

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

К ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПОДСТАНЦИОННЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ДВУХОБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Технико-экономическое определение оптимальных размеров трансформаторов можно произвести путем минимизации выражения расчетных затрат [1], учитывающих расходы на производство и эксплуатацию трансформатора, а также капиталовложения на добавочную мощность системы с топливной базой.

$$Z = (A_1 + D B^2) Q_c + (\beta A_2 + E \Delta_1^2) Q_{m1} + (\beta A_2 + E \Delta_2^2) Q_{m2}, \quad (1)$$

где A_1, A_2, D, E, β — постоянные [1];

B — индукция в стержне, гс;

Δ_1, Δ_2 — плотности тока первичной и вторичной обмоток, а/см²;

Q_c — вес стали сердечника, кг;

Q_{m1} и Q_{m2} — вес проводникового материала первичной и вторичной обмоток, кг.

В данной статье изложена попытка авторов распространить метод, изложенный в [1], на трансформаторы большой мощности с непрерывными катушечными и винтовыми концентрическими обмотками [2], так как обе эти разновидности обмоток описываются одинаковыми математическими зависимостями.

На рис. 1 изображено взаимное расположение обмоток фазы и размеры катушек. При этом обмотка низшего напряжения может быть винтовой или непрерывной катушечной. Очевидны следующие зависимости между элементарными размерами трансформатора.

Высота окна сердечника (все размеры в сантиметрах).

$$H = h + 2 L_{\text{и}}, \quad (2)$$

где h — высота обмотки и $L_{\text{и}}$ — изоляционное расстояние от обмоток до ярма.

Ширина окна сердечника

$$a = 2(x_1 + x_2 + l_r); \quad (3)$$

где x_1 и x_2 — ширина катушек обмоток фазы (рис. 1);

l_r — половина радиальных изоляционных расстояний в окне.

Длина среднего витка обмоток фазы

$$l_M = \pi(d + 0,5x_1 + 1,5x_2 + l), \quad (4)$$

где $l = 2\delta_{20} + \delta_{12}$,

(5)

d — диаметр стержня.

Длина стали сердечника, приведенная к площади сечения стержня

$$l_c = 3H + k_y (4a + 5,6d) 3h + k_y [8(x_1 + x_2 + l_r) + 5,6d] + 6l_u, \quad (6)$$

где k_y — коэффициент увеличения площади сечения ярем.

