

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Г. В. ДЕЛЬ, В. П. КРАСНОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций
и подстанций и электрических сетей и систем)

§ 1. Основные положения

На кафедре электрических станций Томского политехнического института под руководством профессора доктора И. Д. Кутявина разработан метод технико-экономических исследований трансформаторов. В настоящее время проводятся исследования оптимальных размеров трансформаторов на основе этого метода.

Сущность метода сводится к определению таких конструктивных размеров сердечника и обмоток трансформатора, которые соответствуют минимуму расчетных затрат, имеющих выражение

$$Z = (A + DB_1^2 + 1,5 \alpha_p) Q_c + (\beta A + E \Delta_1^2) Q_{m1} + (\beta A + E \Delta_2^2) Q_{m2}. \quad (1)$$

Здесь и ниже все обозначения физических и геометрических размеров приняты согласно [1].

Используя физические и геометрические закономерности, находим выражение Q_c и Q_m через размеры трансформаторов. В [1] дан вывод уравнений, описывающих работу трансформаторов. Эти уравнения можно записать в виде следующей системы для случая двухобмоточного трансформатора с непрерывной или винтовой обмотками:

$$\left. \begin{aligned} S &= KB\kappa_1 \Delta_1 x_1 y_1 \frac{d^2 \cdot h}{y_1 + \delta_1}, \\ u_p &= K_p \frac{\kappa_1 x_1 y_1 \Delta_1}{Bd^2 (y_1 + \delta_1)} (d + 2x_2 + l) (x_1 + x_2 + 3\delta_{12}), \\ 2\sigma_1 \kappa_{y1} (\kappa_{n1} x_1 + y_1) &= \rho \kappa_1 x_1 y_1 \Delta_1^2, \\ 2\sigma_2 \kappa_{y2} (\kappa_{n2} x_2 + y_2) &= \rho \kappa_2 x_2 y_2 \Delta_2^2, \\ \frac{\kappa_1 x_1 y_1 \Delta_1}{y_1 + \delta_1} &= \frac{\kappa_2 x_2 y_2 \Delta_2}{y_2 + \delta_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В системе уравнений (2) принято:

$$\left. \begin{aligned} K &= 1,11 m \kappa_c \pi f \cdot 10^{-11}, \\ K_p &= \frac{8\pi^2 \kappa_r}{33,3 \kappa_c}, \\ l &= 2\delta_{02} + \delta_{12}, \\ \kappa_{n1} &= \kappa_{x1} : \kappa_{y1}; \quad \kappa_{n2} = \kappa_{x2} : \kappa_{y2}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

m — число активных стержней трансформатора.

В системе (2) имеем 8 переменных: $x_1, x_2, y_1, y_2, \Delta_1, \Delta_2, d, h$. Остальные величины являются постоянными, взятыми из технического задания или ГОСТ "а" ($S, U_1, U_2, U_p, m, f, \sigma_1, \sigma_2$, главная изоляция), либо принятыми в самом начале расчета (B, κ_c, κ_r и т. д.). Потери холостого хода и короткого замыкания приняты переменными, но считается, что их величина не должна превосходить рекомендацией ГОСТ "а 401-41.

Недостатком системы (2) является то, что коэффициенты заполнения меди (κ_1 и κ_2) приняты постоянными. Задача сведения их к переменным величинам решается следующим образом.

Число витков в катушке равно (рис. 1)

$$\omega_k = \frac{\kappa x y \Delta}{I_H}, \quad (4)$$

I_H — номинальный фазный ток.

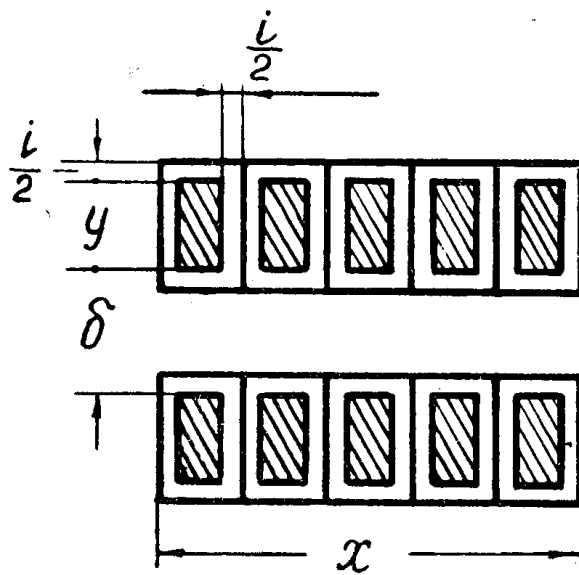


Рис. 1.

