

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ТРЕХФАЗНЫХ ДВУХОБОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Доктор техн. наук И. Д. КУТЯВИН.

В статье изложены результаты попытки автора найти более строгую методику определения наиболее выгодных размеров указанных трансформаторов, исходя из следующих заданных параметров:

1. Мощности трансформатора S , *кВа*.
2. Магнитной индукции в стержне B , *гс*.
3. Напряжения короткого замыкания U_k .
4. Допустимой плотности теплового потока с поверхности обмоток σ , *вт/см²*.

Для технико-экономического определения оптимальных размеров трансформаторов в соответствии с официальной методикой, предложенной П. Г. Грудинским [3], учтены следующие расходы:

1. Расчетная цена трансформатора с амортизационными отчислениями.
2. Расчетная стоимость добавочной мощности системы, необходимой для покрытия потерь в трансформаторе в период максимума нагрузки в системе.
3. Расчетная стоимость потерь электроэнергии в трансформаторе.
4. Расчетные затраты на компенсацию реактивной мощности холостого хода. Не учтены затраты на компенсацию реактивной мощности, теряемой в сопротивлении рассеяния, в виду того, что они не зависят от размеров трансформатора.

Учет расчетной цены трансформатора вместо расчетной стоимости по укрупненным показателям ТЭПа объясняется тем, что стоимость доставки и монтажа трансформатора входит в общие затраты постоянной величиной и на положение минимума этих затрат не влияет.

Расчетную цену трансформатора с большим приближением можно принять пропорциональной суммарному весу, приведенных к стали, активных материалов.

$$Z_T = k_T (Q_c + \beta Q_m) k_T Q_m, \quad (1)$$

где k_T — расчетная удельная цена трансформатора в руб/кг;
 Q_c и Q_m — веса стали и меди в кг;
 β — отношение удельной расчетной стоимости меди к стоимости стали в изделии.

Ориентировочные значения k_T для некоторых трансформаторов с сердечниками из горячекатанной стали и без устройств для регулирования напряжения (при $\beta = 3.65$) приведены в таблице 1.

Таблица 1.

10 кв		35 кв		110 кв	
S квa	k _T	S мвa	k _T	S мвa	k _T
560	0,52			10	0,65
750	0,53	7,5	0,50	15	0,58
1000	0,51	10	0,47	20	0,53
1350	0,52	15	0,42	31,5	0,49
1800	0,54	20	0,41	40,5	0,46
3200	0,50	31,5	0,39	60	0,43

Затраты (1) с амортизационными отчислениями, отнесенные к одному году расчетного срока $T_p = 8$ лет;

$$Z_{та} = k_T Q_n (P_n + P_a) \quad (2)$$

где $P_n \frac{1}{T_p}$ — нормативный коэффициент эффективности;
 P_a — амортизационные отчисления в долях единицы.

Расчетные затраты на создание добавочной мощности в системе [4], отнесенные к одному году расчетного срока:

$$Z_c = p_n C_1 \left[P_c + P_m \left(\frac{k_m S_m}{S} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где P_c и P_m — потери в стали и меди, квт;
 S_m — расчетный максимум нагрузки трансформатора в квa на конец перспективного срока;
 k_m — коэффициент попадания в максимум системы.

Расчетная стоимость установленного киловатта добавочной мощности C_1 с учетом собственного расхода электростанций, необходимого резерва мощности в системе и затрат на строительство станции и топливной базы для нее, составит:

$$C_1 = k_{сн} (k_p C_c + q C_T), \quad (4)$$

где $k_{сн}$ — коэффициент, учитывающий расход на собственные нужды;
 k_p — коэффициент резерва;
 C_c — средняя расчетная стоимость установленного киловатта в рублях вновь вводимых мощностей электростанций в системах Советского Союза;
 C_T — средние расчетные затраты в рублях, на создание топливной базы, отнесенные на тонну годовой добычи условного топлива;
 q — годовой расход условного топлива на один киловатт добавочной мощности в тоннах.

В таблице 2 приведены значения C_1 при $k_{сн} = 1,1$; $k_p = 1,1$; $C_T = 20$ руб/т и при удельном расходе условного топлива на один киловатт-час — 400 г.

