

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОФАЗНЫХ
ТРЕХОБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

И. Д. КУТЯВИН, В. П. КРАСНОВ, Г. В. ДЕЛЬ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций и сетей)

В настоящей работе приводятся результаты минимизации выражения расчетных затрат [1], использованного для трехобмоточных трансформаторов. На рис. 1 показано расположение обмоток в окне сердечника

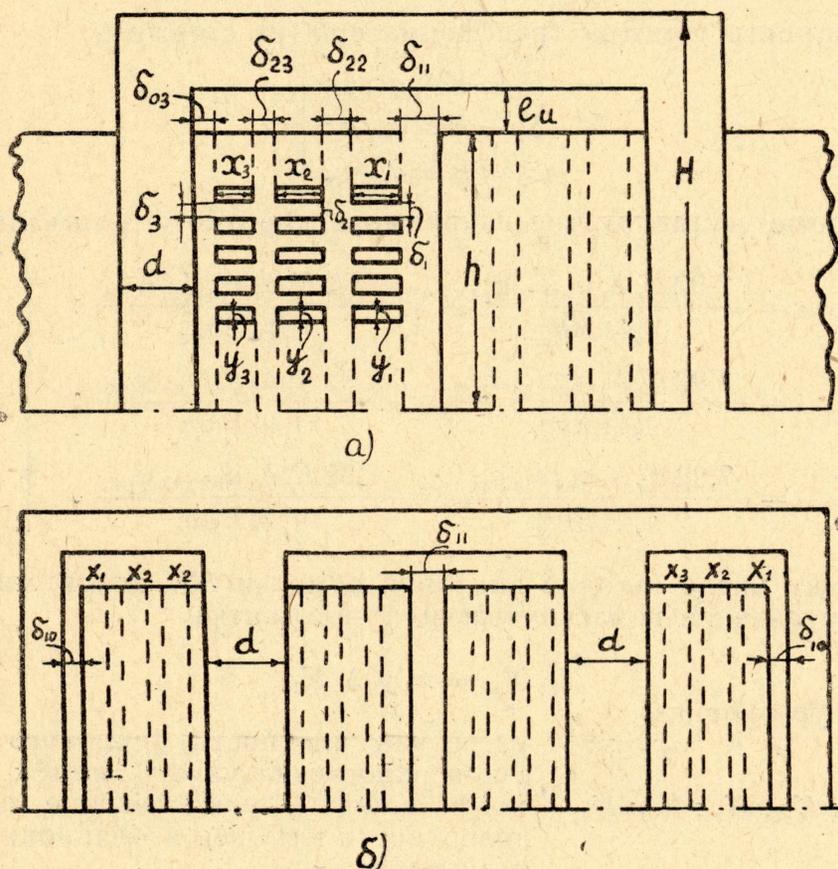


Рис. 1.

ка, причем обмотка высшего напряжения (ВН) и среднего (СН) — непрерывная катушечная, а обмотка низшего напряжения (НН) — винтовая [2].

Уравнение затрат на изготовление и эксплуатацию трехобмоточного трансформатора имеет вид:

$$Z = (A_1 + DB^2) Q_c + [\beta A_2 + \varepsilon (\Delta_1 K_{31})^2] Q_{M1} + [\beta A_2 + \varepsilon (\Delta_2 K_{32})^2] Q_{M2} + [\beta A_3 + \varepsilon (\Delta_3 K_3)^2] Q_{M3}. \quad (1)$$

Здесь $A_1; A_2; D; \varepsilon; \beta$ — постоянные [1];

$\Delta_1; \Delta_2; \Delta_3$ — плотность тока в обмотках (ВН; СН; НН), (a/cm^2) ;

Q_c — вес стали сердечника, кг;

$Q_{M1}; Q_{M2}; Q_{M3}$ — вес проводникового материала обмоток (ВН; СН; НН), кг;

$K_{31}; K_{32}; K_{33}$ — коэффициенты загрузки трансформатора.

Для получения уравнения (1) в зависимости от параметров и размеров трансформатора можно воспользоваться следующими основными уравнениями трансформатора.