Сечение чистого проводникового материала в катушке

$$\kappa x y = (x - m_{1(2)} i \omega_k) y. \quad (5)$$

Число параллельных ветвей обмотки $m_{1(2)}$ может быть принято постоянным, определяемым по величине номинального тока обмотки (I_H) и току одной параллельной ветви (I_B).

Подставляя (4) в (5), получим соответственно для обмотки ВН и НН:

$$\kappa_1 = \frac{1}{1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1}; \quad (6)$$

$$\kappa_2 = \frac{1}{1 + \lambda_2 \Delta_2 y_2},$$

где

$$\lambda_1 = \frac{i_1 m_1}{I_{H1}} = \frac{i_1}{I_{B1}} \quad (7)$$

и

$$\lambda_2 = \frac{i_2 m_2}{I_{H2}} = \frac{i_2}{I_{B2}}.$$

С учетом (6) система (2) лишена указанного выше недостатка.

Для силовых трансформаторов принципиально возможно два сочетания обмоток:

1. Непрерывная (ВН) — непрерывная (НН).
2. Непрерывная (ВН) — винтовая (НН).

Математически оба сочетания описываются одними и теми же уравнениями. Следует только учитывать, что число витков в условной катушке винтовой обмотки обратно пропорционально числу заходов (n_3), которое можно считать величиной известной

$$w_{k2} = \frac{1}{n_3}. \quad (8)$$

Последнее обстоятельство вынуждает рассматривать указанные сочетания обмоток по отдельности.

В настоящей статье приводятся результаты исследования трансформаторов напряжением 110 кВ: трехфазных (сочетание обмоток Нр — Нр) и однофазных (сочетание обмоток Нр — Вт). На трансформаторы не накладывалось предварительных ограничений в механическом отношении.

§ 2. Трехфазные трансформаторы

Для случая трехфазных трансформаторов система уравнений (2) с учетом (6) дает три независимых переменных. Исследование затрат (1) одновременно в функции 3 независимых переменных очень трудоемкая задача. Поэтому исследование проводилось в два этапа. На первом этапе принималось $\Delta_1 = \Delta_2$ и исследовались $3 = f(x_1, y_1)$ (мощности рассматриваемых трансформаторов: 5,6; 7,5; 10; 15 Мва). При этом оказалось, что расчетные затраты очень слабо зависят от осевого размера катушки (y_1) (табл. 1). Оптимальное значение y_1 для каждого из исследуемых трансформаторов оказалось примерно одинаковым и равным 1,1 см. Все это позволило принимать в дальнейшем (второй этап) $y_1 = \text{const}$ при $\Delta_1 \neq \Delta_2$.

Таблица 1

Расчетные затраты (%) в функции y_1 при $x_{1\text{опт}}$ для различных S

$y_1, \text{см}$ $S, \text{Мва}$	0,5	0,7	1,0	1,1	1,5	2,0
5,6	102,7	101,2	100,2	100	100,4	100,8
7,5	103,2	101,3	100,1	100	100,7	102,3
10,0	103,6	101,3	100	100	101	103
15,0	103	100,8	100	100	101,4	104

На втором этапе исследование затрат проводилось в функции независимых переменных x_2, y_2 . При этом выражения переменных через x_2, y_2 из системы уравнений (2) с учетом (6) имеют вид:

$$\Delta_2 = \frac{\lambda_2 + \sqrt{\lambda_2^2 + 4L_2 \frac{z_2}{y_2}}}{2L_2 z_2},$$

где

$$z_2 = \frac{x_2}{\kappa_{n2}x_2 + y_2}; \quad (9)$$

$$\Delta_1 = \frac{\left(\kappa_{n1}\lambda_1 + \frac{y_1X}{y_1 + \delta_1} \right) + \sqrt{\left(\kappa_{n1}\lambda_1 + \frac{y_1X}{y_1 + \delta_1} \right)^2 + 4L_1 \frac{\kappa_{n1}}{y_1}}}{2L_1}, \quad (10)$$

