

К ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ТРЕХФАЗНЫХ ДВУХОБМОТОЧНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

И. Д. КУТЯВИН, Г. В. ДЕЛЬ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций и сетей)

В [1] приводится методика технико-экономического определения оптимальных размеров трансформаторов при постоянных коэффициентах заполнения проводниковым материалом площади сечения катушек первичной и вторичной обмоток (K_1 и K_2). В действительности эти коэффициенты являются переменными, зависящими от соотношения размеров элементарных проводников и их изоляции. Решение задачи с учетом переменности коэффициентов K_1 и K_2 увеличивает точность результата и приводится ниже.

Уравнения мощности трансформатора, напряжения короткого замыкания, теплового баланса катушек первичной (ВН) и вторичной (НН) обмоток, равенства намагничивающих сил, напряжения в материале наружной обмотки при коротком замыкании за трансформатором можно представить, соответственно, в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} S &= KB k_1 x_1 y_1 \Delta_1 \cdot \frac{d^2 h}{y_1 + \delta_1}, \\ u_p &= \frac{K_p k_1 x_1 y_1 \Delta_1}{B d^2 (y_1 + \delta_1)} (d + 2x_2 + l) (x_1 + x_2 + 3\delta_{12}), \\ 2\sigma_1 k_{y1} (k_{n1} x_1 + y_1) &= \rho k_1 x_1 y_1 \Delta_1^2, \\ 2\sigma_2 k_{y2} (k_{n2} x_2 + y_2) &= \rho k_2 x_2 y_2 \Delta_2^2, \\ \frac{k_1 x_1 y_1 \Delta_1}{y_1 + \delta_1} &= \frac{k_2 x_2 y_2 \Delta_2}{y_2 + \delta_2}, \\ \sigma_p &= K_m \frac{k_1 x_1 y_1 \Delta_1^2}{y_1 + \delta_1} (d + 2x_2 + l). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) принято:

$$\left. \begin{aligned} K &= 3,33 \cdot \pi \cdot f \cdot k_c \cdot 10^{-11}, \\ K_p &= \frac{8\pi^2 \cdot k_r}{3,33 \cdot k_c}, \\ K_m &= 2,04\pi \frac{k_r \cdot k_{y\delta}}{u_K^2} \cdot 10^{-8}, \\ l &= 2\delta_{02} + \delta_{12}, \\ k_{n1} &= k_{x1} : k_{y1}; \quad k_{n2} = k_{x2} : k_{y2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Все обозначения в (1) и (2) соответствуют [1], за исключением y , δ и $k_{уд}$. Здесь y — осевой размер голого проводника катушки (рис. 1); δ — осевой размер радиального масляного канала между катушками плюс изоляция элементарного проводника на две стороны (i); $k_{уд} = 1,8$ — ударный коэффициент.

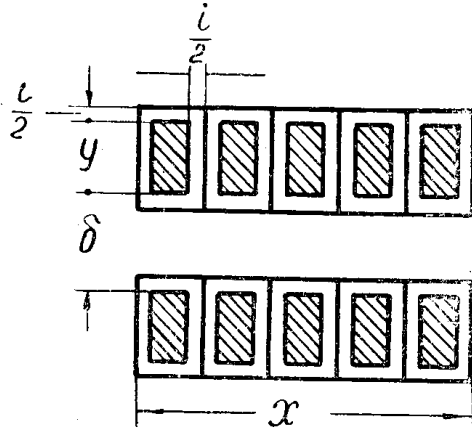


Рис. 1.

Число витков в катушке

$$W_k = \frac{kxy}{q_v} = \frac{kxy\Delta}{I_n}, \quad (3)$$

где q_v — сечение одного витка, I_n — номинальный ток обмотки.

Сечение проводникового материала в катушке

$$kxy = (x - miw_k) y. \quad (4)$$

Число параллельных ветвей обмотки (m) может быть принято постоянным, определяемым по величине номинального тока

обмотки (I_n) и току одной параллельной ветви (I_v).