Таблица 2.

C _c руб/квт	Продолжительность использования T _м в часах				
	2000	3000	4000	5000	7000
60	90,2	99,0	107,8	116,6	134,2
80	114,4	123,2	132,0	140,8	158,4
100	138,6	147,4	156,2	165,0	182,6
120	162,6	171,4	180,2	189,0	206,6

За расчетное значение C_c следовало бы принимать не проектную, а фактическую величину.

$$Z_n = C'_2 P_c t + C''_2 P_m \tau \left(\frac{k_n S_m}{S} \right)^2 \quad (5)$$

Расчетная годовая стоимость потерь в трансформаторе [4]:
где C'_2 и C''_2 — расчетные стоимости одного киловатт-часа потерь в стали и меди в руб/квт-ч;

τ — годовое время потерь, часы;
 t — время работы трансформатора в году, часы;
 k_n — коэффициент роста нагрузки [3].

Расчетные затраты на компенсацию реактивной мощности намагничивания стали сердечника

$$Z_n = Z_p \alpha_p Q_c,$$

где α_p — удельные потери реактивной мощности в стали квар/кг,
 $Z_p \cong 1,5$ руб/квар — удельные затраты на компенсацию [3].

Если положить индукцию в ярме и стержне одинаковой, то потери в стали сердечника в квт:

$$P_c = \alpha_c B^2 Q_c. \quad (6)$$

Потери в меди (квт) при разной плотности тока в обмотках фазы:

$$P_m = \alpha_m (\Delta_1^2 Q_{m1} + \Delta_2^2 Q_{m2}), \quad (7)$$

где α_c и α_m — коэффициенты потерь в стали меди;
 Δ_1 и Δ_2 — плотности тока первичной и вторичной обмоток, а/см².

Тогда общие расчетные затраты на приобретение и эксплуатацию трансформатора могут быть выражены через веса активных материалов:

$$Z = Z_{та} + Z_c + Z_n = (A_1 + DB^2) Q_c + (\beta A_2 + E \Delta_1^2) Q_{m1} + (\beta A_2 + E \Delta_2^2) Q_{m2}, \quad (8)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= k_T (p_n + p_a); \quad A_1 = Z_p \alpha_p + A_2 \\ D &= (C_1 p_n + C'_2 t) \alpha_c; \\ E &= (C_1 p_n k_m^2 + C''_2 \tau k_n^2) \left(\frac{S_m}{S} \right)^2 \alpha_m \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Если теперь веса активных материалов Q_c и Q_m выразить через основные размеры трансформатора и подставить их в (8), то можно определить оптимальное значение этих размеров, а также оптимальные плотности тока Δ_1 и Δ_2 .

В пределах данной статьи рассмотрим задачу определения оптимальных размеров трансформаторов малой мощности с цилиндрическими обмотками, охлаждаемыми осевыми каналами. Допустим, что первичная обмотка (обмотка высшего напряжения) имеет n_1 слоев, разделенных осевыми каналами шириной δ_1 . Ширина каждого слоя этой обмотки x_1 . Тогда полная ширина первичной обмотки (все размеры в сантиметрах): $e_1 = n_1 x_1 + (n_1 - 1) \delta$ (10)

$$\text{и вторичной} \quad e_2 = n_2 x_2 + (n_2 - 1) \delta \quad (11)$$

при условии, что $\delta_1 = \delta_2$.

Ширина окна сердечника

$$a = 2(e_1 + e_2 + l_T) \quad (12)$$

где l_T — половина суммы радиальных изоляционных расстояний в окне.

Высота окна сердечника

$$H = h + 2l_n, \quad (13)$$

где h — высота обмотки и l_n — изоляционное расстояние от обмоток до ярма.