где

$$X = \frac{(y_2 + \delta_2)(1 + \lambda_2 y_2 \Delta_2)}{x_2 y_2 \Delta_2}, \quad (11)$$

$$L_1 = \frac{\rho}{2\sigma_1 \kappa_{y1}}, \quad L_2 = \frac{\rho}{2\sigma_2 \kappa_{y2}}; \\ x_1 = \frac{(y_1 + \delta_1)(1 + \lambda_1 y_1 \Delta_1)}{X y_1 \Delta_1}; \quad (12)$$

$$d = \frac{V_1 + \sqrt{V_1^2 + 4V_1 V_2}}{2}, \quad (13)$$

где

$$V_1 = \frac{K_p x_2 y_2 \Delta_2 (x_1 + x_2 + 3\delta_{12})}{u_p (y_2 + \delta_2)(1 + \lambda_2 y_2 \Delta_2)}, \\ V_2 = 2x_2 + l, \\ h = \frac{S}{K} \cdot \frac{X}{d^2}. \quad (14)$$

Расчетные затраты по (1) во втором случае принимают следующий вид:

$$3 = \frac{\pi \gamma_c \kappa_c}{4} (A + DB^2 + 1,5\alpha_p) \varphi(x_2, y_2), \quad (15)$$

где

$$\varphi(x_2, y_2) = \frac{mS}{K} 10^{-3} X + d^2 [2ml_u + n_a \kappa_a (x_1 + x_2 + l_r) + n_d \kappa_d d] \cdot 10^{-3} + \\ + \frac{M_3}{d^2} \left[(\beta A + E\Delta_1^2) \frac{d_{cp.1}}{\Delta_1} + (\beta A + E\Delta_2^2) \frac{d_{cp.2}}{\Delta_2} \right], \quad (16)$$

$$M_3 = \frac{4\gamma_m S \cdot 10^{-3}}{K\gamma_c \kappa_c (A + DB^2 + 1,5\alpha_p)},$$

$$l_r = \delta_{02} + \delta_{12} + 0,5\delta_{11},$$

$$d_{cp.2} = d + x_2 + 2\delta_{02}, \quad d_{cp.1} = d + 2x_2 + x_1 + 2(\delta_{02} + \delta_{12}).$$

Для трехфазного трехстержневого трансформатора $n_a = 8$, $n_d = 5,6$, $m = 3$. Соответствующие выражения для переменных в первом случае ($\Delta_1 = \Delta_2$) по степени сложности аналогичны (9) — (16).

Результаты исследования расчетных затрат в функции x_2 , y_2 (второй случай) для мощности $S = 10$ Мва, приведены в табл. 2.

Следует заметить, что минимум функции при $\Delta_1 \neq \Delta_2$ оказался больше минимума функции при $\Delta_1 = \Delta_2$ на 1,4%. Таким образом, при расчетах с экономической точки зрения, следует по возможности принимать плотности тока в обмотках близкими друг к другу. К сожалению, в нашем случае это сделать невозможно, так как значения y_2 по-

Для силовых трансформаторов принципиально возможно два сочетания обмоток:

1. Непрерывная (ВН) — непрерывная (НН).
2. Непрерывная (ВН) — винтовая (НН).

Математически оба сочетания описываются одними и теми же уравнениями. Следует только учитывать, что число витков в условной катушке винтовой обмотки обратно пропорционально числу заходов (n_3), которое можно считать величиной известной

$$w_{k2} = \frac{1}{n_3}. \quad (8)$$

Последнее обстоятельство вынуждает рассматривать указанные сочетания обмоток по отдельности.

В настоящей статье приводятся результаты исследования трансформаторов напряжением 110 кВ: трехфазных (сочетание обмоток Нр — Нр) и однофазных (сочетание обмоток Нр — Вт). На трансформаторы не накладывалось предварительных ограничений в механическом отношении.