Подставляя (3) в (4), получим

$$k = \frac{1}{1 + \lambda\Delta y}, \quad (5)$$

где

$$\lambda = \frac{im}{I_n} = \frac{i}{I_v} \quad (6)$$

Тогда коэффициенты заполнения площади сечения катушек проводниковым материалом

$$k_1 = \frac{1}{1 + \lambda_1\Delta_1 y_1}; \quad k_2 = \frac{1}{1 + \lambda_2\Delta_2 y_2}. \quad (7)$$

Коэффициенты k_1 и k_2 оказались выраженными через принятые переменные, число которых не увеличилось. Введение числа параллельных ветвей (m_1, m_2) как исходных при расчете, делает это число целым.

Подставляя (7) в систему уравнения (1), получим

$$\left. \begin{aligned} S &= KB \frac{x_1 y_1 \Delta_1 h d^2}{(1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)(y_1 + \delta_1)}, \\ u_p &= K_p \frac{x_1 y_1 \Delta_1 (x_1 + x_2 + 3\delta_{12})}{B d^2 (1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)(y_1 + \delta_1)} (d + 2x_2 + l), \\ k_{п1} x_1 + y_1 &= L_1 \Delta_1^2 \frac{x_1 y_1}{1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1}, \\ k_{п2} x_2 + y_2 &= L_2 \Delta_2^2 \frac{x_2 y_2}{1 + \lambda_2 \Delta_2 y_2}, \\ \frac{x_1 y_1 \Delta_1}{(1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)(y_1 + \delta_1)} &= \frac{x_2 y_2 \Delta_2}{(1 + \lambda_2 \Delta_2 y_2)(y_2 + \delta_2)}; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\sigma_p = K_m \frac{x_1 y_1 \Delta_1^2}{(1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)(y_1 + \delta_1)} (d + 2x_2 + l), \quad (9)$$

где

$$L_1 = \frac{\rho}{2\sigma_2 k_{y1}}; \quad L_2 = \frac{\rho}{2\sigma_2 k_{y2}}. \quad (10)$$

В трансформаторах средней мощности 110 кв применяются в основном два типа обмоток: непрерывная катушечная и винтовая. Оба типа обмоток имеют одинаковое математическое описание, применимое для катушечных обмоток. При этом надо учитывать, что число витков в условной катушке винтовой обмотки обратно пропорционально числу заходов (n_3).

$$\omega_{k2} = \frac{1}{n_3}. \quad (11)$$

Последнее обстоятельство вынуждает делить рассматриваемые трансформаторы в зависимости от применяемых в них обмоток на две группы:

1. Трансформаторы с сочетанием обмоток — непрерывная катушечная (ВН) — непрерывная (НН) [Нр.—Нр.].

2. Трансформаторы с сочетанием обмоток — непрерывная (ВН) и винтовая (НН) [Нр.—Вт.].

К первой группе можно отнести трансформаторы мощностью 5,6—15 мва при 110 кв. Ко второй относятся трансформаторы большей мощности.

При коротком замыкании за трансформатором первой группы механическое напряжение в материале обмоток будет меньше допустимого, поэтому для исследования параметров и размеров этих трансформаторов достаточно системы уравнений (8). Для исследования трансформаторов второй группы, начиная с некоторой мощности, когда механические напряжения в материале обмоток будут превышать допустимые, потребуется учет уравнения (9).

В настоящей статье приводятся результаты исследования трансформаторов первой группы с помощью системы (8), которая содержит пять уравнений при восьми неизвестных — x_1 , x_2 , y_1 , y_2 , Δ_1 , Δ_2 , d и h .

Наименьшие расчетные затраты на изготовление и эксплуатацию трансформатора будут иметь место при равенстве плотностей тока обмоток, выполненных из одинакового материала. Это дает нам еще одно уравнение $\Delta_1 = \Delta_2$. Предварительный анализ показал, что в качестве независимых переменных наиболее рационально использовать переменные x_1 и y_1 . В этом случае система уравнений (8) и условие $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$ дают следующие выражения для остальных переменных:

$$\Delta = \frac{\lambda_1 + \sqrt{\lambda_1^2 + 4L_1 \frac{z_1}{y_1}}}{2L_1 z_1}, \quad (12)$$