Длина стали сердечника, приведенная к площади сечения стержня:

$$l_c = 3H + k_y (4a + 5,6d) = 3h + k_y [8(b_1 + b_2) + 5,6d] + l, \quad (14)$$

где k_y — коэффициент увеличения сечения ярем,

d — диаметр стержня и

$$l = 6l_n + 8k_y l_r. \quad (15)$$

Длина среднего витка обмоток фазы

$$l_m = \pi (d + b_1 + b_2 + l_r). \quad (16)$$

Площади сечения материала обмоток фазы

$$q_{m_1} = k_1 n_1 x_1 h; \quad q_{m_2} = k_2 n_2 x_2 h. \quad (17)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты заполнения площади слоя обмоток проводниковым материалом.

Площадь сечения стали стержня

$$q_c = k_c \frac{\pi d^2}{4}, \quad (18)$$

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

Уравнение теплового баланса слоя обмотки на один сантиметр среднего витка

$$2hk_{n_1}\sigma_1 = \rho \Delta_1^2 k_1 x_1 h, \quad (19)$$

где k_{n_1} — коэффициент, учитывающий закрытие части поверхностей слоя изоляционными деталями;

σ_1 — допустимая плотность теплового потока с поверхности обмотки, $вт/см^2$;

ρ — удельное сопротивление проводника, $ом \cdot см$.

Плотности тока обмоток на основании (19)

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{2k_{n_1}\sigma_1}{\rho k_1 x_1}} = \frac{\alpha_1}{\sqrt{x_1}}; \quad \Delta_2 = \sqrt{\frac{2k_{n_2}\sigma_2}{\rho k_2 x_2}} = \frac{\alpha_2}{\sqrt{x_2}} \quad (20)$$

$$\text{где: } \alpha_1 = \sqrt{\frac{2k_{n_1}\sigma_1}{\rho k_1}} \quad \text{и} \quad \alpha_2 = \sqrt{\frac{2k_{n_2}\sigma_2}{\rho k_2}} \quad (21)$$

Условие равенства намагничивающих сил обмоток:

$$k_1 n_1 x_1 \Delta_1 h = k_2 n_2 x_2 \Delta_2 h. \quad (22)$$

Подставив сюда плотности тока из (20), найдем:

$$x_1 = b x_2 \quad (23)$$

где

$$b = \left(\frac{k_2 n_2 \alpha_2}{k_1 n_1 \alpha_1} \right)^2. \quad (24)$$

Выражение мощности трансформатора в $квa$ может быть представлено в следующем виде:

$$S = K \Delta_2 q_{m_2} q_c, \quad (25)$$

где

$$K = 13,32fB10^{-11}. \quad (26)$$

Подставив сюда переменные, найдем высоту обмотки

$$h = \frac{N}{d^2 \sqrt{x_2}}, \quad (27)$$

где
$$N = \frac{4S}{Kk_c k_2 n_2 a_2 \pi}. \quad (28)$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания в относительных единицах [1] может быть приведена к следующему виду:

$$u_p = \frac{2 k_r \Delta_2 q_{m2} l_m (b_1 + b_2 + 3\delta_{12})}{3,33 B q_c h}, \quad (29)$$

где k_r — коэффициент Роговского;

δ_{12} — изоляционное расстояние между обмотками.

После подстановки переменных в (29) найдем диаметр стержня:

$$d = \frac{U + \sqrt{U^2 + 4PUV}}{2P}, \quad (30)$$

где

$$U = \sqrt{x_2} [x_2 (bn_1 + n_2) + (n_1 + n_2 - 2)\delta + 3\delta_{12}]; \quad (31)$$

$$V = x_2 (bn_1 + n_2) + (n_1 + n_2 - 2)\delta + l_r \quad (32)$$

$$P = \frac{3,33 k_c B u_p}{8 k_r k_2 n_2 a_2} \quad (33)$$

Теперь все размеры трансформатора можно выразить через независимую переменную x_2 .

