

К ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ОДНОФАЗНЫХ ДВУХОБОМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Доктор техн. наук И. Д. КУТЯВИН, аспирант Г. В. ДЕЛЬ,
аспирант В. П. КРАСНОВ.

Методика технико-экономического определения оптимальных размеров трехфазных двухобмоточных трансформаторов, указанная в [1 и 2], может быть применена и для однофазных трансформаторов.

В данной статье приводятся результаты расчетов, полученные при применении вышеуказанной методики для подстанционных однофазных двухобмоточных трансформаторов напряжением 110/10 кВ, мощностью 10,5; 20; 30; 40 и 50 мВА, без устройства для регулирования напряжения.

На рис. 1 показано расположение обмоток, размеры и изоляционные расстояния для трансформатора с сердечником броневых типа (обозначения в скобках относятся к трансформатору с сердечником стержневого типа) [3].

Обмотка высшего напряжения может быть выполнена непрерывной катушечной, а обмотка низшего напряжения — винтовой [3].

Основные соотношения, связывающие размеры трансформатора, представлены в следующем виде (все размеры в см).

Высота окна сердечника

$$H = h + 2l_u \quad (1)$$

где h — высота обмотки;

l_u — изоляционное расстояние от обмотки до ярма.

Ширина окна сердечника для трансформатора с броневым сердечником

$$a = x_1 + x_2 + \delta_{02} + \delta_{12} + \delta_{10}, \quad (2)$$

для трансформатора со стержневым сердечником

$$a = 2(x_1 + x_2 + \delta_{02} + \delta_{12} + 0,5\delta_{11}), \quad (2a)$$

где x_1 и x_2 — ширина катушек обмотки фазы;

δ_{02} — изоляционное расстояние от стержня до вторичной обмотки;

δ_{12} — изоляционное расстояние между первичной и вторичной обмоткой;

δ_{10} — изоляционное расстояние от первичной обмотки до стержня;

δ_{11} — изоляционное расстояние между первичными обмотками.

Средняя длина витка первичной обмотки

$$l_{M1} = \pi(d + x_1 + 2x_2 + 2\delta_{02} + 2\delta_{12}) \quad (3)$$

Средняя длина витка вторичной обмотки

$$l_{M2} = \pi(d + x_2 + 2\delta_{02}) \quad (4)$$

где d — диаметр стержня.

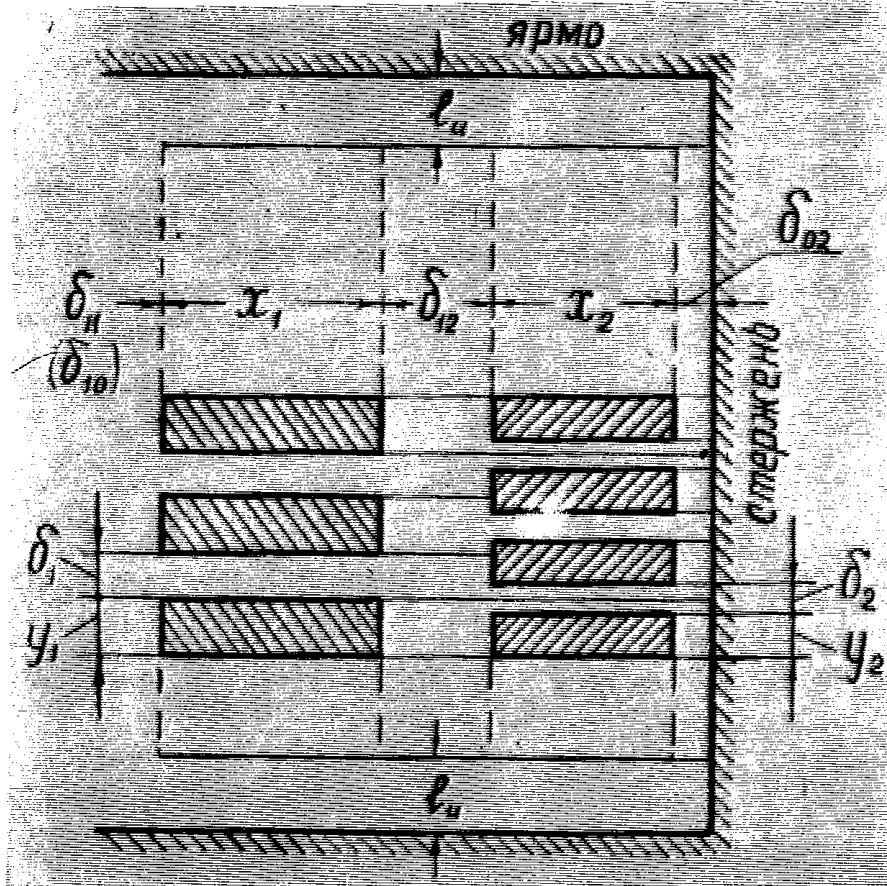


Рис. 1.

