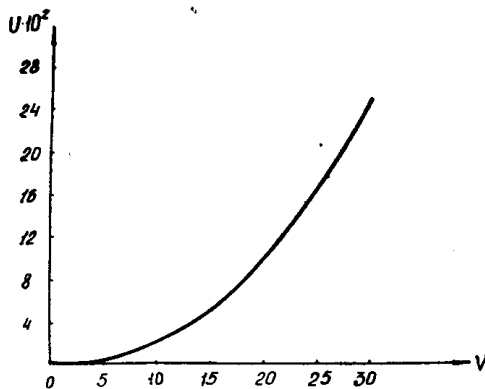


Рис. 1. Расчетная зависимость $u = f(v)$.

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

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

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.