

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНЫХ ДВУХОБМОТОЧНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Г. В. ДЕЛЬ

Рекомендовано научным семинаром кафедры электрических станций

В [1] и [2] изложен метод технико-экономических исследований силовых трансформаторов, предложенный И. Д. Кутявиным, В. П. Красновым и автором данной статьи. В приведенном виде этот метод довольно сложен и пригоден в основном для комплексных исследований, особенно вновь проектируемых трансформаторов. Метод не исключает использование электронно-вычислительных машин.

В настоящей работе показано, что названный метод путем ввода ряда допущений (без значительного уменьшения точности расчета) может быть упрощен и сведен к инженерной методике расчета и исследования трансформаторов. Рассматриваются трехфазные двухобмоточные силовые трансформаторы с обмотками катушечного типа (предполагается, что выражение механического напряжения в обмотке при коротком замыкании за трансформатором не входит в систему уравнений «физического ограничения»).

Ранее нами была показана слабая зависимость величины расчетных затрат от осевого размера катушек (без изоляции) первичной и вторичной обмоток y_1 и y_2 (см. [2]). Ценность этого вывода возрастает за счет того, что минимум расчетных затрат всегда лежит в диапазоне конструктивных значений y_1 и y_2 ($0,7 \div 2,0$ см). Для этих пределов возможное отклонение суммарных расчетных затрат от минимальных не превышает $2 \div 3\%$. На основании этих соображений принимаем первое допущение

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \text{const} \\ y_2 &= \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Это допущение означает, что можно заранее выбрать (задаться) наибольшей стороной элементарного проводника из стандартного ряда прямоугольных проводов.

Из [2] уравнение теплового баланса обмоток запишется

$$k_{\text{п}} x + y = L \frac{xy\Delta^2}{1 + \lambda\Delta y} \quad (2)$$

(обозначения величин соответствуют [2]).

Анализ показал возможность принятия допущения

$$k_{II} x + y \approx x. \quad (3)$$

Последнее близко к истине, так как $0,5 < k_{II} < 1$, а $y < 2$ (обычно), поэтому

$$(1 - k_{II})x \approx y. \quad (3')$$

С учетом 3 из 2 имеем

$$\Delta_1 = \frac{\lambda_1 + \sqrt{\lambda_1^2 + \frac{4L_1}{y_1}}}{2L_1},$$

$$\text{и } \Delta_2 = \frac{\lambda_2 + \sqrt{\lambda_2^2 + \frac{4L_2}{y_2}}}{2L_2}. \quad (4)$$

С учетом (1), выражение (4) означает

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= \text{const} \\ \Delta_2 &= \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (4')$$

Допущение (4'), являющееся следствием (3), подтверждается расчетным путем. Приняв эти допущения, мы должны принять необходимость постоянства выражений

$$\frac{y_1 \Delta_1}{(1 + \lambda_1 \Delta_1 y_1)(y_1 + \delta_1)} = Y_1 = \text{const}, \quad (5)$$

$$\frac{y_2 \Delta_2}{(1 + \lambda_2 \Delta_2 y_2)(y_2 + \delta_2)} = Y_2 = \text{const}. \quad (6)$$

На основании равенства намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток [2], учитывая (5) и (6), имеем

$$x_2 = b x_1, \quad (7)$$

где

$$b = \frac{Y_1}{Y_2}. \quad (8)$$

Зависимость (7) также согласуется с расчетными данными. Расчетным путем нами выявлена прямо пропорциональная зависимость диаметра стержня d от радиальной ширины катушки первичной обмотки x_1 . На основании этого, для значений $x_1 > 3 \div 4$ см принимаем третье допущение

$$d \equiv x_1, \quad (9)$$

или

$$d = a x_1 - c. \quad (9')$$

Для определения «а» и «с» воспользуемся теоремой Лагранжа, как частным случаем обобщенной теоремы Коши о среднем значении [3]. Представляя спрямленную функцию диаметра (9'), как хорду, проведенную через две точки (предположим А и В) кривой $d(x_1)$, по формуле Лагранжа найдем угловой коэффициент этой хорды