§ 2. Трехфазные трансформаторы

Для случая трехфазных трансформаторов система уравнений (2) с учетом (6) дает три независимых переменных. Исследование затрат (1) одновременно в функции 3 независимых переменных очень трудоемкая задача. Поэтому исследование проводилось в два этапа. На первом этапе принималось $\Delta_1 = \Delta_2$ и исследовались $3 = f(x_1, y_1)$ (мощности рассматриваемых трансформаторов: 5,6; 7,5; 10; 15 Мва). При этом оказалось, что расчетные затраты очень слабо зависят от осевого размера катушки (y_1) (табл. 1). Оптимальное значение y_1 для каждого из исследуемых трансформаторов оказалось примерно одинаковым и равным 1,1 см. Все это позволило принимать в дальнейшем (второй этап) $y_1 = \text{const}$ при $\Delta_1 \neq \Delta_2$.

Таблица 1

Расчетные затраты (%) в функции y_1 при $x_{1\text{опт}}$ для различных S

$y_1, \text{см}$ $S, \text{Мва}$	0,5	0,7	1,0	1,1	1,5	2,0
5,6	102,7	101,2	100,2	100	100,4	100,8
7,5	103,2	101,3	100,1	100	100,7	102,3
10,0	103,6	101,3	100	100	101	103
15,0	103	100,8	100	100	101,4	104

На втором этапе исследование затрат проводилось в функции независимых переменных x_2, y_2 . При этом выражения переменных через x_2, y_2 из системы уравнений (2) с учетом (6) имеют вид:

$$\Delta_2 = \frac{\lambda_2 + \sqrt{\lambda_2^2 + 4L_2 \frac{z_2}{y_2}}}{2L_2 z_2},$$

и в другом случае мы имеем, хотя и пологий, минимум (исследования были проведены для стали Э330; 0,35; ГОСТ 802—58).

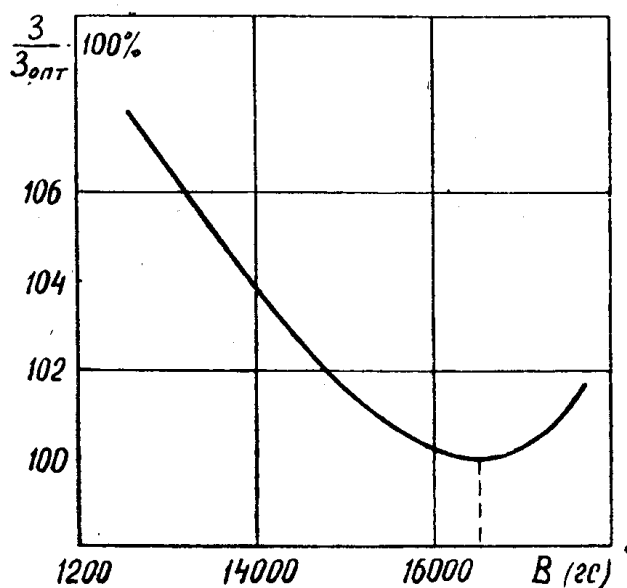


Рис. 3.

В табл. 3 приведены сравнительные данные трансформаторов отечественного и зарубежного производства и трансформаторов, рассчитанных по предлагаемой методике.

Таблица 3

№ п. п.	Весы и потери на 1 кВа	Расчетные данные				Заводские		Фирма АЕГ (ФРГ)	
		5,6	7,5	10	15	6,3	16	10	15
1	P'_{xx} (вт/кВа)	1,3	1,17	1,215	0,955	3,13	2,58	1,4	1,15
2	$P'_{кз}$ "	9,8	8,65	6,85	7,67	8,59	6,32	7,5	6,66
3	$\Sigma P'$ "	11,1	9,82	8,07	8,62	11,7	8,9	8,9	7,81
4	Q'_c (кг/кВа)	0,83	0,755	0,787	0,616	1,08	0,87	—	—
5	Q'_m "	0,26	0,24	0,191	0,161	0,244	0,178	—	—
6	Q'_n "	1,66	1,53	1,4	1,13	1,86	1,44	—	—
7	σ_p (кг/см ²)	250	285	350	460	—	—	—	—

§ 3. Однофазные трансформаторы

По однофазным трансформаторам мощностью 10,5; 20; 40 и 60 Мва. приводятся результаты исследований затрат (1) при $\Delta_1 \neq \Delta_2$. При этом независимые переменные Δ_1 и y_2 . Рассматриваются трансформаторы с сердечником бронзового и стержневого типа с обмотками из алюминиевого и медного провода. Сочетание обмоток принято — Нр — Вт. Расчеты проведены на быстродействующей ЭЦВМ.