Вес стали сердечника в кг:

$$Q_c = \gamma_c q_c l_c 10^{-3} = \frac{k_c \pi \gamma_c 10^{-3}}{4} \left\{ \frac{3N}{\sqrt{x_2}} + d^2 [k_a (8V + 5,6d) + 6l_u] \right\}. \quad (34)$$

Вес стали сердечника в кг:

$$Q_v = 3\gamma_m l_m (q_{m1} + q_{m2}) 10^{-3} = 3\gamma_m \pi N (bk_1 n_1 + k_2 n_2) \frac{P}{a_1 + a_2 x_2}. \quad (35)$$

Приведенный к стали вес активных материалов в кг:

$$Q_n = Q_c + \beta Q_m = \frac{k_c \pi \gamma_c}{4} f(x_2), \quad \text{где} \quad (36)$$

$$f(x_2) = 10^{-3} \left\{ 3N \left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} + \frac{M}{a_1 + a_2 x_2} \right) + d^2 [k_a (8V + 5,6d) + 6l_u] \right\} \quad (37)$$

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{4P\beta\gamma_m (bk_1 n_1 + k_2 n_2)}{k_c \gamma_c}, \\ a_1 &= (n_1 + n_2)\delta + 3\delta_{12}; \quad a_2 = bn_1 + n_2 \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

γ_c и γ_m — удельные веса стали и проводникового материала.

Исследование выражения приведенного веса (36) представляет значительный интерес для сравнения размеров трансформатора, полу-

ченных из условия минимального расхода, приведенных к стали активных материалов с размерами, найденными из условия минимума общих затрат. Кроме того, при $\beta = 1$ выражение (36) дает суммарный вес натуральных активных материалов и позволяет найти размеры наиболее легкого трансформатора, что может представлять интерес для передвижных установок.

Однако определение минимума функции (37) в общем виде, при подстановке значений $d(x_2)$ и $V(x_2)$, представляет очень громоздкую задачу, которая наиболее просто может быть решена при помощи математических машин. Поэтому ограничимся здесь численным исследованием (37) для трансформатора 560 кВа, 10/0,4 кВ, с сердечником из горячекатанной стали и с использованием для обмоток меди и алюминия. Примем для этого следующие исходные данные (размерности указаны в тексте):

$$l_p = 0,055; l_{II} = 3,5; l_r = 4; \delta_{12} = 1,7; n_1 = n_2 = 2; \kappa_1 = 0,6; \kappa_2 = 0,8; \\ k_c = 0,84; k_{n1} = k_{n2} = 0,7; \kappa_r = 0,95; \kappa_a = 1; \kappa_m = 0,70; \kappa_n = 1; \\ k_T = 0,52; \sigma_1 = 0,12; \sigma_2 = 0,14; \delta = 0,8; \gamma_c = 7,5; B = 14500; p_{II} = \\ = 0,125; p_a = 0,06; t = 8700; \tau = 3000; \alpha_c = 1,35 \cdot 10^{-11}; C_1 = 124; C'_2 = \\ 0,008; C''_2 = 0,012; \left(\frac{k_n S_m}{S} \right)^2 = 0,8 [4].$$

$$\text{Вычислено } A_1 = 0,1457; A_2 = 0,0962; DB^2 = 0,242; K = 9,65 \cdot 10^{-5}; v = 1,55.$$

$$\text{Принято и вычислено для меди: } \gamma_m = 8,9; \rho = 2,14 \cdot 10^{-6}; \alpha_m = 2,4 \cdot 10^{-7}; \\ \beta = 3,65; \alpha_1 = 362; \alpha_2 = 340; P = 0,54; M = 38,5; E = 83,6 \cdot 10^{-7}; N = \\ = 1,62 \cdot 10^4; a_1 = 6,7; a_2 = 5,1; a_3 = 0,512; a_4 = 0,22.$$

$$\text{Принято и вычислено для алюминия: } \gamma_m = 2,7; \rho = 3,6 \cdot 10^{-6}; \\ \alpha_m = 1,33 \cdot 10^{-6}; \beta = 4,5; \alpha_1 = 280; \alpha_2 = 261; P = 0,704; M = 18,8; \\ E = 4,64 \cdot 10^{-5}; N = 2,10 \cdot 10^4; a_1 = 6,7; a_2 = 5,1; a_3 = 1,38; a_4 = 0,22.$$

В таблице 3 приведены значения $d(x_2)$ и $f(x_2)$, вычисленные соответственно из (30) и (37) для трансформатора с медными и алюминиевыми обмотками. Критическое значение x_2 для меди получилось 0,45 см, а для алюминия — 0,55 см. Для выяснения характера кривой в таблице 3 приведено процентное выражение $f(x_2)$. Как видно из таблицы 3, кривая $f(x_2)$ имеет достаточно тупой минимум, поэтому значительные отклонения x_2 от его критического значения дают расход приведенных активных материалов Q_n , близкий к минимуму.