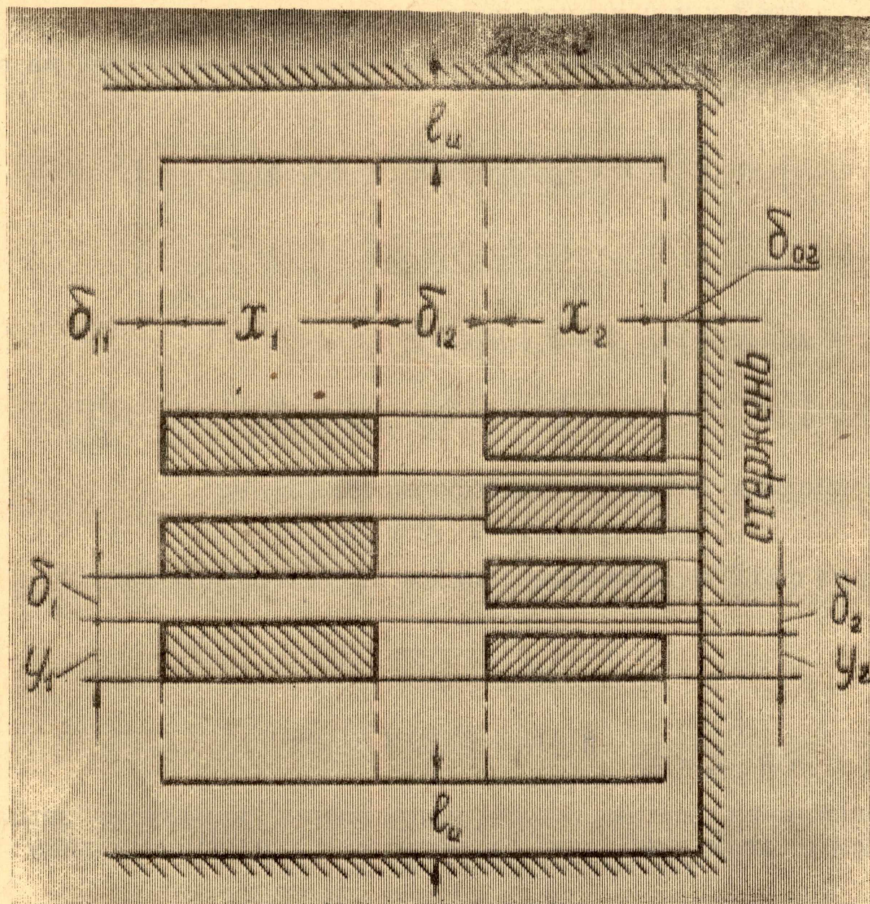


Рис. 1.

Площади сечения материала обмоток фазы

$$q_{M1} = \frac{k_1 y_1}{y_1 + \delta_1} x_1 h \text{ и } q_{M2} = \frac{k_2 y_2}{y_2 + \delta_2} x_2 h, \quad (7)$$

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

y_1 и y_2 — высоты катушек обмоток фазы (рис. 1);

δ_1 и δ_2 — высоты радиальных охлаждающих каналов между катушками.

Площадь сечения стали стержня

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

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

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

$$2 \sigma (k_x x + k_y y) = \rho \Delta^2 k x y, \quad (9)$$

где σ — расчетная плотность теплового потока с поверхности катушки, вт/см^2 ;

ρ — удельное сопротивление материала обмоток, $\text{ом}\cdot\text{см}$;

k_x и k_y — коэффициенты, учитывающие закрытие части поверхностей x и y изоляционными деталями.

Допустимые плотности тока в обмотках фазы (а/см^2) на основании (9):

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= \sqrt{\frac{2 \sigma_1 (k_{x1} x_1 + k_{y1} y_1)}{\rho k_1 x_1 y_1}} = \alpha_1 \sqrt{\frac{z_1}{x_1 y_1}} \\ \Delta_2 &= \sqrt{\frac{2 \sigma_2 (k_{x2} x_2 + k_{y2} y_2)}{\rho k_2 x_2 y_2}} = \alpha_2 \sqrt{\frac{z_2}{x_2 y_2}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $z_1 = k_{\pi 1} x_1 + y_1$; $z_2 = k_{\pi 2} x_2 + y_2$;

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{2 \sigma_1 k_{y1}}{\rho k_1}}; \alpha_2 = \sqrt{\frac{2 \sigma_2 k_{y2}}{\rho k_2}}; k_{\pi 1} = \frac{k_{x1}}{k_{y1}}; k_{\pi 2} = \frac{k_{x2}}{k_{y2}} \quad (11)$$

Выражение для мощности трансформатора в квa

$$S = K \Delta_1 q_{m1} q_c = K \Delta_2 q_{m2} q_c. \quad (12)$$

Подставив в (12) переменные, найдем высоту обмотки

$$h = \frac{N (y_2 + \delta_2)}{d^2 \sqrt{x_2 y_2 z_2}}, \quad (13)$$

$$\text{где } N = \frac{4 S}{K \kappa_c k_2 \pi \alpha_2} \text{ и } K = 13,32 f B \cdot 10^{-11}. \quad (14)$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания (в относительных единицах) приводится к следующему виду:

$$u_p = \frac{2 k_r \Delta_2 q_{m2} l_m (x_1 + x_2 + 3 \delta_{12})}{3,33 b q_c h}, \quad (15)$$

где k_r — коэффициент Роговского;

δ_{12} — изоляционное расстояние между обмотками фазы.