Уравнение теплового баланса катушек (обмоток) на 1 см средней длины витка:

$$\left. \begin{aligned} 2\sigma_1 (x_1 K_{x1} + y_1 K_{y1}) &= \rho_1 \Delta_1^2 x_1 y_1 K_1; \\ 2\sigma_2 (x_2 K_{x2} + y_2 K_{y2}) &= \rho_2 \Delta_2^2 x_2 y_2 K_2; \\ 2\sigma_3 (x_3 K_{x3} + y_3 K_{y3}) &= \rho_3 \Delta_3^2 x_3 y_3 K_3. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Мощность обмоток трансформатора (на стержень)

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= K \Delta_1 q_{M1} q_c; \\ S_2 &= K \Delta_2 q_{M2} q_c; \\ S_3 &= K \Delta_3 q_{M3} q_c. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Реактивные составляющие напряжения короткого замыкания

$$\left. \begin{aligned} u_{p1-3} &= \frac{7,92 K_r \Delta_1 q_{M1} l_{13} a_{p13}}{4,44 B h q_c} = \frac{7,92 K_r \Delta_3 q_{M3} l_{13} a_{p13}}{4,44 B h q_c}; \\ u_{p2-3} &= \frac{7,92 K_r \Delta_2 q_{M2} l_{23} a_{p23}}{4,44 B h q_c} = \frac{7,92 K_r \Delta_3 q_{M3} l_{23} a_{p23}}{4,44 B h q_c}; \\ u_{p1-2} &= \frac{7,92 K_r \Delta_1 q_{M1} l_{12} a_{p12}}{4,44 B h q_c} = \frac{7,92 K_r \Delta_2 q_{M2} l_{12} a_{p12}}{4,44 B h q_c}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Поскольку число заходов винтовой обмотки НН целое, можно записать уравнение намагничивающей силы витка

$$I_{H3} W_{K3} = x_3 y_3 \Delta_3 K_3. \quad (5)$$

В этих уравнениях:

$\sigma_1; \sigma_2; \sigma_3$ — расчетная плотность теплового потока с поверхности катушки $(вт/cm^2)$;

$K_{x1}; K_{x2}; K_{x3}; K_{y1}; K_{y2}; K_{y3}$ — коэффициенты, учитывающие закрытие поверхности катушек изоляционными материалами;

$\rho_1; \rho_2; \rho_3$ — удельное сопротивление материала обмотки $ом \cdot см$;

$K_1; K_2; K_3$ — коэффициенты заполнения проводниковым материалом площади сечения катушек (обмоток) [3].

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1}; & \lambda_1 &= \frac{m_1 i_1}{I_{H1}}; \\ K_2 &= \frac{1}{1 + \lambda_2 \Delta_2 y_2}; & \lambda_2 &= \frac{m_2 i_2}{I_{H2}}; \\ K_3 &= \frac{1}{1 + \lambda_3 \Delta_3 y_3}; & \lambda_3 &= \frac{m_3 i_3}{I_{H3}}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$I_{H1}; I_{H2}; I_{H3}$ — номинальный ток в обмотке (на один стержень), а
 $m_1; m_2; m_3$ — число параллельных проводов в ветви обмотки;

$i_1; i_2; i_3$ — толщина изоляции проводника на две стороны (см);

$K = 4,44 f B 10^{-7}$;

f — частота, (Гц);

B — индукция в стержне, (мЛ);

$q_{M1}; q_{M2}; q_{M3}$ — площадь сечения материала обмотки.