Для исследований использовались уравнения (1—5) и (8) при следующих исходных данных:

$A = 0,1295$; $\kappa_T = 0,7$ материал сердечника Э-320 ГОСТ 802—58.

Таблица 2

№ п. п.	y_2 (см)		0,5	1,0	1,5
	y_1 (см)	$x_{2\text{опт.}}$ (см)	4,5	4,4	4,4
1	0,7	3 %	101	100,6	101,3
2	1,0	3 %	101,1	100	100,6
3	1,5	3 %	101	100,6	101,1

лучаются для некоторых трансформаторов (при $\Delta_1 = \Delta_2$) неконструктивными, из-за большой разницы постоянных λ_1 и λ_2 .

Указанные выше исследования проводились при следующих исходных данных: $U_1/U_2 = 110/11$ кв; соединение обмоток λ/Δ ; $u_p = 0,105$; $B = 16500$ гс; $\rho = 2,14 \cdot 10^{-6}$ ом.см; $\kappa_{\text{я}} = 1,05$; $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,15$ вт/см²; $\gamma_m = 8,9$ г/см³; $\gamma_c = 7,65$ г/см³; $m_1 = 1$; $i_1 = 0,14$; $i_2 = 0,055$; $\delta_1 = 0,94$; $\delta_2 = 0,66$; $\delta_{02} = 1,5$; $\delta_{12} = 5$; $\delta_{11} = 6$; $\kappa_{x1} = \kappa_{x2} = 0,7$; $\kappa_{y1} = \kappa_{y2} = 0,91$; $\kappa_c = 0,82$; $\kappa_r = 0,95$ (все размеры в см); $\kappa_T = 0,96$ для $S = 5,6$ и $7,5$ Мва; $\kappa_T = 0,9$ для 10 и 15 Мва; $\beta = 3,2$; $A = 0,1775$; $D = 45,8 \cdot 10^{-11}$; $E = 47 \cdot 10^{-7}$; $\alpha_p = 19,3$ вт/кг.

Материал обмоток — медь. Значения m_2 для $S = 5,6$; $7,5$ Мва — 2; 10 —3; 15 —4.

Выявленная слабая зависимость расчетных затрат от y позволила при дальнейших исследованиях принимать y_1 и $y_2 = \text{const}$, тем самым

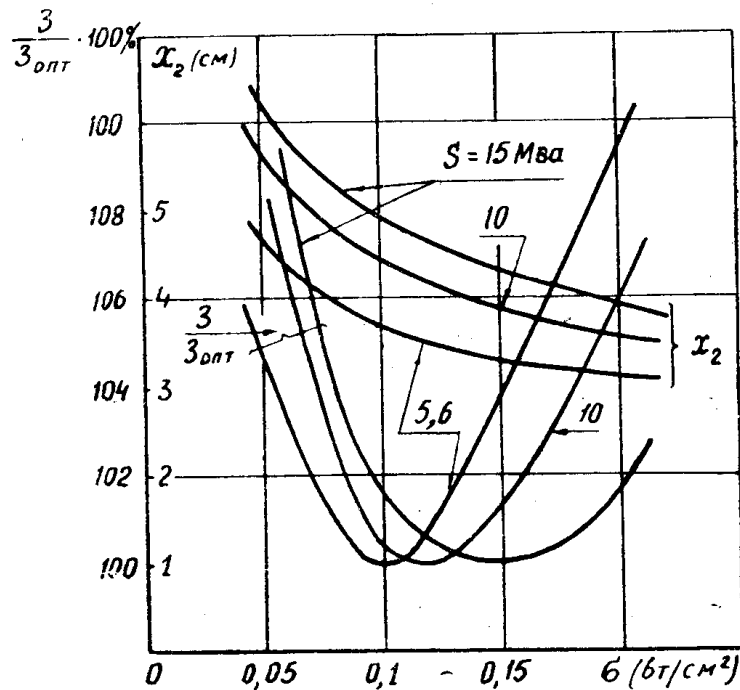


Рис. 2.

сократив число независимых переменных до одной (x_2). На рис. 2 приводится зависимость расчетных затрат (15) в функции удельной тепловой нагрузки σ . На рис. 3 приводится усредненная для всего рассматриваемого диапазона мощностей зависимость Z от индукции B . И в том

трансформаторов с магнитопроводом броневого конструкции с медной (1—5, 11—15) и алюминиевой (6—10, 16—20) обмоткой.