После подстановки переменных найдем из (15) диаметр стержня:

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

где $U = \sqrt{x_2 y_2 z_2} (x_1 + x_2 + 3 \delta_{12})$,

$$V = 1,5 x_2 + 0,5 x_1 + l,$$

$$P = \frac{3,33 B \kappa_c u_p}{8 k_r k_2 \alpha_2}.$$

Определим теперь веса активных материалов.

Вес стали сердечника в кг:

$$Q_c = \gamma_c q_c l_c 10^{-3} = \frac{k_c \pi \gamma_c}{4} \cdot 10^{-3} \left\{ \frac{3 N (y_2 + \delta_2)}{\sqrt{x_2 y_2 z_2}} + \right. \\ \left. + d^2 [8 k_y (x_1 + x_2 + l_r) + 5,6 k_y d + 6 l_u] \right\}. \quad (18)$$

Весы проводникового материала обмоток трансформатора в кг.

$$Q_{m1} \cong 3 \gamma_m q_{m1} l_{m1} 10^{-3} \cong m_1 \frac{y_1 + \delta_1}{z_1 (x_1 + x_2 + 3 \delta_{12})}, \\ Q_{m2} \cong 3 \gamma_m q_{m2} l_{m2} 10^{-3} \cong m_2 \frac{y_2 + \delta_2}{z_2 (x_1 + x_2 + 3 \delta_{12})}, \quad (19)$$

где

$$m_1 \cong \frac{10 \gamma_m B u_p S \rho \cdot 10^{-3}}{4 K k_r k_{y1} \sigma_1}, \\ m_2 \cong \frac{10 \gamma_m B u_p S \rho \cdot 10^{-3}}{4 K k_r k_{y2} \sigma_2}. \quad (20)$$

Интересно подчеркнуть здесь, что, как это видно из (19), вес проводникового материала обмотки (при постоянстве исходных данных) прямо пропорционален шагу катушки ($y + \delta$) и обратно пропорционален полупериметру катушки (z) и приведенному каналу рассеяния обмоток ($x_1 + x_2 + 3 \delta_{12}$).

В результате веса активных материалов и основные размеры трансформатора оказались выраженными через размеры катушек обмоток x_1, y_1, x_2 и y_2 . Одну из этих переменных можно еще исключить, воспользовавшись условием равенства намагничивающих сил обмоток фазы:

$$\frac{k_1 x_1 y_1}{y_1 + \delta_1} \Delta_1 = \frac{k_2 x_2 y_2}{y_2 + \delta_2} \Delta_2. \quad (21)$$

Тогда останется еще три независимых переменных. Исследование на минимум расчетных затрат (1), являющихся функцией трех независимых переменных, при сложности выражений для Q_c и Q_m , представляет большую трудность. В связи с этим рассмотрим здесь частный случай, когда $\Delta_1 = \Delta_2$. Этот случай соответствует задаче наиболее рационального использования проводникового материала и в значительной степени совпадает с заводской практикой. Имея в виду, что k_2 практически не зависит от мощности трансформатора, в качестве независимых переменных выгодно принять x_2 и y_2 . Тогда из (21) при $k = k_2 : k_1$.

$$y_1 = \frac{k \delta_1 x_2 y_2}{x_1 (y_2 + \delta_2) - k x_2 y_2}. \quad (22)$$

Решив совместно (10) и (22) при $k_{n1} = k_{n2}$; $k_{y1} = k_{y2}$; $\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ и $\Delta_1 = \Delta_2$

находим выражение для x_1 :

$$x_1 = \frac{(k_n k x_2 y_2 + \sigma \delta_1 z_2) + \sqrt{(k_n k x_2 y_2 + \sigma \delta_1 z_2)^2 - 4 k_n k \delta_1 x_2 y_2 (y_2 + \delta_2)}}{2 k_n (y_2 + \delta_2)} \quad (23)$$