$$\left. \begin{aligned} q_{M1} &= K_1 x_1 y_1 \frac{h}{y_1 + \delta_1} = \frac{x_1 y_1 h}{(y_1 + \delta_1)(1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)}; \\ q_{M2} &= K_2 x_2 y_2 \frac{h}{y_2 + \delta_2} = \frac{x_2 y_2 h}{(y_2 + \delta_2)(1 + \lambda_2 \Delta_2 y_2)}; \\ q_{M3} &= K_3 x_3 y_3 \frac{h}{y_3 + \delta_3} = \frac{x_3 y_3 h}{(y_3 + \delta_3)(1 + \lambda_3 \Delta_3 y_3)}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$\delta_1; \delta_2; \delta_3$ — осевое расстояние между катушками обмоток с учетом изоляции проводников, (см);

q_c — площадь сечения стали стержня, (см²);

$$q_c = K_c \frac{\pi d^2}{4}; \quad (8)$$

K_c — коэффициент заполнения сталью площади сечения круга (с диаметром d), описанного около стержня;

K_r — коэффициент Роговского;

$l_{12}; l_{13}; l_{23}$ — средний диаметр канала рассеивания между обмотками, (см);

$a_{p12}; a_{p13}; a_{p23}$ — приведенная ширина канала рассеивания между соответствующими обмотками;

h — высота обмотки, (см).

Веса активного материала трансформатора равны

$$Q_c = \gamma_c q_c l_c 10^{-3}; \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{M1} &= n_c \gamma_{M1} q_{M1} l_{M1} \cdot 10^{-3}; \\ Q_{M2} &= n_c \gamma_{M2} q_{M2} l_{M2} \cdot 10^{-3}; \\ Q_{M3} &= n_c \gamma_{M3} q_{M3} l_{M3} \cdot 10^{-3}; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где γ_c — удельный вес стали сердечника, г/см³;

$\gamma_{M1}; \gamma_{M2}; \gamma_{M3}$ — удельный вес проводникового материала обмоток, (г/см³);

l_c — длина стали сердечника, приведенная к площади сечения стержня, (см).

$$l_c = (2 + n_c)(h + 2l_n) + K_\sigma [2n_\sigma(x_1 + x_2 + x_3 + \delta_{03} + \delta_{23} + \delta_{12} + + n_{10} \delta_{10} + n_{11} \delta_{11}) + n_d d]; \quad (11)$$

l_{M1} ; l_{M2} ; l_{M3} — средняя длина обмоток, (см).

$$\left. \begin{aligned} l_{M1} &= \pi (d + x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 2\delta_{03} + 2\delta_{23} + 2\delta_{12}); \\ l_{M2} &= \pi (d + x_2 + 2x_3 + 2\delta_{03} + 2\delta_{23}); \\ l_{M3} &= \pi (d + x_3 + 2\delta_{03}); \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Здесь n_c ; n_σ ; n_{10} ; n_{11} ; n_d — коэффициенты, учитывающие тип сердечника; для стержневого сердечника (рис. 1, а) $n_c = 0$; $n_\sigma = 1$; $n_{10} = 0$; $n_{11} = 0,5$; $n_d = 3,6$; для сердечника с расщепленным ярмом (рис. 1, б) $n_c = 1,05$; $n_\sigma = 2$; $n_{10} = 0,5$; $n_{11} = 0,25$; $n_d = 2,8$; l_u — среднее изоляционное расстояние от обмотки до ярма, (см); K_γ — коэффициент увеличения сечения ярма; δ_{03} ; δ_{23} ; δ_{12} ; δ_{10} ; δ_{11} — показаны на рис. 1.

Минимизация уравнения (1) в общем виде представляет довольно сложную задачу, так как получаются уравнения со степенями неизвестных, равными 16 и выше. Поэтому исследования удобнее проводить численным методом.

При исследованиях принято, что охлаждение катушек производится в основном с поверхностей x . В результате решения системы уравнений (2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8) относительно y_2 и y_3 получены следующие расчетные формулы (из уравнений 4 взяты два первых, так как они включают в себя все необходимые размеры).