Из рис. 4 видно, что оптимальное значение индукции находится в пределах 14000—16000 гс и влияние ее на затраты выражено слабо. Здесь следует отметить, что оптимальное значение индукции может увеличиваться с улучшением качества материала сердечника.

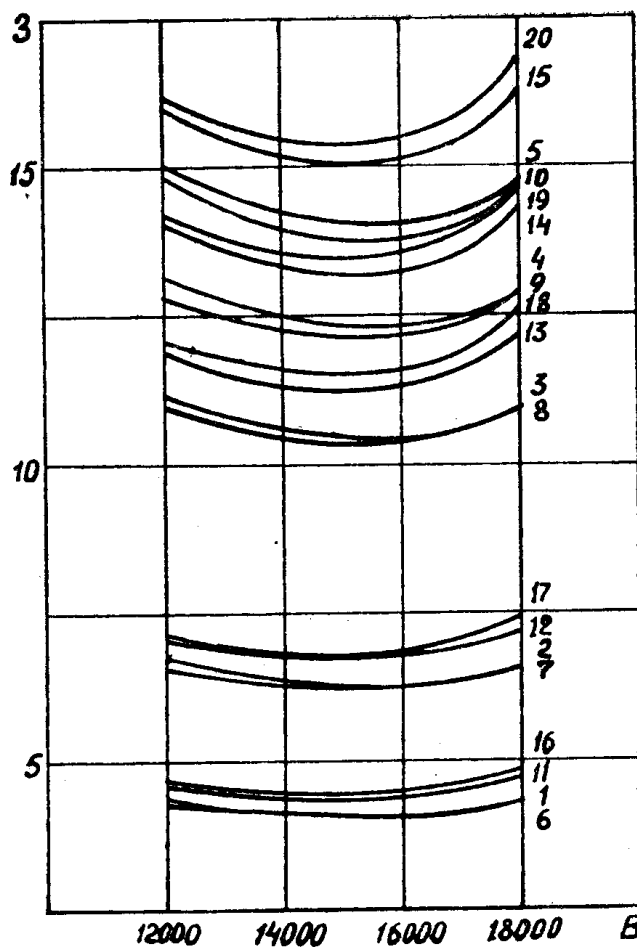


Рис. 4.

На рис. 5 показана зависимость затрат ($3 \cdot 10^3$) от величины удельной тепловой нагрузки обмоток (τ), подсчитанная для трансформатора 40 Мва при разных значениях B .

Кривые (1, 4, 7, 10) соответствуют индукции 15000 гс (2, 5, 8, 11) — 16000 гс, (3, 6, 9, 12) — 17000 гс, для трансформаторов с магнитопроводом стержневым (1—3, 8—9) и броневым (4—6, 10—12) с обмоткой из медного провода (1—6) и алюминиевого (8—12).

Для сравнения в табл. 4 приведены основные данные по трансформаторам, подсчитанные по вышеуказанной методике, и данные по изготовленным трансформаторам [2]. Для расчета были приняты следующие данные:

$$B = 16500 \text{ гс}; \tau = 0,15 \text{ вт/см}^2; \alpha_p = 0,046 \frac{\text{кВт}}{\text{кг}}; \text{ сталь Э — 330}$$

ГОСТ 802 — 54.

$S, \text{ Мва}$		10,5	20	40	50	60
$w_{к2}$		1	1	0,5	0,5	0,5
m_1		1	2	4	5	5
m_2	Обмотки из меди	6	6	12	16	18
	Обмотки из алюминия	6	12	20	24	32

Материал обмотки	ξ	E	λ_m	Тип сердечника	m	n_a	n_d	I_r
Медь	3,2	$0,47 \cdot 10^{-5}$	8,9	Броневой	1	2	1,8	15,5
Алюминий	4	$0,26 \cdot 10^{-4}$	2,7	Стержневой	2	4	3,6	9,5

Другие необходимые постоянные приняты согласно § 2.