Таблица 3.

x_2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2	1,4	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Для трансформатора с обмотками из меди										
d	12,9	15,4	17,7	20	22,4	24,8	29,7	34,8	40	
$f(x_2)$	340	330	329	337	350	377	442	570	736	
$f(x_2)\%$	105	100	100	102	107	114	134	173	224	
$\varphi(x_2)$	553	438	378	351	341	348	405	513	675	
$\varphi(x_2)\%$	162	129	111	103	100	102	119	150	198	
Для трансформатора с обмотками из алюминия										
d	10,7	12,6	14,5	16,4	18,8	20,2	24,2	28,2	31,5	
$f(x_2)$	276	260	252	251	261	267	365	367	442	
$f(x_2)\%$	110	104	100	100	104	106	121	146	176	
$\varphi(x_2)$	826	621	515	435	398	370	365	401	454	
$\varphi(x_2)\%$	226	170	138	119	109	100	100	110	124	

Выражение общих расчетных затрат при подстановке в (8) значений Q_c , Q_m и Δ :

$$Z = \frac{k_c \pi \gamma_c}{4} (A + DB^2) \varphi(x_2), \quad (39)$$

$$\text{где } \varphi(x_2) = 10^{-3} \left\{ 3N \left[\frac{1}{\sqrt{x_2}} + \frac{M(a_3 + a_4 x_2)}{x_2(a_1 + a_2 x_2)} \right] + d^2 [k_2 (8V + 5,6d) + 6 l_u] \right\}, \quad (40)$$

$$a_3 = \frac{k_1 n_1 a_1^2}{\beta k_2 n_2} \left(\frac{E}{A_1 + DB^2} \right); \quad a_4 = \frac{A_2}{A_1 + DB^2}. \quad (41)$$

Значения $\varphi(x_2)$, вычисленные из (40) при принятых исходных данных, приведены в таблице 3 в абсолютных значениях и процентах. Критическое значение x_2 для трансформатора с обмотками из меди равно 0,7 см — и алюминия — 0,9 см и без заметного увеличения расчетных затрат может быть изменено на $\pm 0,1$ см.

На фиг. 1 построена зависимость $d(x_2)$ для трансформатора с обмотками из меди при $k_1=0,5$; 0,6 и 0,7, а на фиг. 2 для трансформатора с обмотками из алюминия и для тех же значений k_1 . Надо за-