$$\Delta_2 = \frac{\lambda_2 + \sqrt{\lambda_2^2 + \frac{4\alpha_2}{y_2}}}{2\alpha_2}, \quad (13)$$

$$x_2 = \frac{S_2 I_{H3} W_{K3} (y_2 + \delta_2) (1 + \lambda_2 \Delta_2 y_2)}{S_3 (y_3 + \delta_3) \Delta_2 y_2}; \quad (14)$$

$$x_3 = \frac{W_{K3} \left[m_3 i_3 + \sqrt{(m_3 i_3)^2 + \frac{4\alpha_3 I_{H3}^2}{y_3}} \right]}{2}; \quad (15)$$

$$\Delta_3 = \frac{x_3}{\alpha_3 I_{H3} W_{K3}}; \quad (16)$$

$$d = \frac{U_1 + \sqrt{U_1^2 + 4P_1 U_1 v_1}}{2\rho_1}; \quad (17)$$

$$x_1 = \frac{P_2}{U_2} - v_2; \quad (18)$$

$$\Delta_1 = \frac{(\delta_1 \lambda_1 + M) - \sqrt{(\delta_1 \lambda_1 + M)^2 - 4\delta_1 (M \lambda_1 + \alpha_1)}}{2\delta_1 \alpha_1}; \quad (19)$$

$$y_1 = \frac{1}{\Delta_1 (\alpha_1 \Delta_1 - \lambda_1)}; \quad (20)$$

$$h = \frac{S_3 (y_3 + \delta_3)}{1,743 \cdot 10^{-5} B d^2 I_{H3} W_{K3}}; \quad (21)$$

Здесь

$$\alpha_1 = \frac{\rho_1}{2\sigma_1 K_{x1}}; \quad \alpha_2 = \frac{\rho_2}{2\sigma_2 K_{x2}};$$

$$\alpha_3 = \frac{\rho_3}{2\sigma_3 K_{x3}}; \quad p_1 = \frac{U_{p2-3} K_c B (y_3 + \delta_3)}{2,38 \cdot 10^{-4} K_\gamma I_{H3} W_{K3}};$$

$$U_1 = x_2 + x_3 + 3\delta_{23}; \quad v_1 = 2x_3 + 2\delta_{03} + \delta_{23};$$

$$P_2 = \frac{P_1 d^2 U_{p1-3}}{U_{p2-3}}; \quad M = \frac{S_3 x_1 (y_3 + \delta_3)}{S_1 I_{H3} W_{K3}};$$

$$U_2 = v_1 + d + x_2 + \delta_{23}; \quad v_2 = 3x_2 + x_3 + 3(\delta_{12} + \delta_{23}).$$

Важное значение для трансформаторов большой мощности имеет габаритный размер по высоте. Для определения габаритного размера подсчитывалась полная высота сердечника трансформатора (H на рис. 1)

$$H = h + 2l_n + K_a d. \quad (22)$$

Здесь K_a — коэффициент, учитывающий высоту ярем сердечника.

Исследования функции затрат (1) проводились на электронной цифровой вычислительной машине. При составлении программ учитывалось, что в выражениях (18) и (20) могут оказаться отрицательными значения x_1 и y_1 , что не имеет физического смысла.

Для исследований были взяты трансформаторы мощностью 60, 200 и 400 мва (на фазу) с напряжениями: ВН-242, СН-121, НН-20 кВ и со следующими данными:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 2,14 \cdot 10^{-6}; \quad \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0,2; \quad i_1 = 0,2; \quad i_2 = 0,2; \quad i_3 = 0,055;$$

$$K_c = 0,8; \quad B = 1,65; \quad K_r = 0,95; \quad \delta_1 = 1,6; \quad \delta_2 = 1,4; \quad \delta_3 = 1,2; \quad \delta_{03} = 2,5;$$

$$\delta_{23} = 5; \quad \delta_{12} = 10; \quad \delta_{10} = 14; \quad \delta_{11} = 20; \quad \gamma_{M1} = \gamma_{M2} = \gamma_{M3} = 8,9;$$

$$\gamma_c = 7,65; \quad K_T = 0,7; \quad \beta = 3; \quad P_H = 0,125; \quad P_a = 0,06;$$

$$Z_p = 8,10; \quad \alpha_p = 0,0193; \quad P_{ак} = 0,06; \quad C_1 = 150; \quad K_A = 1,05;$$

$$C_2 = C_2' = 0,25 \cdot 10^{-2}; \quad t = 0,7 \cdot 10^4; \quad \alpha_c = 0,6 \cdot 10^{-3};$$

$$K_M = 1; \quad \tau = 0,6 \cdot 10^4; \quad K_H = 1; \quad \alpha_M = 0,24 \cdot 10^{-6};$$

$$K_{31} = 0,5; \quad K_{32} = 0,5; \quad K_{33} = 1; \quad U_{p2-3} = 0,07; \quad U_{p1-3} = 0,24; \quad l_n = 18.$$