Расчетные уравнения имеют вид

$$y_1 = \frac{\left[\frac{\kappa_{n1}}{\Delta_1} + \delta_1 \left(\frac{\kappa_{n1} m_1 i_1}{I_{n1}} - L_1 \Delta_1 \right) \right] + \sqrt{\left[\frac{\kappa_{n1}}{\Delta_1} + \delta_1 \left(\frac{\kappa_{n1} i_1 m_1}{I_{n1}} - L_1 \Delta_1 \right) \right]^2 + \frac{4 \kappa_{n1} \delta_1}{\Delta_1} \left[- \left(\frac{\kappa_{n1} i_1 m_1}{I_{n1}} - L_1 \Delta_1 \right) - \frac{y_2 + \delta_2}{I_{n2} w_{к2}} \right]}}{2 \left[- \left(\frac{\kappa_{n1} i_1 m_1}{I_{n1}} - L_1 \Delta_1 \right) - \frac{y_2 + \delta_2}{I_{n2} w_{к2}} \right]}, \quad (17)$$

$$x_1 = \frac{L_1 I_{n2} w_{к2} \Delta_1 (y_1 + \delta_1)}{(y_2 + \delta_2) \kappa_{n1}} - \frac{y_1}{\kappa_{n1}}, \quad (18)$$

$$\Delta_2 = \frac{V_4 + \sqrt{V_4^2 + \frac{4 L_2 I_{n2}^2 w_{к2}^2}{\kappa_{n2} y_2}}}{2 L_2 I_{n2} w_{к2}},$$

• κ_{n2}

где

$$V_4 = \frac{y_2}{\kappa_{n2}} + m_2 i_2 w_{к2} \quad (19)$$

$$x_2 = (L_2 I_{n2} w_{к2} \Delta_2 - y_2) \frac{1}{\kappa_{n2}}. \quad (20)$$

Остальные выражения аналогичны (13—16).

На рис. 4 показана зависимость затрат ($3 \cdot 10^3$) от величины индукции в магнитопроводе. Здесь кривые (1—10) для трансформаторов с магнитопроводом стержневой конструкции, кривые (11—20) для

Из табл. 4 видно, что трансформаторы с обмоткой из алюминиевого провода имеют меньший вес активных материалов, но несколько увеличенные потери короткого замыкания.

Механические напряжения, возникающие в трансформаторе при коротком замыкании (σ_p), для трансформаторов мощностью 20 и 40 Мва с алюминиевой обмоткой и броневым магнитопроводом получились больше допустимой величины [3]. В связи с этим можно отметить, что применение алюминиевой обмотки целесообразнее для трансформа-

