

## 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  $u$ ,  $\delta$  и  $k_{уд}$ . Здесь  $u$  — осевой размер голого проводника катушки (рис. 1);  $\delta$  — осевой размер радиального масляного канала между катушками плюс изоляция элементарного проводника на две стороны ( $i$ );  $k_{уд} = 1,8$  — ударный коэффициент.

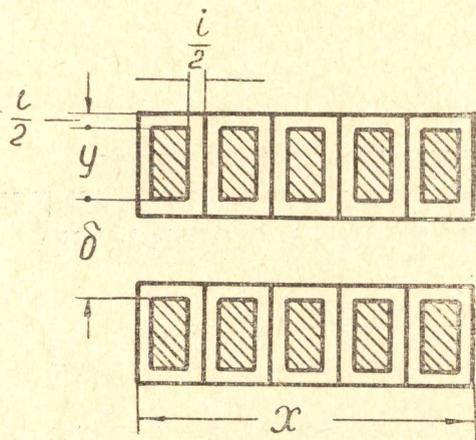


Рис. 1.

Число витков в катушке

$$W_k = \frac{kxu}{q_B} = \frac{kxu\Delta}{I_H}, \quad (3)$$

где  $q_B$  — сечение одного витка,  $I_H$  — номинальный ток обмотки.

Сечение проводникового материала в катушке

$$kxu = (x - m i \omega_k) u. \quad (4)$$

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

обмотки ( $I_H$ ) и току одной параллельной ветви ( $I_B$ ).

Подставляя (3) в (4), получим

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

где

$$\lambda = \frac{i m}{I_H} = \frac{i}{I_B}. \quad (6)$$

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 ( $n_3$ ).

$$\omega_{к2} = \frac{1}{n_3}. \quad (11)$$

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 —  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $d$  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

$$\begin{aligned} V_2 &= 2x_2 + l; \\ V_1 &= \frac{K_p x_1 y_1 \Delta_1 (x_1 + x_2 + 3\delta_{12})}{u_p (y_1 + \delta_1) (1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)}, \\ h &= \frac{S}{K} \cdot \frac{(y_1 + \delta_1) (1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)}{x_1 y_1 \Delta_1 d^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Выражение расчетных затрат на трансформатор

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

$$\begin{aligned} \varphi(x_1, y_1) &= N \frac{(y_1 + \delta_1) (1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)}{x_1 y_1 \Delta_1} \left[ 1 + M (\beta A + E \Delta^2) \frac{d_{co}}{d_{12} \Delta (x_1 + x_2 + 3\delta_{12})} \right] \\ &+ d^2 [8k_r (x_1 + x_2) + 5,6 k_r d + 8k_r l_r + 6l_u] \cdot 10^{-3}, \end{aligned} \quad (18)$$

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  $\lambda/\Delta$ , материал—медь,  $u_p = 0,105$ ;  $B = 16500$  гс;  $\rho = 2,14 \cdot 10^{-6}$  ом·см;  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,15$  вт/см<sup>2</sup>;  $m_1 = 1$ ;  $i_1 = 0,14$ ;  $i_2 = 0,05$ ;  $\delta_1 = 0,94$ ;  $\delta_2 = 0,66$ ;  $l = 8$ ;  $l_r = 9,5$ ;  $k_{x1} = k_{x2} = 0,7$ ;  $k_{y1} = k_{y2} = 0,91$  (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  $\sigma_2$  и  $\lambda_2$  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

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

Увеличение  $\sigma_2$  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  $\sigma_2$ , 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  $\sigma_2$  можно принять  $\Delta = 400 \text{ а/см}^2$  и  $\kappa' = 0,7 \div 1$ .

Однако одного увеличения  $\sigma_2$  для получения конструктивного  $y_2$  может оказаться в большинстве случаев недостаточно в силу  $\lambda_2 \ll \lambda_1$ . Поэтому одновременно следует увеличивать и  $\lambda_2$ . 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.

$$\Delta_2 = \frac{\lambda_2 + \sqrt{\lambda_2^2 + 4L_2 \frac{Z_2}{y_2}}}{y_2}, \quad \text{где } z_2 = \frac{x_2}{\kappa_{п2} x_2 + y_2}; \quad (26)$$

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

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  $\varphi$  имеет следующий вид:

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

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

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

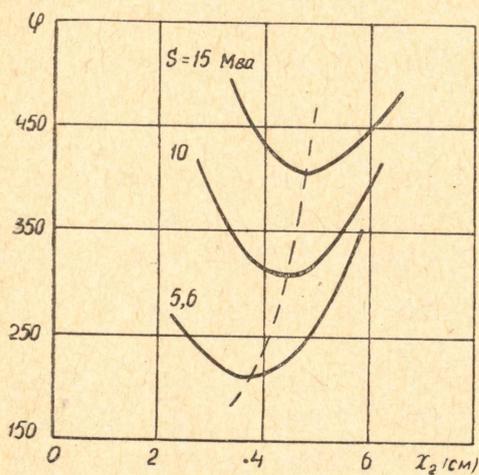


Рис. 2.