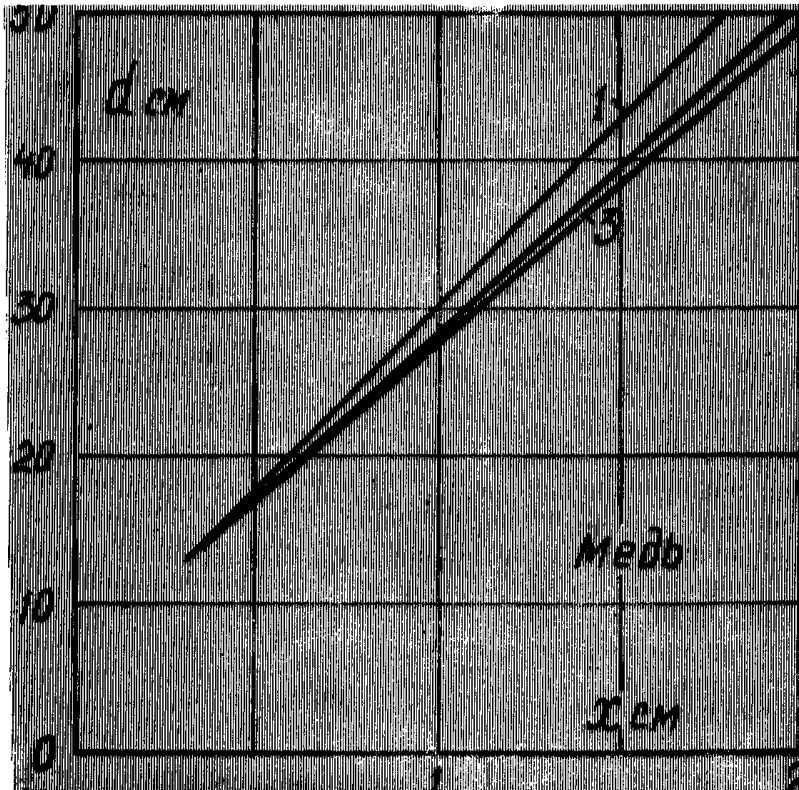


Рис. 1. Кривая 1 для $k_1=0,5$; 2—0,6; 3—0,7.

метить, что коэффициент k_1 достаточно сильно зависит от мощности трансформатора, тогда как k_2 практически остается постоянным.

Характер кривых фигур 1 и 2 показывает, что выражение (30) может быть заменено уравнением прямой следующего вида:

$$d = a_5 + a_6 x_2 \quad (42)$$

Постоянные a_5 и a_6 для меди и алюминия, вычисленные по кривым (рис. 1 и 2) для различных k_1 , приведены в таблице 4. Использование замены выражения (30) уравнением прямой (42) резко упрощает решение задачи.

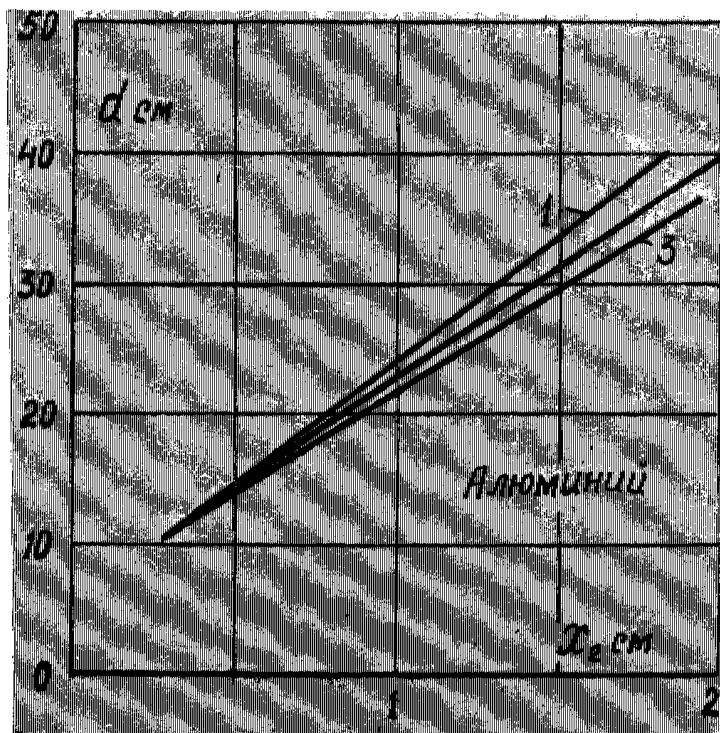


Рис. 2. Кривая 1 для $k_1=0,5$; 2—0,6; 3—0,7.

Таблица 4.

	М е д ь			А л ю м и н и й		
k_1	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7
a_5	4,75	5,6	6,0	4,1	4,7	5,1
a_6	27,6	24,9	23,4	22,2	20	18,7

Тогда функция (37) может быть приведена к виду:

$$f(x_2) = 10^{-3} \left[3N \left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} + \frac{M}{a_1 + a_2 x_2} \right) + (a_5 + a_6 x_2)^2 (a_7 + a_8 x_2) \right] \quad (43)$$

$$\text{где: } \left. \begin{aligned} a_7 &= 8k_{\text{я}} [\delta(n_1 + n_2 - 2) + 0,7a_5 + l_{\Gamma}] + 6 l_{\text{и}}; \\ a_8 &= 8k_{\text{я}} (\delta n_1 + n_2 + 0,7a_6). \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

Функция (40) приводится к виду:

$$\varphi(x_2) = 10^{-3} \left\{ 3N \left[\frac{1}{\sqrt{x_2}} + \frac{M(a_3 + a_4 x_2)}{x_2(a_1 + a_2 x_2)} \right] + (a_5 + a_6 x_2)^2 (a_7 + a_8 x_2) \right\} \quad (45)$$

Для определения критических значений x_2 , соответствующих минимумам упрощенных функций (43) и (45), первую производную этих функций приравняем нулю и найдем отсюда выражение для постоянной N , зависящей от мощности трансформатора.