Выражение расчетных затрат (1) при принятых допущениях:

$$Z = (A_1 + D B^2) Q_c + (\beta A_2 + E \Delta^2) Q_m = \\ = \frac{k_c \pi \gamma_c}{4} 10^{-3} (A_1 + D B^2) \cdot \varphi(x_2, y_2), \quad (24)$$

$$\text{где } \varphi(x_2, y_2) = 3 N(y_2 + \delta_2) \left[\frac{1}{\sqrt{x_2 y_2 z_2}} + \frac{M \left(n + m \frac{z_2}{x_2 y_2} \right)}{z_2 (x_1 + x_2 + 3 \delta_{12})} \right] + \\ + d^2 \{ k_{\alpha} [8(x_1 + x_2 + l_{\Gamma}) + 5,6 d] + 6 l_{\Pi} \} \quad (25)$$

$$\text{Здесь: } M = \frac{8 k_2 P \gamma_m}{k_c \gamma_c}; \quad n = \frac{\beta A_2}{A_1 + D B^2}; \quad m = \frac{E x_2^2}{A_1 + D B^2} \quad (26)$$

Определение критических значений x_2 и y_2 , соответствующих минимальным расчетным затратам (24), можно произвести путем минимизации функции (25). Однако общее аналитическое решение этой задачи не представляется возможным в виду ее сложности. Поэтому в пределах данной статьи рассмотрим численное определение критических значений x_2 и y_2 для ряда подстанционных двухобмоточных трансформаторов 110 кВ без устройств для регулирования напряжения.

Численное исследование (25) на минимум производилось на счетно-решающей машине (СО АН СССР) для трансформаторов с сердечниками из холоднокатанной стали при следующих исходных данных (размерности в предыдущем тексте): $\kappa_c = 0,82$; $\kappa_{x1} = \kappa_{x2} = 0,7$; $\kappa_{y1} = \kappa_{y2} = 0,9$; $\kappa_{\alpha} = 1,05$; $\kappa_2 = 0,8$; $\kappa_m = 0,7$ [3]; $\kappa_n = 0,8$ [3]; $k_{\Gamma} = 0,95$; $\kappa_T = 0,7$; $\delta_1 = 0,8$; $\delta_2 = 0,6$; $\delta_{02} = 1,5$; $\delta_{12} = 5$; $\delta_{11} = 6$; $l_{\Pi} = 9$; $u_p = 0,105$; $B = 16500$; $a_c = 0,8 \cdot 10^{-11}$ кВт/кг; $\gamma_c = 7,65$; $K = 1,1 \cdot 10^{-4}$; $p_n = 0,125$; $p_{\alpha} = 0,06$; $C_1 = 124$ руб/кВт; $C'_2 = 0,007$ руб/кВт-ч; $C''_2 = 0,009$ руб/кВт-ч; $\tau = 4000$ час; $t = 8700$ час; $\left(\frac{k_n S_m}{S} \right)^2 = 0,4$ [3]; $\beta_p = 1,5$ руб/квар; $\alpha_p = 0,046$ квар/кг.

Значения принятого коэффициента k_1 для трансформаторов различной мощности S с обмотками из меди и алюминия приведены в таблице №1.

Таблица № 1.

S (мгва)	5,6	10	20	31,5 и выше
k_1 (медь)	0,4	0,48	0,53	0,6
k_1 (алюм.)	0,42	0,50	0,55	0,6

Принято для меди: $\rho_m = 2,14 \cdot 10^{-6}$; $\alpha_m = 2,4 \cdot 10^{-7}$ кВт/кг; $\gamma_m = 8,9$; $\beta = 3,2$; $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,15$.

Принято для алюминия: $\rho_a = 3,6 \cdot 10^{-6}$; $\alpha_a = 1,33 \cdot 10^{-6}$ кВт/кг; $\gamma_a = 2,7$; $\beta = 4$; $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,14$.