где

$$z_1 = \frac{x_1}{k_{n1} x_1 + y_1};$$

$$y_2 = \frac{U_1 + \sqrt{U_1^2 + 4k_{n2} \delta_2 U_2}}{2U_2}, \quad (13)$$

где

$$U_1 = k_{n2} - \delta_2 \Delta (L_2 \Delta - k_{n2} \lambda_2),$$

$$U_2 = \Delta (L_2 \Delta - k_{n2} \lambda_2) - \frac{(1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)(y_1 + \delta_1)}{x_1 y_1};$$

$$x_2 = \frac{x_1 y_1 (y_2 + \delta_2) (1 + \lambda_2 \Delta_2 y_2)}{y_2 (y_1 + \delta_1) (1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)}, \quad (14)$$

$$d = \frac{V_1 + \sqrt{V_1^2 + 4V_1 V_2}}{2}, \quad (15)$$

где

$$V_2 = 2x_2 + l;$$

$$V_1 = \frac{K_p x_1 y_1 \Delta_1 (x_1 + x_2 + 3\delta_{12})}{u_p (y_1 + \delta_1) (1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)},$$

$$h = \frac{S}{K} \cdot \frac{(y_1 + \delta_1) (1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)}{x_1 y_1 \Delta_1 d^2}. \quad (16)$$

Выражение расчетных затрат на трансформатор

$$З = \frac{\pi \gamma_c k_c}{4} (A + DB^2 + 1,5 \alpha_p) \cdot \varphi(x_1, y_1), \quad (17)$$

$$\varphi(x_1, y_1) = N \frac{(y_1 + \delta_1) (1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)}{x_1 y_1 \Delta_1} \left[1 + M (\beta A + E \Delta^2) \frac{d_{co}}{d_{12} \Delta (x_1 + x_2 + 3\delta_{12})} \right]$$

$$+ d^2 [8k_{\pi} (x_1 + x_2) + 5,6 k_{\pi} d + 8k_{\pi} l_r + 6l_u] \cdot 10^{-3}, \quad (18)$$

где

$$M = \frac{8\gamma_m \cdot u_p}{K_p \gamma_c k_c (A + DB^2 + 1,5 \alpha_p)}. \quad (19)$$

$$N = \frac{3S}{K} \cdot 10^{-3}; \quad l_r = \delta_{02} + \delta_{12} + 0,5 \delta_{11}. \quad (20)$$

Диаметр среднего витка

$$d_{cp.} = d + 0,5 x_1 + 1,5 x_2 + l. \quad (21)$$

Диаметр канала рассеяния

$$d_{12} = d + 2x_2 + l. \quad (22)$$

Функция $\varphi(x_1, y_1)$, имеющая выражение (18), была исследована на минимум для трансформаторов 110/11 кв. мощностью 5,6; 7,5; 10 и 15 Мва. Были приняты следующие исходные данные: соединение обмоток λ/Δ , материал — медь, $u_p = 0,105$; $B = 16500$ гс; $\rho = 2,14 \cdot 10^{-6}$ ом·см; $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,15$ вт/см²; $m_1 = 1$; $i_1 = 0,14$; $i_2 = 0,05$; $\delta_1 = 0,94$; $\delta_2 = 0,66$, $l = 8$; $l_r = 9,5$; $k_{x1} = k_{x2} = 0,7$; $k_{y1} = k_{y2} = 0,91$ (все линейные размеры в см).

Вычислено: $L_1 = L_2 = 11,8 \cdot 10^{-6}$; $K = 4,3 \cdot 10^{-9}$; $K_p = 2,75$; $M = 1,74 \cdot 10^4$. Параметры, зависящие от мощности, приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	S, Мва	5,6	7,5	10	15
1	I_1, a	29,4	39,4	52,5	78,8
2	I_2, a	169	227	303	455
3	m_2	2	2	3	4
4	$\lambda_1 \cdot 10^{-4}$	47,6	35,5	26,7	17,8
5	$\lambda_2 \cdot 10^{-4}$	5,92	4,41	4,95	4,4
6	$N \cdot 10^5$	2,36	3,17	4,23	6,35

Постоянные для экономического расчета: $K_T = 0,96$ и $A = 0,1775$ для $S = 5,6$ и $7,5$ Мва; $k_T = 0,9$ и $A = 0,1665$ для $S = 10$ и 15 Мва; $\beta = 3,2$; $D = 45,8 \cdot 10^{-11}$, $E = 47 \cdot 10^{-7}$; $\alpha_p = 19,3$ ва/кг. Исследование проводилось в области $y_1 = 0,5 - 2,0$ см. Основные результаты этого исследования показаны в табл. 2.