Выражение постоянной N для минимума функции (43):

$$N_{II} = \frac{2x_2 \sqrt{x_2} (a_1 + a_2 x_2)^2 (a_5 + a_6 x_2) (2a_6 a_7 + a_5 a_8 + 3a_6 a_8 x_2)}{3[(a_1 + a_2 x_2)^2 + 2M a_2 x_2 \sqrt{x_2}]} \quad (46)$$

То же для минимума функции (45):

$$N_3 = \frac{2x_2^2 (a_1 + a_2 x_2)^2 (a_5 + a_6 x_2) (2a_6 a_7 + a_5 a_8 + 3a_6 a_8 x_2)}{3\{\sqrt{x_2} (a_1 + a_2 x_2)^2 + 2M[a_3(a_1 + a_2 x_2) + a_2 x_2(a_3 + a_4 x_2)]\}} \quad (47)$$

Кривые (рис. 3), построенные (соответственно для меди и алюминия) по данным, вычисленным из (47), могут быть использованы для определения критического значения x_2 . Вычислив N из (28), нахо-

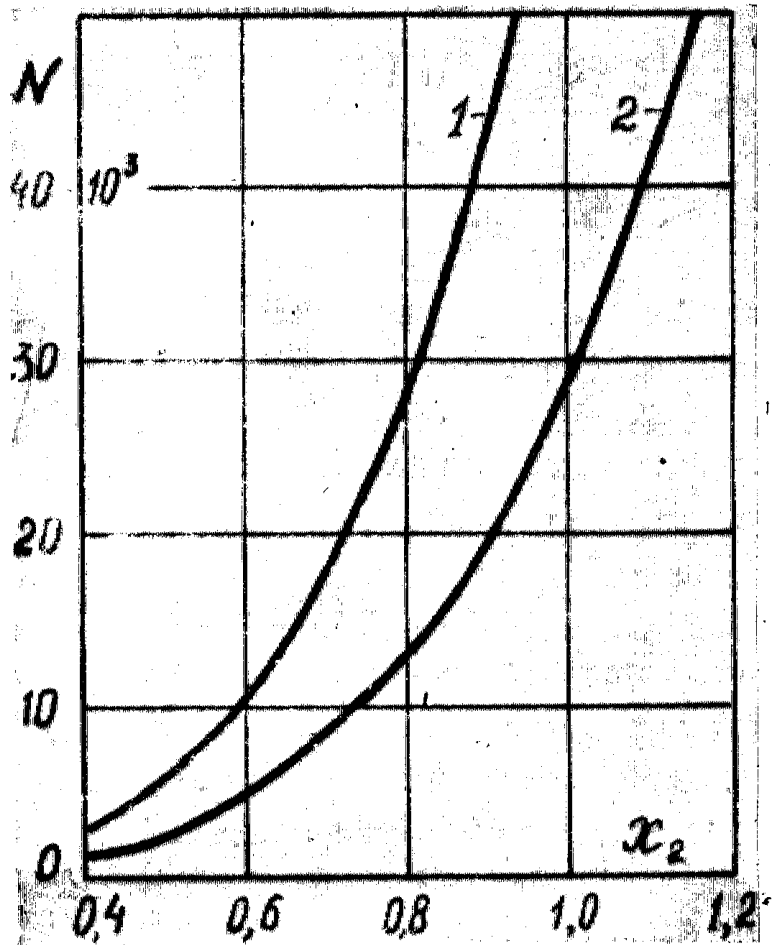


Рис. 3. Кривая 1 для меди и 2 для алюминия.