Исследование (25) производилось в области $x_2 = 3-10$ и $y_2 = 0,5-10$ с интервалом через 0,5. Результаты исследования приведены на рисунках 2-6. На рис. 2 приведена зависимость $\varphi(x_2, y_2)$ от x_2 при $y_2 = 1,5$ для трансформаторов мощностью 5,6-60 мгва с обмотками из меди, а на рис. 3 с обмотками из алюминия при $y_2 = 2$. Как видно из этих фигур величина $\varphi(x_2, y_2)$ имеет минимум при некото-

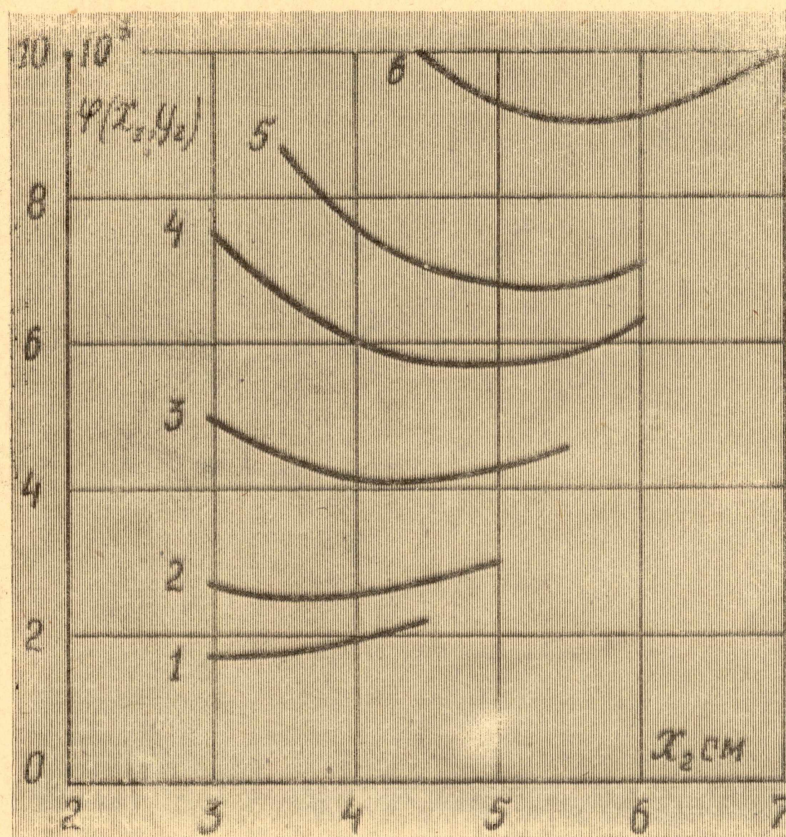


Рис. 2. Кривая 1 для трансформатора 5,6 мва;
2 — 10; 3 — 20; 4 — 31,5; 5 — 40,5; 6 — 60 мва (медь).

рых x_2 , зависящих от мощности трансформатора. При этом расчетное значение x_2 можно принимать отличным от критического по крайней мере на $\pm 0,5$ см без существенного увеличения расчетных затрат. Но надо иметь в виду, что уменьшение x_2 для данного трансформатора ведет к понижению расхода активных материалов и к резкому увеличению высоты сердечника, а увеличение x_2 — к обратным результатам.

Зависимость критических значений x_2 от мощности трансформатора с обмотками из меди и алюминия по данным рисунков 2 и 3 приведена на рис. 6 и может быть использована для определения расчетного x_2 .

На рисунках 4 и 5 приведена зависимость от y_2 минимальных значений $\varphi(x_2, y_2)$ найденных по x_2 . Эта зависимость также имеет минимум, который для трансформаторов разной мощности с обмотками из меди находится в пределах $y_2 = 1,5 + 2$. Как видно из рис. 4, минимум по y_2 настолько тупой, что расчетное значение y_2 может сильно отличаться от критического, особенно в сторону увеличения. Так, при увеличении значения функции (25) над наименьшим минимумом на 2% для трансформаторов с обмотками из меди 5,6 + 60 мва расчетное y_2 может быть принято в пределах от 1 до 3 см.