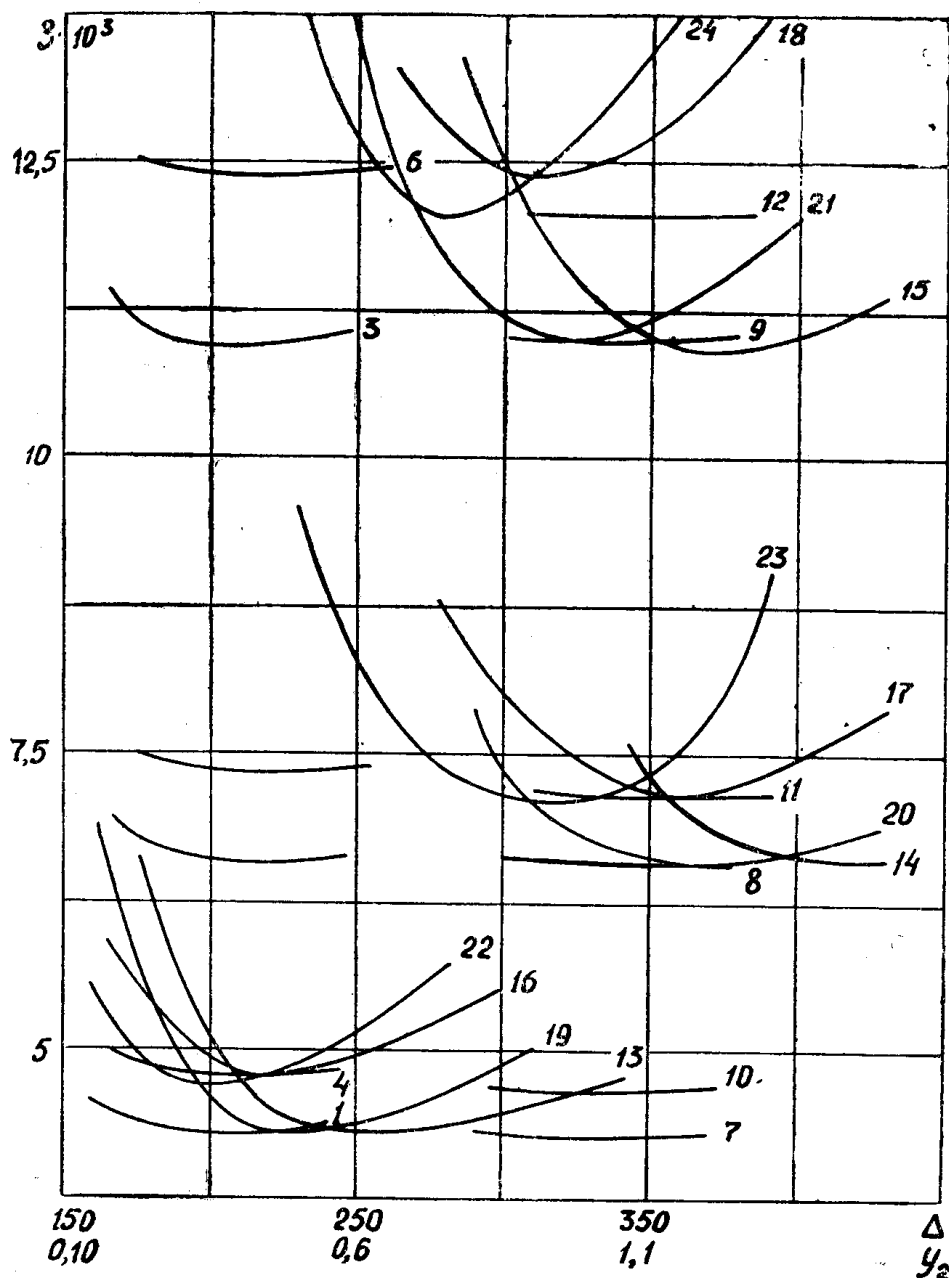


Рис. 6.

торов с магнитопроводом стержневого типа, несмотря на увеличение потерь, но не исключена возможность изготовления трансформаторов и с броневым магнитопроводом.

На рис. 6 приведена зависимость затрат ($3 \cdot 10^3$) от величины плот-

ности тока в первичной обмотке при постоянных значениях y_2 соответственно каждой мощности (кривые 1—12) и зависимость затрат от y_2 при постоянных значениях Δ_1 для каждой мощности (кривые 13—24).

Кривые (7—12) и (19—24) для трансформаторов с обмоткой из медного провода, (1—6) и (13—18) из алюминиевого провода; кривые (1—3), (7—9), (13—15) и (19—21) для трансформаторов с магнитопроводом стержневого типа и (4—6), (10—12), (16—18), (22—24) — броневого типа соответственно мощности 10,5 (1, 4, 7... 21), 20 (2, 5, 8... 23), 40 (3, 6, 9... 14) *Мва*.

Из рис. 6 видно, что затраты имеют слабую зависимость от плотности тока Δ_1 , но с увеличением мощности трансформатора эта зависимость возрастает, что хорошо можно проследить на трансформаторах с алюминиевой обмоткой, имеющих сердечник стержневой конструкции (1—3). Зависимость затрат от y_2 более резкая, что позволяет более точно определить величину оптимального y_2 .

Выводы

1. Предлагаемый технико-экономический метод исследования оптимальных размеров трансформаторов дает возможность проводить всесторонние исследования как трехфазных, так и однофазных трансформаторов. Метод позволяет находить абсолютный минимум затрат, отвечающий наивыгоднейшему решению трансформатора.

2. Предлагаемый метод предполагает использование электронно-вычислительных машин при его применении.

3. Возможность замены обмоточного провода из меди на алюминиевый, несомненно, представляет большой интерес. Предлагаемая методика позволяет провести исследования трансформаторов с алюминиевой обмоткой и выяснить экономически выгодные границы (по мощности) замены меди, являющейся дефицитным материалом.

4. Недостатком метода следует считать то, что в предлагаемом виде он не учитывает добавочных потерь, хотя принципиально учесть эти потери вполне возможно.

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. Г. Н. Петров. Электрические машины. Ч. I, Госэнергоиздат, 1956.

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