Анализ результатов исследования (табл. 2) указывает на слабую зависимость расчетных затрат от осевого размера катушки — y_1 . Оптимальные значения y_1 для трансформаторов исследуемых мощностей остаются примерно постоянными и равными 1,1 см. Это позволяет принимать при исследованиях $y_1 = \text{const}$. Рекомендуемый предел $y_1 = 0,8 \div 1,6$ см — без существенного увеличения затрат по сравнению с минимумом (табл. 2).

Оптимальные значения y_2 почти для всего диапазона мощностей, исследуемых трансформаторов получились неконструктивно малыми (табл. 2). Это объясняется тем, что при исследовании было принято $\lambda_2 \ll \lambda_1$, $\delta_1 = \delta_2$ и $\Delta_1 = \Delta_2$.

Таблица 2

№ п/п	S, Мва	y_1 , см	0,5	0,7	1,0	1,1	1,5	2,0
1	5,6	x_1 , см	7,3	7,5	7,9	8,0	8,7	—
		y_2 , см	0,22	0,26	0,30	0,31	0,33	—
		$\varphi(x_1, y_1)$	2220	2175	2145	2142	2150	2160
		$\varphi\%$	102,7	101,2	100,2	100	100,4	100,8
2	7,5	x_1	7,1	7,3	7,5	7,6	8,4	—
		y_2	0,268	0,328	0,40	0,42	0,47	—
		$\varphi(x_1, y_1)$	2625	2575	2545	2542	2560	2600
		$\varphi\%$	103,2	101,3	100,1	100	100,7	102,3
3	10	x_1	7,1	7,1	7,20	7,25	7,6	—
		y_2	0,326	0,415	0,524	0,55	0,666	—
		$\varphi(x_1, y_1)$	3130	3060	3020	3020	3050	3110
		$\varphi\%$	103,6	101,3	100	100	101,0	103,0
4	15	x_1	7,2	7,2	7,2	7,2	7,4	—
		y_2	0,39	0,5	0,65	0,69	0,89	—
		$\varphi(x_1, y_1)$	4100	4010	3980	3980	4035	4140
		$\varphi\%$	103,0	100,8	100	100	101,4	104,0

Увеличение оптимального y_2 до приемлемого конструктивного значения можно получить за счет увеличения σ_2 и λ_2 при сохранении $\Delta_1 = \Delta_2$. Это можно показать, воспользовавшись уравнением теплового баланса катушки вторичной обмотки (8). Если пренебречь величиной y_2 в левой части (8) по сравнению с $\kappa_{п2}x_2$ и решить это уравнение относительно y_2 , то получим

$$y_2 = \frac{\kappa_{п2}}{\Delta \left(\frac{\rho \Delta}{2\kappa_{y4}\sigma_2} - \kappa_{п2}\lambda_2 \right)} \quad (23)$$

Увеличение σ_2 до значения $\sigma_2 > \sigma_1$ вполне оправдано несмотря на худшие условия охлаждения вторичной обмотки, так как толщина изоляции провода этой обмотки i_2 намного меньше i_1 . Следовательно, при незначительном увеличении перепада температуры в изоляции провода вторичной обмотки можно увеличить удельную тепловую нагрузку на ее поверхность до уровня $\sigma_2 > \sigma_1$.

Определение σ_2 , необходимое для получения конструктивного $y_2 = \kappa' y_1$, можно произвести, если использовать (23) при условии $\kappa_{п1} = \kappa_{п2} = \kappa_{п}$ и $\kappa_{y1} = \kappa_{y2} = \kappa_y$

$$\sigma_2 = \frac{\kappa'}{\frac{1}{\sigma_1} + \frac{2\kappa_y \kappa_{п}}{\rho \Delta} (\kappa' \lambda_2 - \lambda_1)}. \quad (24)$$

Для предварительного определения σ_2 можно принять $\Delta = 400$ а/см² и $\kappa' = 0,7 \div 1$.