Длина стали сердечника, приведенная к площади сечения стержня

для трансформаторов с броневым сердечником

$$l_c = (h + 2l_u) (1 + k_{я}) + k_{я} [2(x_1 + x_2 + \delta_{02} + \delta_{12} + \delta_{10}) + 1,8d] \quad (5)$$

и для трансформаторов со стержневым сердечником

$$l_c = 2h + 4l_u + k_{я} [4(x_1 + x_2 + \delta_{02} + \delta_{12} + 0,5\delta_{11}) + 3,6d] \quad (5a)$$

где $k_{я}$ — коэффициент увеличения площади сечения ярем.

Площадь сечения материала обмоток фазы

$$q_{M1} = k_1 x_1 y_1 \frac{h}{y_1 + \delta_1}; \quad q_{M2} = k_2 x_2 y_2 \frac{d}{y_2 + \delta_2} \quad (6)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты заполнения проводниковым материалом площадей сечений катушек первичной и вторичной обмоток;

y_1 и y_2 — высота катушек обмоток;

δ_1 и δ_2 — высота радиальных охлаждающих каналов между катушками первичной и вторичной обмоток.

Площадь сечения стали стержня

$$q_c = k_c \frac{\pi d^2}{4} \quad (7)$$

где k_c — коэффициент заполнения сталью площади круга с диаметром d .

Уравнение теплового баланса катушки обмотки (на погонный см среднего витка)

$$\left. \begin{aligned} 2\sigma_1(k_{x1}x_1 + k_{y1}y_1) &= \rho \Delta_1^2 k_1 x_1 y_1 \\ 2\sigma_2(k_{x2}x_2 + k_{y2}y_2) &= \rho \Delta_2^2 k_2 x_2 y_2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где σ_1 и σ_2 — расчетная плотность теплового потока с поверхности катушки первичной и вторичной обмоток, $вт/см$;
 ρ — удельное сопротивление материала обмоток $ом\ см$;
 k_{x1} , k_{x2} , k_{y1} , k_{y2} — коэффициенты, учитывающие закрытие поверхностей катушек x_1 , y_1 , x_2 , y_2 изоляционными деталями.

На основании уравнений (8) можно написать выражение для плотности тока первичной Δ_1 и вторичной Δ_2 обмоток

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= \sqrt{\frac{2\sigma_1(k_{x1}x_1 + k_{y1}y_1)}{\rho k_1 x_1 y_1}} = \alpha_1 \sqrt{\frac{z_1}{x_1 y_1}} \\ \Delta_2 &= \sqrt{\frac{2\sigma_2(k_{x2}x_2 + k_{y2}y_2)}{\rho k_2 x_2 y_2}} = \alpha_2 \sqrt{\frac{z_2}{x_2 y_2}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{где} \quad z_1 &= k_{n1}x_1 + y_1; \quad z_2 = k_{n2}x_2 + y_2; \quad k_{n1} = \frac{k_{x1}}{k_{y1}} \\ \alpha_1 &= \sqrt{\frac{2\sigma_1 k_{y1}}{\rho k_1}}; \quad \alpha_2 = \sqrt{\frac{2\sigma_2 k_{y2}}{\rho k_2}}; \quad k_{n2} = \frac{k_{x2}}{k_{y2}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Выражение для мощности трансформатора в $квa$

$$S = K \Delta_1 q_{m1} q_c n_c = K \Delta_2 q_{m2} q_c n_c \quad (11)$$

Подставив в (11) значения Δ_1, q_{m1} и q_c из (9), (6) и (7), найдем выражение для высоты обмотки

$$h = \frac{N_2(y_2 + \delta_2)}{d^2 \sqrt{z_2 x_2 y_2}} = \frac{N_1(y_1 + \delta_1)}{d^2 \sqrt{z_1 x_1 y_1}} \quad (12)$$

Для трансформаторов с броневым сердечником

$$N_2 = \frac{4S}{K k_c k_2 \pi \alpha_2}; \quad N_1 = \frac{4S}{K k_c k_1 \pi \alpha_1} \quad (129)$$