Остальные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

$S(\text{Mва})$	$K_{x1(2)}$	K_{x3}	S_1	S_2	S_3	I_{H1}	I_{H2}	I_{H3}	m_1	m_2	m_3	W_{K3}
30	0,75	0,7	30	30	30	215	430	1500	3	5	16	1
100	0,7	0,7	0,7	100	100	715	1430	5000	4	8	16	0,5
200	0,7	0,7	0,7	200	200	1430	2860	10000	4	12	32	0,25

В табл. 2 даны оптимальные размеры, параметры, веса активных материалов и затраты для указанных трансформаторов с различными типами сердечника, полученные путем минимизации выражения (1) по независимым переменным y_2 и y_3 .

Из табл. 2 видно, что высота катушки ВН (y_1) больше максимальной стандартной (2,2 см), а плотность тока сравнительно мала. Это указывает на недостаточное использование меди обмотки ВН, что может являться резервом снижения веса рассматриваемых трансформаторов.

Для сравнения расчетных затрат на трансформатор с произвольно полученными размерами и размерами, ограниченными стандартными проводами, в табл. 3 приведены оптимальные размеры и параметры трансформатора при $y_1 = 2,2$ см. Здесь же показано изменение размеров

и затрат при разных значениях y_2 и y_3 для трансформатора 200 Мва (на фазу) с сердечником выполненным по рис. 1, б.

Таблица 2

	Сердечник по рис. 1			Сердечник по рис. 2		
	60 Мва	200 Мва	400 Мва	60 Мва	200 Мва	400 Мва
$y_1, \text{см}$	2,51	7,26	10,34	2,53	7,14	9,96
$y_2, \text{см}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$y_3, \text{см}$	0,6	1,0	0,7	0,6	0,95	0,7
$x_1, \text{см}$	12,28	17,11	21,2	12,32	17,63	21,1
$x_2, \text{см}$	8,08	9,48	10,36	8,0	9,7	10,56
$x_3, \text{см}$	5,81	7,13	8,48	5,81	7,3	8,48
$\Delta_1, \text{а/см}^2$	502	238	189,3	502	227	182
$\Delta_2, \text{а/см}^2$	661	546	537	673	546	525
$\Delta_3, \text{а/см}^2$	507	373	444	507	383	444
$d, \text{см}$	75,73	107,7	131,4	75,57	111,3	132
$h, \text{см}$	272,8	329,6	382,8	274	301,9	379
$Q_c, \text{Т}$	28,03	70,67	122,4	38,04	97,09	161,4
$Q_m, \text{Т}$	8,111	29,34	51,8	8,098	28,87	53,1
3 руб. $\cdot 10^3$	14,53	35,67	64,33	16,8	41,59	73,16
$U_{п 1-2}, \%$	16,1	15,7	15,6	16,08	15,7	15,53
$H, \text{см}$	460,3	581	681,6	385,6	431,2	547

Сравнивая данные табл. 2 и 3, можно отметить, что введение ограничений по размеру y_1 приводит к увеличению затрат и габаритного размера (H).