Однако одного увеличения σ_2 для получения конструктивного y_2 может оказаться в большинстве случаев недостаточно в силу $\lambda_2 \ll \lambda_1$. Поэтому одновременно следует увеличивать и λ_2 . Идеальным было бы достижение условия $\kappa' \lambda_2 - \lambda_1 = 0$, которое удовлетворяется при токе ветви вторичной обмотки

$$I_{в2} = I_1 \frac{\kappa' i_2}{i_1}. \quad (25)$$

Но при всем этом надо иметь в виду, что всякое искусственное увеличение y_2 будет приводить к увеличению расчетных затрат. Приведенный способ увеличения y_2 до конструктивной величины может оказаться недостаточным для трансформаторов мощностью 1,8—5,6 Мва 110 кв. В этом случае проще всего отказаться от равенства плотностей тока в обмотках.

При $\Delta_1 \neq \Delta_2$ количество независимых переменных можно сократить до двух за счет принятия $y_1 = \text{const}$ на основании предыдущих исследований. Принимая в качестве независимых переменных x_2 и y_2 , получим из системы уравнений (8) выражения для остальных переменных.

$$\Delta_2 = \frac{\lambda_2 + \sqrt{\lambda_2^2 + 4L_2 \frac{z_2}{y_2}}}{z_2}, \quad \text{где } z_2 = \frac{x_2}{\kappa_{п2} x_2 + y_2}; \quad (26)$$

$$\Delta_1 = \frac{\left(\kappa_{п1} \lambda_1 + \frac{y_1 X_1}{y_1 + \delta_1} \right) + \sqrt{\left(\kappa_{п1} \lambda_1 + \frac{y_1 X}{y_1 + \delta_1} \right)^2 + 4L_1 \cdot \frac{\kappa_{п1}}{y_1}}}{2L_1}, \quad (27)$$

где

$$X = \frac{(y_2 + \delta_2)(1 + \lambda_2 \Delta_2 y_2)}{x_2 y_2 \Delta_2};$$

$$x_1 = \frac{(y_1 + \delta_1)(1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)}{X y_1 \Delta_1}. \quad (28)$$

Выражения для d и h аналогичны (15) и (16). Выражение расчетных затрат соответствует (17), но функция φ имеет следующий вид:

$$\varphi(x_2, y_2) = NX + d^2 \{ \kappa_{я} [5,6d + 8(x_1 + x_2) + 8l_r] + 6l_{ш} \} \cdot 10^{-3} +$$

$$+ \frac{M_3}{d^2} \left[(\beta A + E \Delta_1^2) \frac{d_{ср.1}}{\Delta_1} + (\beta A + E \Delta_2^2) \frac{d_{ср.2}}{\Delta_2} \right], \quad (29)$$

где

$$M_3 = \frac{4\gamma_M N}{\gamma_c K_c (A + DB^2 + 1,5\alpha_p)}; \quad (30)$$

$$d_{\text{ср.2}} = d + x_2 + 2\delta_{02}; \quad d_{\text{ср.1}} = d + x_1 + 2(x_2 + \delta_{02} + \delta_{12}). \quad (31)$$

Функция (29) исследована на минимум для трансформатора 10 Мва, при принятых выше исходных данных и при $y_1 = 0,7; 1,0; 1,5$. Результаты исследования приведены в табл. 3, где за абсолютный минимум функции принято $\varphi = 3060$ при $y_1 = y_2 = 1$. В пределах y_1 и y_2 , приведенных в табл. 3, функцию расчетных затрат практически можно считать постоянной.

Таблица 3

№ п/п	y_1 , см	y_2 , см	0,5	1	1,5
		$X_{2\text{опт.}}$, см	4,5	4,5	4,5
1	0,7	$\varphi(x_2, y_2)$	3090	3080	3100
		$\varphi\%$	101	100,6	101,3
2	1,0	$\varphi(x_2, y_2)$	3095	3060	3080
		$\varphi\%$	101,1	100	100,6
3	1,5	$\varphi(x_2, y_2)$	3090	3080	3095
		$\varphi\%$	101	100,6	101,1

Характер зависимости функции (29) от x_2 изображен на рис. 2, а на рис. 3 приводятся зависимости $x_1(x_2)$ для трех мощностей при

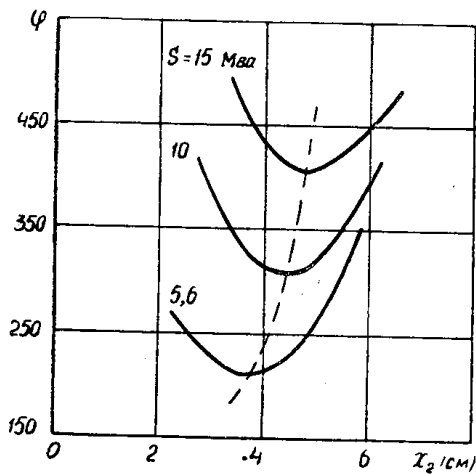


Рис. 2.