Для трансформаторов с обмотками из алюминия мощностью 5,6 + 31,5 мва (рис. 5) минимальное значение функции (25) находится около $y_2 = 5$. При увеличении минимума (25) над наименьшим его значением на 2%, можно принять расчетное значение $y_2 = 2 + 10$.

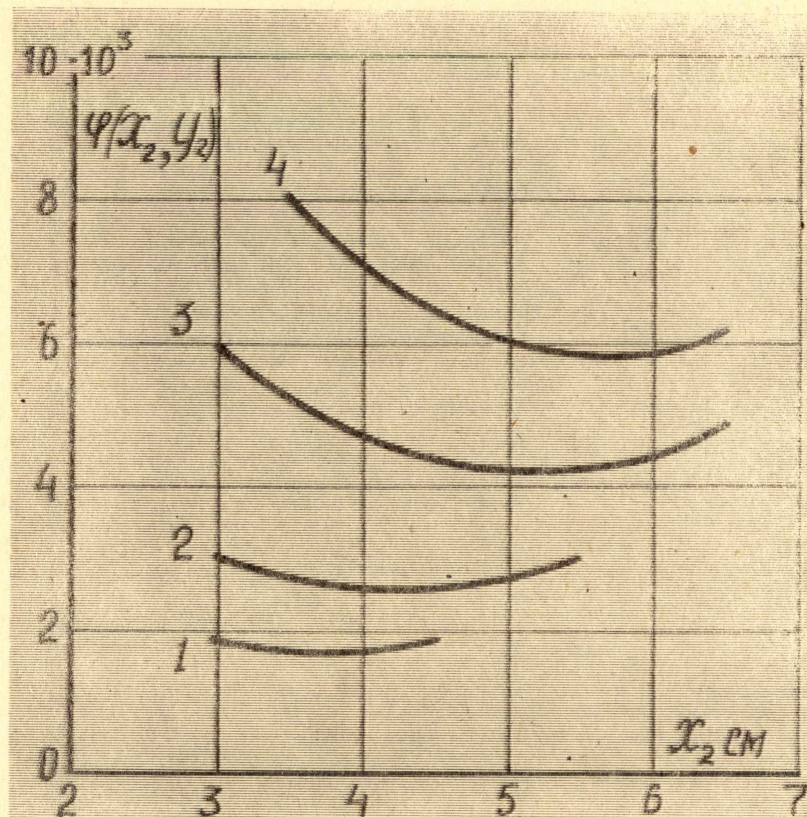


Рис. 3. Кривая 1 для трансформатора 5,6 мва;
2 — 10; 3 — 30; 4 — 31,5 мва (алюминий).

Это свойство функции (25) очень важно, так как с уменьшением расчетного значения y_2 резко снижается расход проводникового материала и вес трансформатора.

В таблице 2 приведены основные размеры некоторых подстанционных трансформаторов с обмотками из меди и алюминия, вычисленные по изложенной выше методике.

Расчетное значение y_2 принято с превышением расчетных затрат над минимальными не более 2% и для трансформаторов с обмотками из меди равно 1 см, а с обмотками из алюминия 2 см.

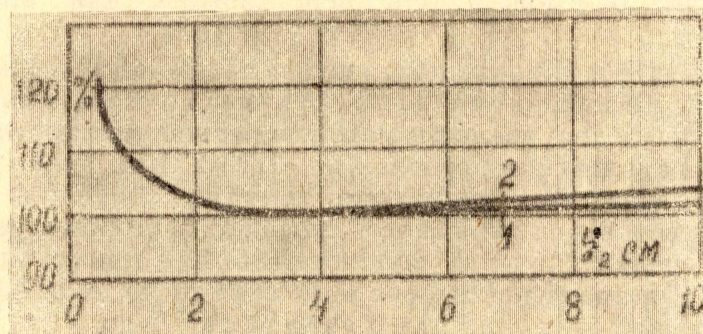


Рис. 4. Кривая 1 для трансформатора 5,6 мва;
2 — 60 мва (медь).