и для трансформаторов со стержневым сердечником

$$N_2 = \frac{2S}{K k_c k_2 \pi \alpha_2}; \quad N_1 = \frac{2S}{K k_c k_1 \pi \alpha_1} \quad (13a)$$

здесь $K = 4,44 f B \cdot 10^{-11}$

где f — частота $гц$;

B — индукция в стержне $гс$;

n_c — число стержней трансформатора, имеющих обмотку.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания [3] (в относительных единицах) приводится к следующему виду.

$$u_p = \frac{7,92k_r \Delta_2 q_m 2\pi(d + 2x_2 + 2\delta_{02} + \delta_{12})(x_1 + x_2 + 3\delta_{12})}{13,32Bq_c h}, \quad (15)$$

где k_r — коэффициент Роговского.

После подставки в (15) переменных, найдем выражение для диаметра стержня

$$d = \frac{U\sqrt{U^2 + 4PUV(y_2 + \delta_2)}}{2P(y_2 + \delta_2)}, \quad (16)$$

где

$$\left. \begin{aligned} U &= (x_1 + x_2 + 3\delta_{12}) \sqrt{z_2 y_2 x_2} \\ V &= 2x_2 + 2\delta_{02} + \delta_{12} \\ P &= \frac{13,32Bk_c u_p}{7,92k_r k_2 \alpha_2} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Вес стали сердечника кг

$$Q_c = \gamma_c q_c l_c 10^{-3} \quad (18)$$

для трансформаторов с броневым сердечником

$$Q_c = \frac{k_c \pi \gamma_c 10^{-3}}{4} \left\{ \frac{N_2(y_2 + \delta_2)(1 + k_{\text{я}})}{\sqrt{z_2 x_2 y_2}} + 2l_u (1 + k_{\text{я}}) d^2 + k_{\text{я}} d^2 [2(x_1 + x_2 + \delta_{02} + \delta_{12} + \delta_{10}) + 1,8d] \right\} \quad (19)$$

для трансформаторов со стержневым сердечником

$$Q_c = \frac{K_c \pi \gamma_c 10^{-3}}{4} \left\{ \frac{2N_2(y_2 + \delta_2)}{\sqrt{z_2 x_2 y_2}} + d^2 [4k_{\text{я}} (x_1 + x_2 + \delta_{02} + \delta_{12} + 0,5\delta_{11}) + 3,6k_{\text{я}} d + 4l_u] \right\} \quad (20)$$

Вес проводникового материала обмоток трансформатора кг

$$Q_m = \gamma_m 10^{-3} (q_{m1} l_{m1} + q_{m2} l_{m2}) \quad (21)$$

Подставив в (21) значение переменных, найдем:

$$Q_m = \frac{3,33\gamma_m u_p Bk_c \pi 10^{-3}}{7,92k_r (d + 2x_2 + \delta_{02} + \delta_{12})(x_1 + x_2 + 3\delta_{12})} \cdot \left[\frac{N_1(y_1 + \delta_1)(d + x_1 + 2x_2 + 2\delta_{02} + 2l_2)}{\alpha_1 z_1} + \frac{N_2(y_2 + \delta_2)(d + x_2 + 2\delta_{02})}{\alpha_2 z_2} \right] \quad (22)$$

Выражения (21) и (22) содержат четыре переменных (x_1 , y_1 , x_2 , y_2). Одну из переменных можно исключить, воспользовавшись равенством намагничивающих сил обмоток, имеющих следующий вид:

$$\frac{k_1 x_1 y_1 \Delta_1}{y_1 + \delta_1} = \frac{k_2 x_2 y_2 \Delta_2}{y_2 + \delta_2} \quad (23)$$

В результате остается три переменных.

Выражение для расчетных затрат, представленное в виде [1]

$$Z = (A_1 + DB^2)Q_c + (\beta A_2 + E\Delta^2)Q_{M1} + (\beta A_2 + E\Delta^2)Q_{M2}, \quad (24)$$

где A_1, A_2, D, E, β — постоянные [1], является функцией трех независимых переменных.

Исследование уравнения (24) на минимум расчетных затрат довольно сложно. В данной статье рассматривается частный случай, когда $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$.