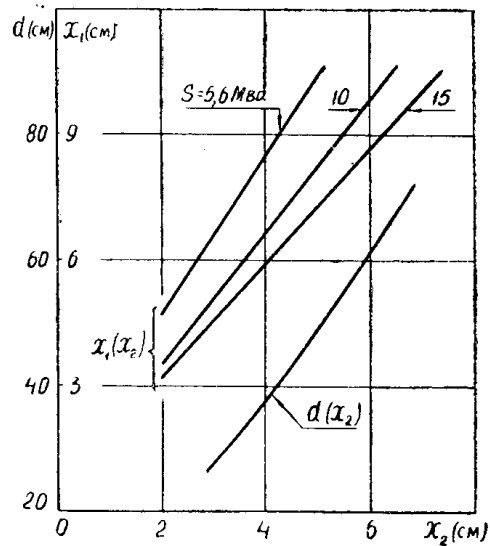


Рис. 3.

$y_1 = y_2 = 1,0$ см и $d(x_2)$ для $S = 10$ Мва и тех же y_1 и y_2 . Кривые $d(x_2)$ для трансформаторов 5, 6 и 15 Мва практически сливаются с кривой для $S = 10$ Мва. По этой же причине не удалось отразить зависимость

$d(x_2)$ для различных y_2 . Следует заметить, что минимум функции (29) оказался больше минимума функции (18) на 1,4%.

Вывод, сделанный выше о слабой зависимости расчетных затрат от величин y_1 и y_2 , позволяет свести число независимых переменных к одной, например, x_2 . Это дает возможность исследовать поведение затрат (29) при изменении любого из параметров: B, δ, U_k, K_c и т. д. Была

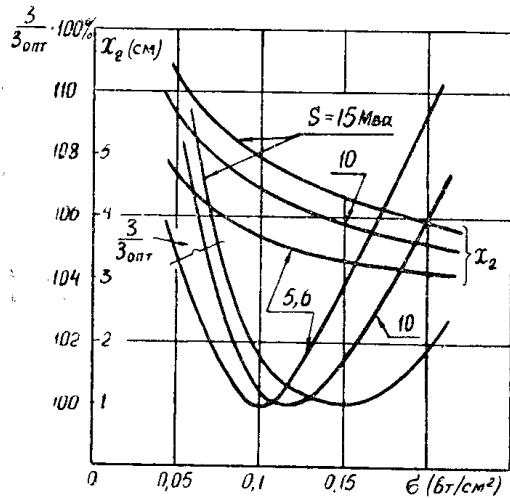


Рис. 4.

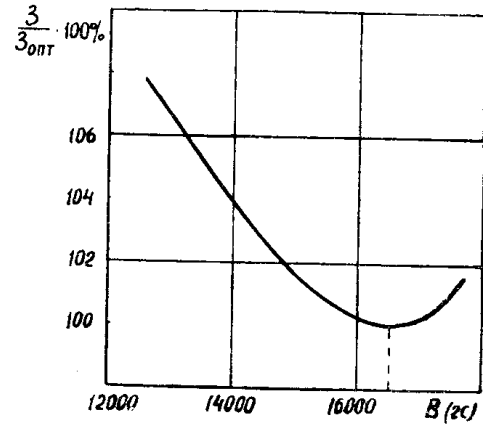


Рис. 5.

исследована зависимость затрат (29) от B и δ при $y_1 = y_2 = 1$ см и при принятых выше исходных данных. Оказалось, что расчетные затраты имеют минимум как по δ (рис. 4), так и по B (рис. 5). Оптимальная