В пункте 9 таблицы 2 высота обмотки h увеличена на 5% до h' для размещения транспозиции обмотки низшего напряжения и для усиления изоляции и снижения плотности тока в крайних катушках обмотки высшего напряжения. Подобным же способом можно учесть высоту стержня для размещения регулировочных витков обмотки.

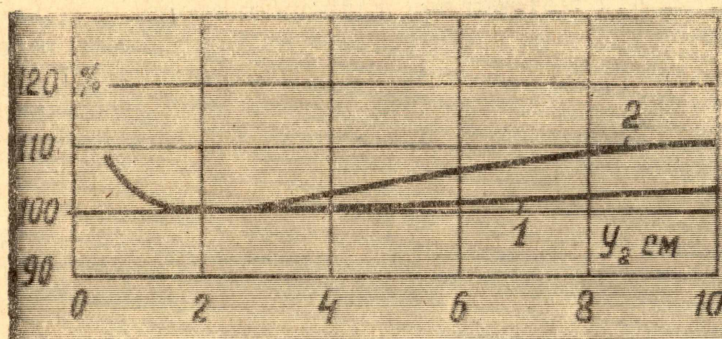


Рис. 5. Кривая 1 для трансформатора 5,6 мва;
2 — 31,5 мва (алюминий).

В пункте 18 указано механическое напряжение в материале обмоток, вызываемое радиальными усилиями, возникающими при коротком замыкании за трансформатором. Это напряжение определялось по выражению [3], приведенному к следующему виду:

$$\sigma_p = C \frac{\Delta_1^2 q_{m1} l_m}{h}, \quad (27)$$

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

Как видно из этой таблицы, напряжения в материале обмоток для исследовавшихся мощностей трансформаторов оказались в пределах допустимых.

Таблица 2.

№ п/п.	Мощность трансформатора S мва	Обмотки из меди				Обмотки из алюминия		
		5,6	20	31,5	60	5,6	20	31,5
1	y_2 принято, см	1	1	1	1	2	2	2
2	x_2 по рис. 6, см	3,0	4,4	5,0	5,6	3,7	5,0	5,7
3	x_1 из (23), см	5,15	6,3	6,7	7,55	6,45	7,1	7,6
4	y_1 из (22), см	2,14	1,67	1,31	1,8	4,16	2,97	2,67
5	$\Delta_1 = \Delta_2$ из (10), а/см ²	416	397	393	388	238	235	229
6	d из (16), см	33,5	49,0	56,5	64,5	33,2	45	51
7	h из (13), см	112	134	142	188	128	193	211
8	$h_1 = 1,05 h$, см	118	141	149	197	135	203	221
9	H из (2), см	136	159	167	215	153	221	239
10	a из (8), см	35,3	40,4	42,4	45,3	39,3	43,2	45,6
11	l_m из (4), см	152,5	210	236,5	266	157	201,5	224
12	l_c из (6), см	731	912	985	1187	803	1089	1185
13	$q_{m1} = q_{m2}$ из (7), см ²	168	294	355	526	291	594	739
14	q_c из (8), см ²	723	1515	2055	2680	710	1300	1670
15	$Q_m = 6 \gamma_m q_m l_m, T$	1,37	3,3	4,49	7,48	0,74	1,94	2,68
16	$Q_c = \gamma_c q_c l_c, T$	4,07	10,8	15,5	24,3	4,36	10,80	15,2
17	σ_p из (27), кг/см ²	226	415	521	640	115	195	235
18	P_c (потери в стали кВт)	8,86	23,5	33,7	52,8	9,5	23,5	33,1
19	P_m (потери в меди кВт)	57,1	125	166	270	56	142	187
20	Z из (1), руб.	2980	7350	10180	16320	3120	7600	10520