Имея в виду, что коэффициент заполнения проводниковым материалом сечения катушки вторичной обмотки k_2 практически не зависит от мощности трансформатора, в качестве независимых переменных удобно взять x_2 и y_2 . Из (23) имеем

$$x_1 = \frac{k_2 x_2 y_2 (y_1 + \delta_1)}{(y_2 + \delta_2) k_1 y_1}. \quad (25)$$

Решив совместно (8) и (25), найдем выражение для y_1 :

$$y_1 = \frac{(kx_2 y_2 - \sigma z_2 \delta_1) + \sqrt{(kx_2 y_2 - \sigma z_2 \delta_1)^2 - 4kk_y \delta_1 x_2 y_2 (y_2 + \delta_2)}}{2[\sigma z_2 - k_{y1}(y_2 + \delta_2)]}, \quad (26)$$

$$\text{где } k = k_{x1} \frac{k_2}{k_1}; \quad \sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}.$$

Выражение расчетных затрат (24) при принятых условиях имеет вид:

$$Z = (A_1 + DB^2)Q_c + (\beta A_2 + E\Delta^2)Q_M = \frac{k_c \pi \gamma_c \cdot 10^{-3}}{4} (A_1 + DB^2) \varphi_1(x_2 y_2) \quad (28)$$

Для трансформаторов с броневым сердечником

$$\begin{aligned} \varphi_1(x_2 y_2) = N_2 (y_2 + \delta_2) & \left[\frac{2}{\sqrt{z_2 x_2 y_2}} + \right. \\ & \left. + \frac{M(2d + x_1 + 3x_2 + 4\delta_{02} + 2\delta_{12})(n + m \frac{z_2}{x_2 y_2})}{z_2(d + 2x_2 + 2\delta_{02} + \delta_{12})(x_1 + x_2 + 3\delta_{12})} \right] + d^2 \{ k_{\pi} [2(x_1 + x_2 + \delta_{02} + \\ & + \delta_{12} + \delta_{10}) + 1,8d] + 2l_{\Pi} (1 + k_{\pi}) \} \end{aligned} \quad (29)$$

и для трансформаторов со стержневым сердечником

$$\begin{aligned} \varphi_1(x_2 y_2) = N_2 (y_2 + \delta_2) & \left[\frac{1 + k_{\pi}}{\sqrt{z_2 x_2 y_2}} + \right. \\ & \left. + \frac{M(2d + x_1 + 3x_2 + 4\delta_{02} + 2\delta_{12}) \left(n + m \frac{z_2}{x_2 y_2} \right)}{z_2(d + 2x_2 + 2\delta_{02} + \delta_{12})(x_1 + x_2 + 3\delta_{12})} \right] + \\ & + d^2 [4k_{\pi} (x_1 + x_2 + \delta_{02} + \delta_{12} + 0,5\delta_{11}) + 3,6k_{\pi} d + 4l_{\Pi}], \end{aligned} \quad (29a)$$

$$\text{где } M = \frac{P \gamma_M k_2}{k_c j_c}; \quad n = \frac{\beta A_2}{A_1 + DB^2}; \quad m = \frac{E \alpha_2^2}{A_1 + DB^2}. \quad (30)$$

Поскольку общее аналитическое исследование на минимум функций (29) и (29a) сложно, приводится численное определение оп-

тимальных значений x_2 и y_2 для трансформаторов с сердечником из холоднокатанной стали.

В расчете приняты следующие исходные данные:

$k_c = 0,82$; $k_{x1} = k_{x2} = 0,7$; $k_{y1} = k_{y2} = 0,9$; $k_{я} = 1,05$; $k_2 = 0,82$; $k_m = 0,7$; $k_n = 0,8$; $k_T = 0,95$; $k_T = 0,7$ руб/кг; $\delta_1 = 0,75$ см; $\delta_2 = 0,6$ см; $\delta_{02} = 1,5$ см; $\delta_{12} = 5$ см; $\delta_{11} = 6$ см; $\delta_{10} = 9$ см; $l_{11} = 9$ см; $u_p = 0,105$; $B = 16500$ гс; $\alpha_c = 0,8 \cdot 10^{-11}$; $\gamma_c = 7,65$ кг/см³; $\rho_n = 0,125$; $P_a = 0,06$; $C_1 = 124$ руб/квт; $C'_2 = 0,007$ руб/квт-ч; $C''_2 = 0,009$ руб/квт-ч; $\tau = 4000$ час; $t = 8700$ час. $\left(\frac{k_n \delta_m}{\delta}\right)^2 = 0,4$; $\mathcal{E}_p = 1,5$ руб/квар; $\alpha_1 = 0,046$ ква/кг; $\rho_m = 2,14 \cdot 10^{-6}$ см. см; $\alpha_m = 2,4 \cdot 10^{-7}$; $\gamma_m = 8,9$ кг/см³; $\beta = 3,2$; $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,15$ вт/см; $\kappa_1 = 0,64$ для трансформаторов мощностью 10,5 и 20 мва и $\kappa_1 = 0,52$ для трансформаторов мощностью 30, 40 и 50 мва.