Таблица 3

$y_1, \text{см}$	2,2	2,2	2,2	2,2
$y_2, \text{см}$	0,1	0,6	0,65	1,1
$y_3, \text{см}$	1,2	0,95	0,7	0,9
$x_1, \text{см}$	12,79	17,63	21,06	18,29
$x_2, \text{см}$	14,56	9,7	10,88	9,68
$x_3, \text{см}$	6,53	7,31	8,48	7,51
$\Delta_1, \text{а/см}^2$	255,7	227,1	221,6	225,7
$\Delta_2, \text{а/см}^2$	1219	545,9	528	425,8
$\Delta_3, \text{а/см}^2$	342	382,8	444	393
$d, \text{см}$	111,1	111,3	133,1	114,3
$h, \text{см}$	338	301,9	186,6	279,4
$Q_c, \text{Т}$	103,0	97,08	116,9	99,01
$Q_m, \text{Т}$	26,82	33,64	27,86	34,22
3 руб. $\cdot 10^3$	42,69	44,09	45,74	44,53
$U_{п 1-2}, \%$	21,0	28,8	28,8	28,8
$H, \text{см}$	485,1	439,2	355,7	429,7

В табл. 4 приведены исследования трансформатора мощностью 60 Мва (на фазу) с сердечником, выполненным по рис. 1 а, по расчетной удельной цене трансформатора (K_T) и по отношению расчетной удельной стоимости меди к стоимости стали в изделии — β .

Таблица 4

	$K_T = 1$	$K_T = 1,3$	$K_T = 1,5$	$\beta = 2$	$\beta = 4$	$\beta = 6$
$y_1, \text{ см}$	2,51	2,51	2,51	0,806	2,51	2,51
$y_2, \text{ см}$	0,6	0,6	0,6	2,9	0,6	0,6
$y_3, \text{ см}$	0,6	0,6	0,6	0,8	0,6	0,6
$x_1, \text{ см}$	12,27	12,27	12,23	8,45	12,27	12,27
$x_2, \text{ см}$	8,08	8,08	8,08	10,1	8,08	8,08
$x_3, \text{ см}$	5,81	5,81	5,81	5,10	5,81	5,81
$\Delta_1, \text{ а/см}^2$	502	502	502	656	502	502
$\Delta_2, \text{ а/см}^2$	661	661	661	427	661	661
$\Delta_3, \text{ а/см}^2$	507	507	507	445	507	507
$d, \text{ см}$	75,73	75,73	75,73	71,15	75,73	75,73
$h, \text{ см}$	272,8	272,8	272,8	343,4	272,8	272,8
Q_c, T	28,03	28,03	28,03	27,63	28,03	28,03
Q_m, T	8,11	8,11	8,11	9,40	8,11	8,11
$3 \text{ руб} \cdot 10^3$	15,56	18,46	20,4	11,54	13,70	15,80
$U_{p1-2}, \%$	16,06	16,06	16,06	15,55	16,06	16,06
$H, \text{ см}$	384,5	384,5	384,5	450,5	384,5	384,5

Как видно из табл. 4, коэффициент K_T и β практически не влияют на элементарные размеры обмоток трансформатора и на габаритные размеры. Значительные изменения размеров при $\beta < 3$ существенного влияния на исследуемые трансформаторы не окажут, так как для мощных трансформаторов β обычно больше 3.

На основании проделанных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Несмотря на меньшие затраты, трансформаторы со стержневым сердечником (рис. 1, а) имеют большие габаритные размеры, что затрудняет их транспортировку по железнодорожным путям. Поэтому, видимо, целесообразнее принять к исполнению трансформаторы, имеющие расщепленное ядро (рис. 1, б), несмотря на их больший вес и затраты.

2. Введение ограничений по размерам существующих обмоточных проводов позволяет выполнить обмотку более просто с точки зрения технологии, но это приводит к увеличению габаритного размера по высоте трансформатора и напряжению рассеивания.

3. Поскольку величины K_T и β практически не влияют на элементарные размеры обмоток и вес трансформатора, нет необходимости, для исследований, стремиться к точному определению их значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Д. Кутявин. К определению оптимальных размеров трехфазных двухобмоточных трансформаторов. Изв. ТПИ, том 130, 1964.
2. П. М. Тихомиров. Расчет трансформаторов. Госэнергоиздат, 1962.
3. Г. В. Дель, В. П. Краснов. Технико-экономическое исследование оптимальных размеров силовых трансформаторов. Изв. ТПИ, том 132, 1964.