*) Отношение напряжений в материале обмоток $\sigma_{p1} : \sigma_{p2} = \Delta_1 : \Delta_2$

Интересно еще сравнить современные заводские трансформаторы с трансформаторами, размеры которых определены по предлагаемой методике. Это сравнение возможно только для трансформаторов с сердечниками из горячекатанной стали и с обмотками из меди, для которых имеются в литературе данные.

Веса активных материалов трансформаторов с сердечниками из горячекатанной стали и с обмотками из меди были определены для $k_T = 0,5$; $B = 14500$ гс; $\sigma_c = 1,2 \cdot 10^{-11}$ квт/кг; $\beta = 3,7$ и приведены в пункте 2 таблицы 3. В пункте 1 приведены веса активных материалов заводских трансформаторов, а в пункте 3 — для трансформаторов с холоднокатанной сталью.

Таблица 3.

№	Мощность трансформаторов мва	31,5		60	
		Q_c	Q_m	Q_c	Q_m
1	Для заводских трансформаторов . . .	22,12	5,23	37,6	9,76
2	Для трансформаторов с горячекатанной сталью Э-42	18,0	4,69	27,4	7,8
3	Тоже с холоднокатанной сталью Э-330	15,5	4,5	24,3	7,5

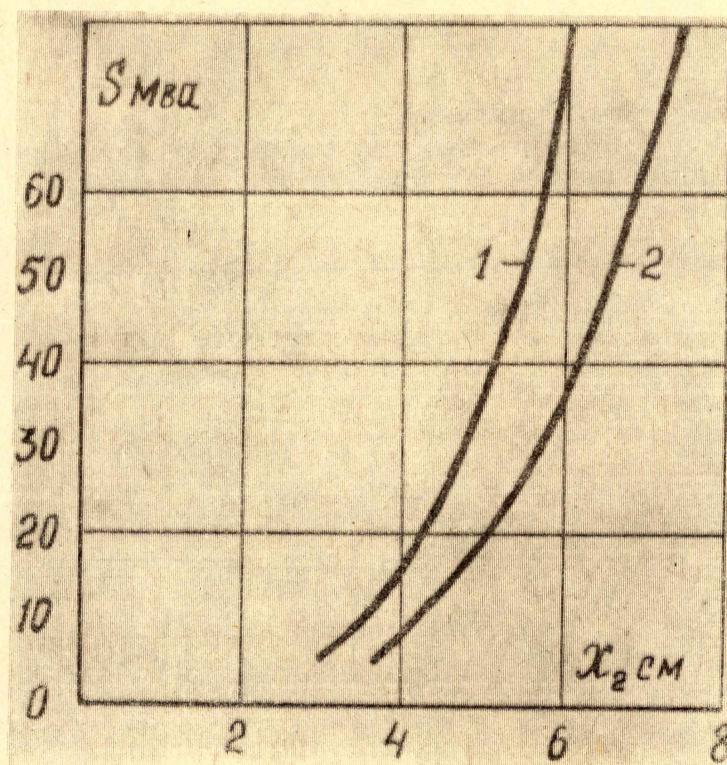


Рис. 6. Кривая 1 для меди и 2 для алюминия.

В заключение заметим, что предлагаемый метод несмотря на сложность, может найти применение для заводского проектирования и общего исследования трансформаторов. Сложность метода окупается его универсальностью и достаточной точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутявин И. Д., К определению оптимальных размеров трехфазных двухобмоточных трансформаторов, см. выше.
2. Постников И. М., Проектирование электрических машин. Гостехиздат, СССР, 1960.
3. Тихомиров П. М., Расчет трансформаторов. Госэнергоиздат, 1962.