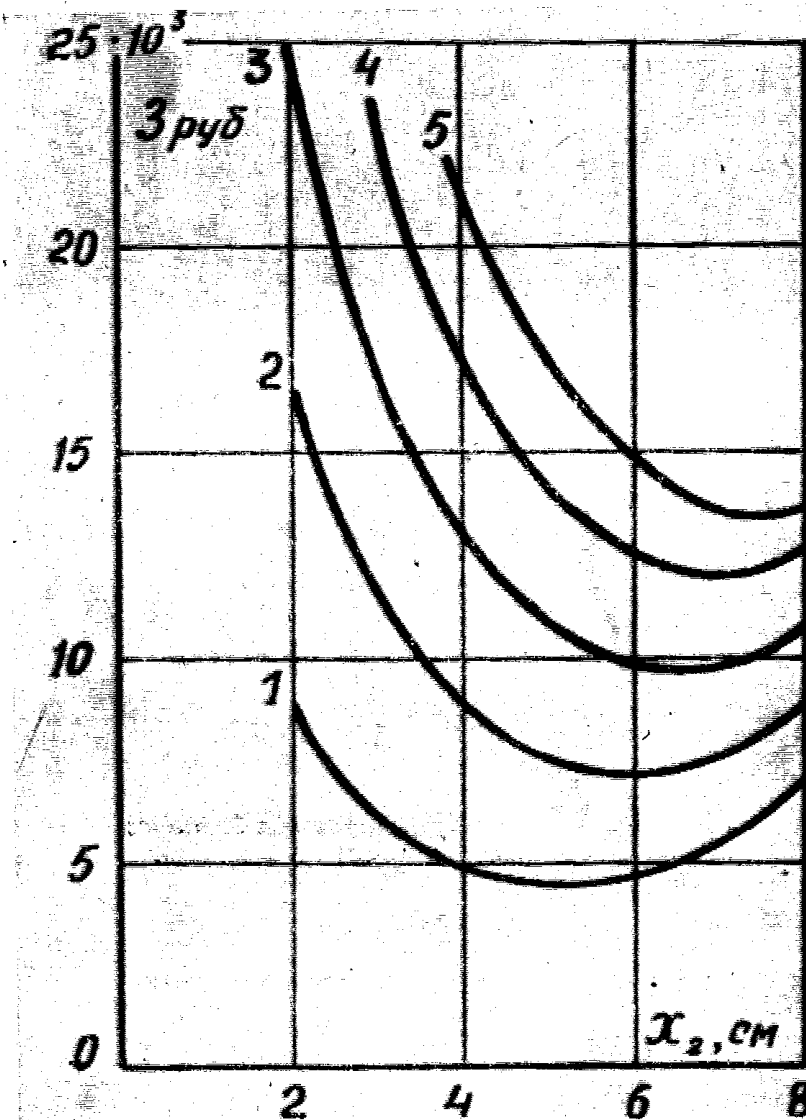


Рис. 2. Кривая 1 для трансформатора 10,5 мва;
2 — 20; 3 — 30; 4 — 40; 5 — 50 мва.

Исследование уравнения (28) проводилось при $x_2 = 2 \div 8$ с шагом 1 и при $y_2 = 0,5 \div 6$ с шагом 0,5.

На рис. 2 показана зависимость $Z = f_2(x_2, y_2)$ при $y_2 = 1,5$ см для трансформаторов с броневым сердечником, а на рис. 3 — для трансформаторов со стержневым сердечником.