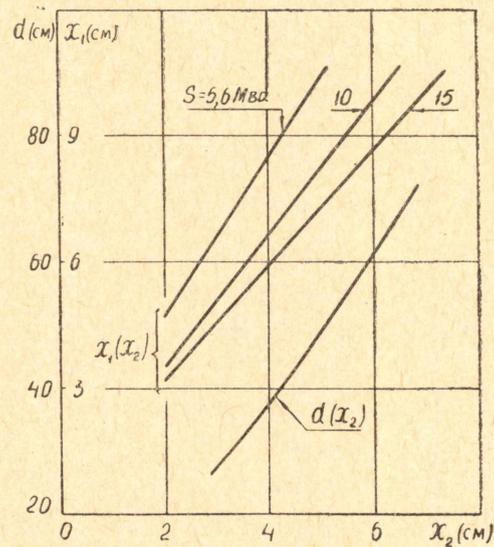


Рис. 3.

$y_1 = y_2 = 1,0$  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 практические 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:  $B, \delta, U_k, K_c$  и т. д. Была

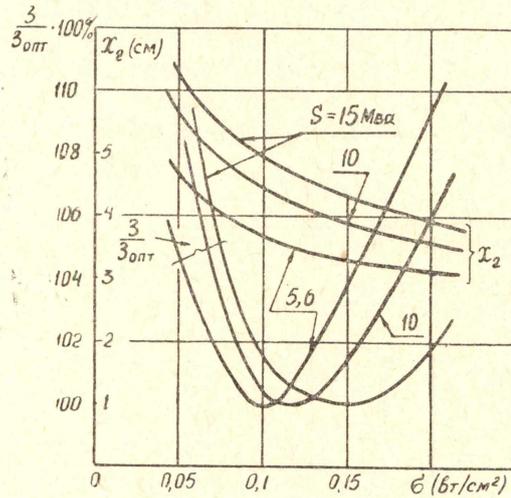


Рис. 4.

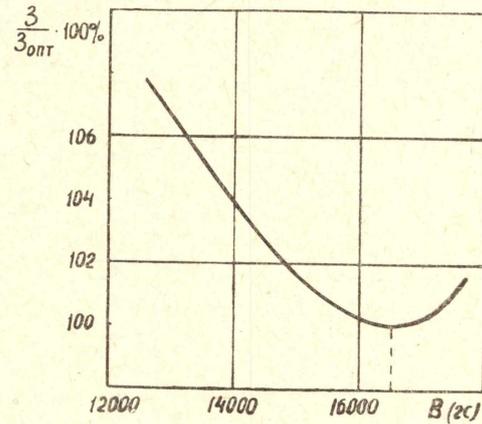


Рис. 5.

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

Таблица 4

№ п.п.	$S,$ Мва	5,6	10	10	15
1	$y_1, \text{ см}$	1,0	1,0	1,45	1,0
2	$y_2, \text{ см}$	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	$\Delta_2$ из (26), а/см <sup>2</sup>	306	346	345	386
6	$\Delta_1$ из (27), $\frac{a}{\text{см}^2}$	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	$\sigma_1 = \sigma_2, \text{ вт/см}^2$	0,09	0,12	0,12	0,15
10	$\sigma_p$ из (9) $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$	250	350	360	460
11	$Q_c, \text{ кг}$	4650	6960	7870	9240
12	$Q_m, \text{ кг}$	1455	1990	1910	2420
13	$Q_n$ при $\beta = 3,2, \text{ кг}$	9300	13340	14000	17000
14	$P_c, \text{ вт}$	7250	10820	12150	14320
15	$P_m, \text{ вт}$	54800	78500	68500	115000
16	$\Sigma P, \text{ вт}$	62050	89320	80650	129320
17	$Z$ из (17), руб.	3430	4830	4880	6300

величина  $\delta$  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.

---