Таблица 4

№ п.п.	$S,$ Mva	5,6	10	10	15
1	$y_1, см$	1,0	1,0	1,45	1,0
2	$y_2, см$	1,0	1,0	1,0	1,0
3	x_2 из рис. 4, см	3,7	4,1	4,3	4,3
4	x_1 из (28), см	7,75	6,95	7,95	6,6
5	Δ_2 из (26), $a/см^2$	306	346	345	386
6	Δ_1 из (27), $\frac{a}{см^2}$	471	453	418	455
7	d из (15), см	35	42	45,5	47,5
8	h из (16), см	110	109	89	109
9	$\sigma_1 = \sigma_2, вт/см^2$	0,09	0,12	0,12	0,15
10	σ_p из (9) $\frac{кг}{см^2}$	250	350	360	460
11	$Q_c, кг$	4650	6960	7870	9240
12	$Q_m, кг$	1455	1990	1910	2420
13	Q_{II} при $\beta = 3,2, кг$	9300	13340	14000	17000
14	$P_c, вт$	7250	10820	12150	14320
15	$P_m, вт$	54800	78500	68500	115000
16	$\Sigma P, вт$	62050	89320	80650	129320
17	z из (17), руб.	3430	4830	4880	6300

величина δ зависит от мощности, возрастая с ростом последней. Расчетные затраты Z (B) имеют очень слабую зависимость от мощности трансформатора (кривые Z (B) сливаются для мощностей 5,6 ÷ 15 Мва). Оптимальная индукция для стали Э-330 толщиной 0,35 мм по ГОСТ 802-58 (рис. 5) получилась равной 16500 гс. Ухудшение свойств стали снижает оптимальную индукцию и повышает минимальные затраты.

Исследование было проведено без учета добавочных потерь в предположении, что величина их для трансформаторов 5,6 ÷ 15 Мва сравнительно мала и на положение минимума Z (x_2) оказывает слабое влияние.

В табл. 4 приведены результаты расчета трансформаторов 110/10 кв. Для мощности 10 Мва расчет проведен для нескольких значений y_1 и y_2 . При этом расхождение минимальных расчетных затрат не превышает 1,6%. Особый интерес представляет то, что с увеличением осевых размеров катушек ощутимо падают потери в меди, в то время как вес меди остается практически постоянным. Это приводит к некоторому увеличению потерь и веса стали.

Таблица 5

№ п.п.	Вес и потери на 1 ква	Трансформаторы по табл. 4				Заводские		Фирма АЕГ (ФРГ)	
		5,6	7,5	10	15	6,3	16	10	15
1	$Q'_c, кг/квa$	0,83	0,755	0,787	0,616	1,08	0,87	—	—
2	$Q'_m, кг/квa$	0,26	0,24	0,191	0,161	0,244	0,178	—	—
3	Q'_n при $\beta=3,2$, —, —	1,66	1,53	1,4	1,130	1,86	1,44	—	—
4	$P'_c, вт/квa$	1,3	1,17	1,215	0,955	3,13	2,58	1,4	1,15
5	$P'_m, вт/квa$	9,8	8,65	6,85	7,67	8,59	6,32	7,5	6,66
6	$\Sigma P', вт/квa$	11,1	9,82	8,07	8,62	11,7	8,9	8,9	7,81

В табл. 5 приведены удельные веса и удельные потери на 1 ква мощности рассмотренных трансформаторов, а также трансформаторов 110 кв отечественного и зарубежного производства близких мощностей.

Выводы

1. Дан технико-экономический метод исследования оптимальных размеров трансформаторов с переменными коэффициентами заполнения площади катушек обмоток проводниковым материалом.

2. Для трансформаторов с сочетанием обмоток непрерывная — непрерывная зависимость расчетных затрат от осевого размера катушек обмоток ВН и НН очень слабая.

3. Отмечается существование минимума затрат по удельной тепловой нагрузке обмоток ($\sigma_{\text{опт}}$) и по индукции ($B_{\text{опт}}$).

4. Зависимости $d(x_2)$ и $x_1(x_2)$ носят прямолинейный характер.

5. Для всех мощностей трансформаторов, рассмотренных выше, напряжение на разрыв в проводе обмоток при коротком замыкании меньше допустимого.

6. С ростом осевого размера катушек Q_c и P_c слабо увеличиваются, P_m падают.

7. При одинаковых y высоты обмоток рассмотренных трансформаторов всех мощностей равны.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Д. Кутявин, Г. В. Дель, В. П. Краснов. К технико-экономическому определению оптимальных размеров подстанционных трехфазных двухобмоточных трансформаторов большой мощности, Известия ТПИ, том 130, 1964.

2. П. М. Тихомиров, Расчет трансформаторов, ГЭИ, 1962.