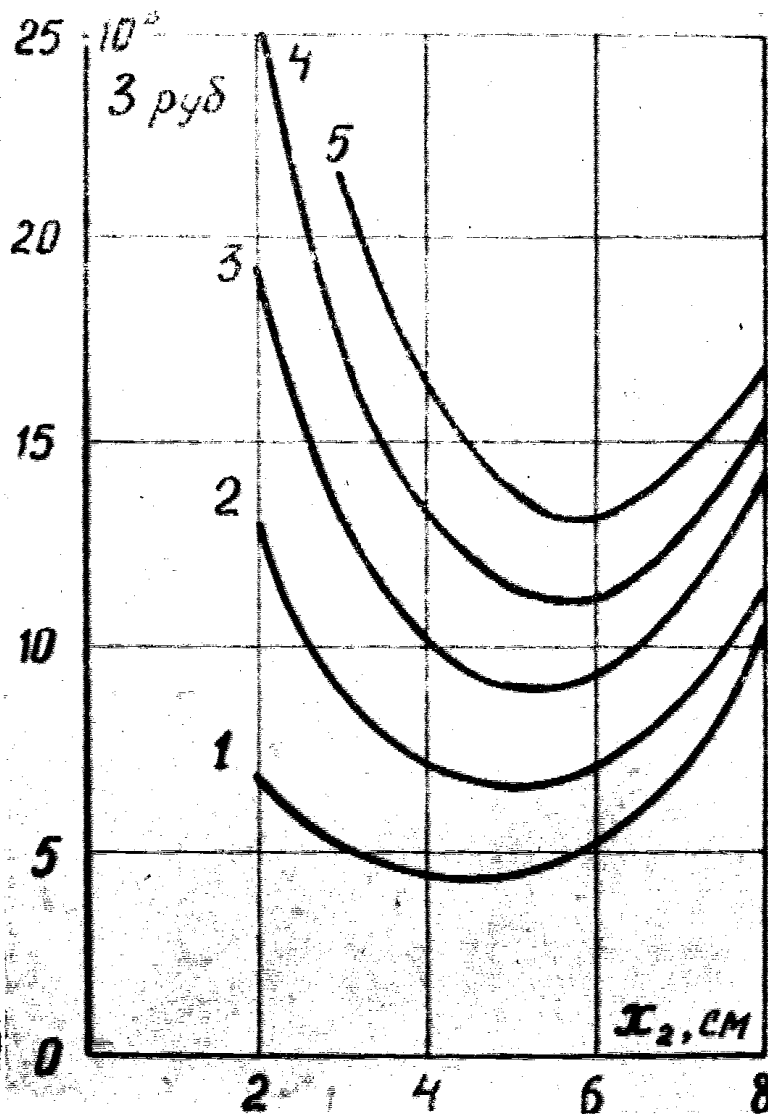


Рис. 3. Кривая 1 для трансформатора 10,5 мва;
2 — 20; 3 — 30; 4 — 40; 5 — 50 мва.

На рис. 4 показана зависимость оптимального значения от мощности, найденная по кривым рисунков 2 и 3. Кривая 1 рис. 4 соответствует трансформаторам с броневым сердечником, кривая 2 — для трансформаторов со стержневым сердечником.

На рис. 5 приведена зависимость затрат от y_2 при x_2 , соответствующем оптимальным значениям. Кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответствуют трансформаторам с броневым сердечником, кривые 6, 7, 8, 9 и 10 — трансформаторам со стержневым сердечником, соответственно для мощностей 10,5; 20; 30; 40 и 50 мва.

Из кривых рис. 2, 3 и 5 видно, что расчетные значения x_2 и y_2 можно принимать значительно отличающимися от оптимальных значений, что не приведет к существенному увеличению затрат.

В таблице 1 приведены основные размеры трансформаторов с броневым сердечником, подсчитанные для различных значений переменных x_2 и y_2 , в таблице 2 — для трансформаторов со стержневым сердечником.

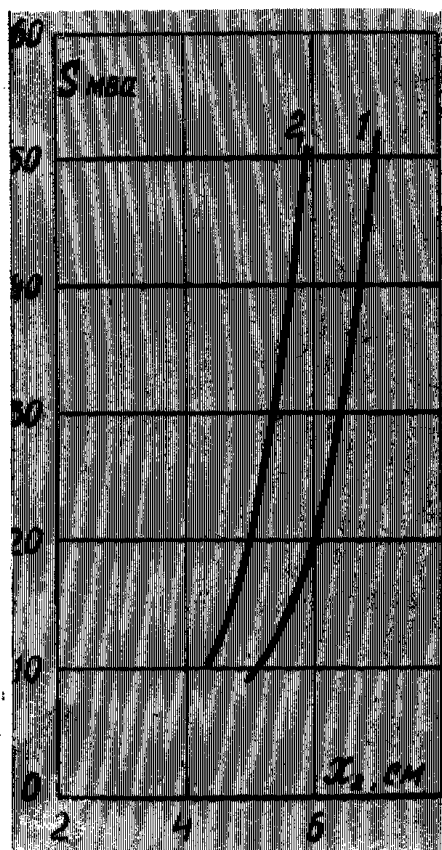


Рис. 4. Кривая 1 для трансформатора с броневым сердечником; 2 — со стержневым.

В пункте 8 таблиц 1 и 2 приведена высота $h' = 1,05 h$. Увеличение высоты обмотки сделано для размещения транспозиции обмотки низшего напряжения и для усиления изоляции и снижения плотности тока в крайних катушках обмотки высшего напряжения.