дим x_2 (для принятого материала обмоток и коэффициента k_1), соответствующее минимуму $\varphi(x_2)$.

Указанные кривые построены для двухслойных обмоток с двухсторонним охлаждением и пригодны для трансформаторов мощностью от 240 до 560 ква.

Построение подобных кривых по выражениям (46) и (47) для других исходных условий не представит особых трудностей.

Критические значения x_2 , определенные по кривым фиг. 3 для рассматриваемой задачи, указаны в таблице 5. Остальные размеры

для трансформатора 560 ква вычислены по приведенным выше формулам.

Как видно из таблицы 5, трансформатор с обмотками из меди, удовлетворяющий условию минимума расчетных затрат, имеет перерасход активных материалов на 4%, а трансформатор с обмотками из алюминия — на 12%. Этот перерасход относится к стали, так как затраты проводникового материала по сравнению с условием минимума Q_n снижаются. Минимальные расчетные затраты для трансформатора с алюминиевыми обмотками больше, чем с медными всего на 7%. Это указывает на целесообразность применения в трансформаторах малой мощности алюминия.

По данным [2] вес стали сердечника выпускаемых в настоящее время трансформаторов 560 ква с обмотками из меди составляет 810 кг и вес меди—260 кг. При $\beta=3,65$ приведенный вес $Q_n=1760$ кг.

Таблица 5.

Обозначение и способ определения величины	Для меди		Для алюминия	
	П О М И Н И М У М У			
	Q_n	Z	Q_n	Z
1 x_2 из табл. 3 и рис. 3	0,45	0,69	0,55	0,92
2 x_1 из (23)	0,713	1,07	0,87	1,42
3 Δ_1 из (20), а/см ²	430	350	300	235
4 Δ_2 из (20), а/см ²	500	410	349	272
5 d из рис. 1 и 2	17	22,2	16	22,6
6 h из (27)	84,5	39,6	109	43
7 a из (12)	15,9	18,2	16,9	20,6
8 H из (13)	91,5	46,6	116	50
9 l_m из (16)	78,5	98,5	77	103
10 $q_{m1}+q_{m2}$ из (27), см ²	134,0	94,5	211	137
11 Q_m из (35), кг	280	249	132	114
12 q_c из (18), см ²	190	310	169	322
13 l_c из (14)	432	337	505	358
14 Q_c из (34), кг	620	890	645	880
15 Q_n из (36), кг	1640	1710	1239	1393
16 Q_n %	100	104	100	112
17 Z из (39) и табл. 3, руб.	800	667	920	715
18 Z %	120	100	129	100
19 P_c из (6), квт	1,76	2,26	1,83	2,5
20 P_m из (7), квт	14,4	8,6	18,4	9,7

Потери в стали 2,5 квт и в меди 9,4 квт. Общие расчетные затраты для заводского трансформатора определены из выражения:

$$Z = Z_{та} + (C_1 p_n + C'_2 t) p_c + (C_1 p_m k^2_m + C''_2 t k^2_n) \left(\frac{S_m}{S} \right)^2 p_m + Z_n \quad (48)$$

и составляют 760 руб. Экономический трансформатор с медной обмоткой имеет общие затраты 667 руб. и экономию приведенных активных материалов на 50 кг (см. табл. 5).

В заключение необходимо отметить, что предлагаемый метод применим для трансформаторов с цилиндрическими обмотками, которые по данным [1] выполняются до мощности 560 ква.

Несмотря на некоторую громоздкость, этот метод имеет высокую точность и может оказаться полезным. Надо учесть также, что определение размеров серии трансформаторов в общем комплексе

проектирования этой серии занимают очень маленький удельный вес по затратам времени и труда. Использование вычислительных машин может упростить эту задачу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постников И. М., Проектирование электрических машин. Киев, 1960.
2. Петров Г. Н., Электрические машины, часть I, Госэнергоиздат, 1956.
3. Тихомиров П. М., Расчет трансформаторов. Госэнергоиздат, 1962.
4. Кутявин И. Д., Об экономическом выборе мощности трансформаторов Энергетик, № 1, 1962.