В пункте 17 указано механическое напряжение в материале обмотки, обусловленное радиальными усилиями, возникающими при коротком замыкании за трансформатором.

Выражение для определения механических усилий [3] может быть приведено к следующему виду

$$\sigma_p = C \frac{\Delta_1^2 q_{M1} \pi (d + 2x_2 + 2z_{0,2} = \delta_{12})}{h} \quad (31)$$

где $C \cong 5,7 \cdot 10^{-6}$ — постоянная.

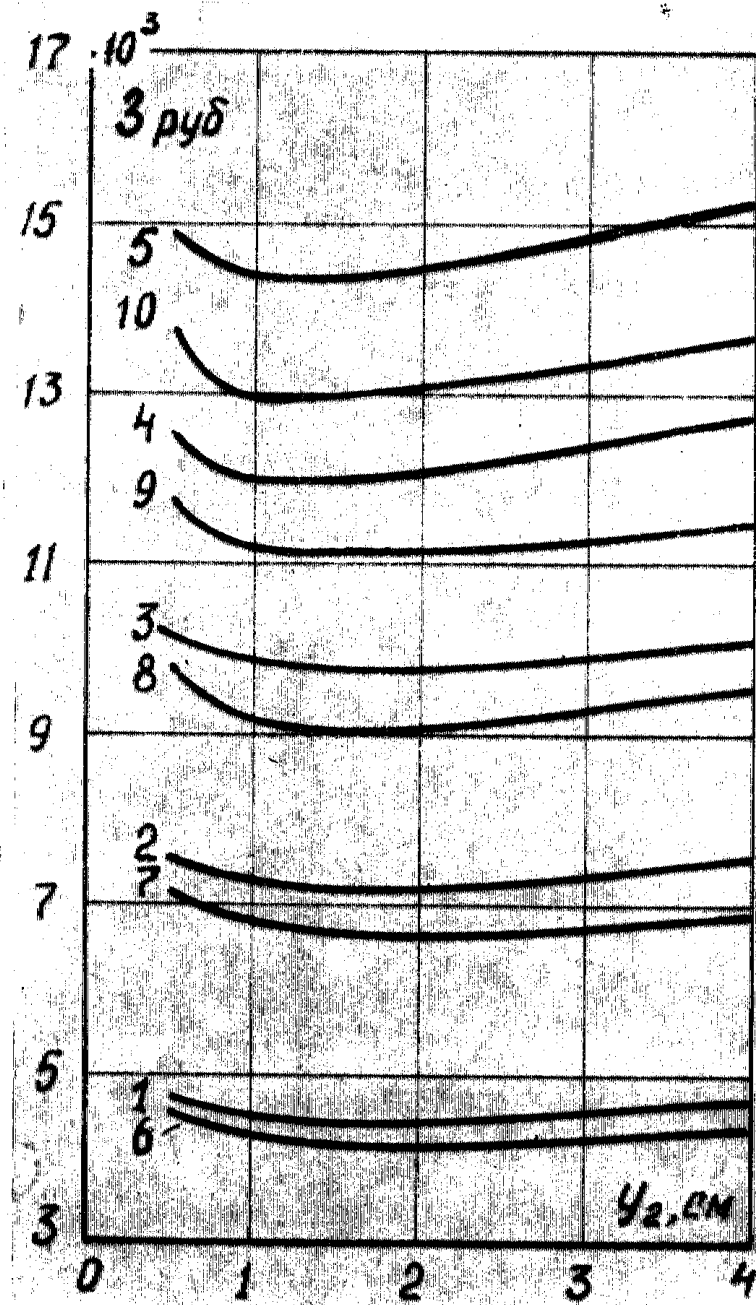


Рис. 5. Кривые 1, 2, 3, 4 и 5 для трансформаторов с броневым сердечником; 6, 7, 8, 9 и 10 — со стержневым.

Таблица 1

№ п. п.	Мощность трансформатора мва	10,5	20			30	40	50
		1	I	II	III	1		1
1	y_2 принято, см	1,5	1,5	1,4	1,9	1,5	1,5	1,5
2	x_2 принято, см	5,2	6,0	5,8	6,1	6,4	6,6	7,0
3	x_1 из (25), см	6,61	7,61	7,37	7,76	9,37	9,75	10,3
4	y_1 из (26), см	1,93	1,93	1,8	2,44	2,42	2,42	2,42
5	$\Delta_1 = \Delta_2$ из (9), а/см ²	330	325	335	296	322	320	318
6	d из (16), см	56,7	67,1	63,6	67,1	75,3	78,2	84,7
7	h из (12), см	138,5	165,5	189,5	167,5	187	224,5	227
8	$h^1 = 1,05 h$, см	145,5	174	199	176	196	235	238
9	H из (1), см	163,5	192	217	194	214	253	258
10	a из (2), см	27,3	29,1	28,7	29,4	30,4	31,8	32,8
11	l_{M1} из (3), см	272	313	308	315	347	358	383
12	l_{M2} из (4), см	204	239	232	240	266	276	298
13	l_c из (5), см	485	565	588	569	628	716	731
14	$q_{M1} = q_{M2}$ из (6), см ²	842	1162	1196	1274	1400	1736	1862
15	q_c из (7), см ²	2070	2910	2730	2910	3660	3940	4620
16	Q_M из (21), т	1,78	2,85	2,87	3,14	3,84	4,89	5,64
17	Q_c из (18), т	7,69	12,5	12,5	12,6	17,55	21,6	25,8
18	σ_p из (31), кг/см ²	445	579	568	523	668	705	792
19	p_c (потери в стали), кет	16,7	27,3	27,2	27,4	38,1	47,0	56,1
20	p_M (потери в меди), кет	46,5	72,2	77,5	66,1	95,0	118,0	137,0
21	Z из (28), руб. 10 ³	4,45	7,17	7,26	7,2	9,84	12,2	14,44

Таблица 2

№ п. п.	Мощность трансформатора мва	10,5	20			30	40	50
		1	I	II	III	1	1	1
1	y_2 принято, см	1,5	1,5	1,4	1,9	1,5	1,5	1,5
2	x_2 принято, см	4,4	5,1	5,0	5,3	5,3	5,7	6,1
3	x_1 из (25), см	5,6	6,5	6,34	6,73	7,81	8,4	9,0
4	y_1 из (26), см	1,93	1,92	1,8	2,45	2,43	2,43	2,43
5	$\Delta_1 = \Delta_2$ из (9),	338	331	351	304	329	326	324
6	d из (16), см	47	55,4	54,4	56,9	59,9	65,2	71
7	h из (12), см	116	140,5	147	131,5	174	184	183
8	$h^1 = 1,05 h$, см	122	147,5	154	138	183	193	192
9	H из (1), см	140	165	172	156	201	211	210
10	a из (2a), см	39	42,2	41,7	43	45,5	47,2	49,2
11	l_{M1} из (3), см	234	265	263	274	287	308	325
12	l_{M2} из (4), см	171	196	196	204	214	232	246
13	l_c из (5a), см	527	615	619	604	705	749	772
14	$q_{M1} = q_{M2}$ из (6), см ²	598	838	842	868	1080	1230	1302
15	q_c из (7), см ²	1425	1980	1900	2080	2310	2440	3250
16	Q_M из (21), т	2,15	3,44	3,42	3,68	4,81	5,91	6,62
17	Q_c из (18), т	5,75	9,31	9,02	9,6	12,45	15,7	19,15
18	σ_p из (30), кг/см	336	430	432	411	472	534	612
19	p_c (потери в стали), кет	12,5	21	19,6	20,8	27,2	34,1	41,7
20	p_M (потери в меди), кет	59	90,5	95,5	81,7	125	150,9	167
21	Z из (28), руб. 10 ³	4,15	6,59	6,58	6,64	8,99	11,14	13,0

Таблица 3.

№ п. п.	Мощность трансформатора, мва Тип сердечника	10,5		20		30		40		50	
		I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
1	Q_m %	100	121	100	121	100	125	100	121	100	118
2	Q_c %	100	75	100	74,5	100	71	100	72,8	100	74,2
3	Q_n %	100	94	100	93,7	100	93,3	100	93	100	92
4	Σ %	100	93,3	100	92	100	91,3	100	90,6	100	90

В таблице 3 приводятся данные для сравнения трансформаторов с броневым (графа I) и стержневым (графа II) сердечниками.

В заключение можно отметить, что несмотря на сложность, методика [1, 2] может быть применена для технико-экономических исследований однофазных силовых трансформаторов при применении цифровых вычислительных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутявин И. Д., К определению оптимальных размеров трехфазных двухобмоточных трансформаторов (см. выше).
2. Кутявин И. Д., Дель Г. В., Краснов В. П., К технико-экономическому определению оптимальных размеров подстанционных двухобмоточных трехфазных трансформаторов большой мощности (см. выше).
3. Тихомиров П. М., Расчет трансформаторов. Госэнергоиздат, 1963.