$$a = \frac{d_B - d_A}{x_{1B} - x_{1A}}. \quad (10)$$

Тогда уравнение прямой запишется так:

$$(d_B - d_a) = a(x_{1B} - x_{1a}), \quad (11)$$

где d_a и d_B — значения диаметра стержня, подсчитанные для $x_1 = x_{1a}$ и $x_1 = x_{1B}$ в точках А и В (по формуле (13) работы [2]).

Выражение (11) с учетом (10) легко преобразуется к виду

$$d = \frac{d_B - d_a}{x_{1B} - x_{1a}} x_1 - \frac{d_B x_{1a} - d_a x_{1B}}{x_{1B} - x_{1a}}.$$

Таким образом,

$$a = \frac{d_a}{x_{1B} - x_{1a}} \left(\frac{d_B}{d_a} - 1 \right), \quad (12)$$

$$c = \frac{d_a}{x_{1B} - x_{1a}} \left(\frac{d_B}{d_a} x_{1a} - x_{1B} \right). \quad (13)$$

Согласно предварительным расчетам можно рекомендовать придерживаться следующих ограничений при выборе значений x_{1a} и x_{1B} : $x_{1a} > 5$, а $x_{1B} < 10$ — для медных обмоток и $x_{1a} > 7$, $x_{1B} < 12$ — для алюминиевых обмоток.

Используя формулы (15) и (6) работы [2] и учитывая (1), (4'), (7) и (9'), можно выразить суммарные годовые расчетные затраты на производство и эксплуатацию трансформатора в функции одной независимой переменной, предположим d . Если после этого взять первую производную расчетных затрат по d и приравнять ее нулю с целью нахождения оптимального значения диаметра стержня, соответствующего минимуму расчетных затрат, то получим следующее уравнение относительно d (сокращенный вывод см в приложении).

$$\frac{N}{S} d^4 (3b_1 d + 2c_1) = M(Rd + 2L) + \frac{a^2 d^3}{Y_1(d+c)}, \quad (14)$$

где для сокращения записи принято:

$$N = \frac{8}{3} K k_{\text{я}} \frac{A + DB^2 \frac{1}{k_{\text{я}}^2} + 1,5 \alpha_{\text{ря}}}{A + DB^2 + 1,5 \alpha_{\text{рст}}}; \quad (15)$$

$$M = \frac{4 \gamma_{\text{м}}}{\Delta_1 \gamma_{\text{с}} k_{\text{с}}} \cdot \frac{\beta A + E \Delta_1^2}{A + DB^2 + 1,5 \alpha_{\text{рст}}}; \quad (16)$$

$$r = \frac{\beta A + E \Delta_2^2}{\beta A + E \Delta_1^2} \cdot \frac{\Delta_1}{\Delta_2}; \quad (17)$$

$$R = 1 + b + (a + b)(1 + r); \quad (18)$$

$$L = c[1 + b(2 + r)] + a[2\delta_{12} + 2\delta_{02}(1 + r)]; \quad (19)$$

$$b_1 = 1 + b + 0,7a; \quad (20)$$

$$c_1 = c(1 + b) + a \left(l_{\text{r}} + \frac{3}{4} l_{\text{u}} \right). \quad (21)$$

Уравнение (14) является уравнением седьмой степени относительно d , поэтому строго аналитически не разрешимо. Однако можно принять для d такую форму записи:

$$d = \sqrt[4]{\frac{S}{N}} \cdot \sqrt[4]{M \cdot \frac{Rd+2L}{3b_1d+2c_1} + \frac{a^2d^3}{Y_1(d+c)^2(3b_1d+2c_1)}} \quad (22)$$

В таблице 1 приводится изменение d , подсчитанное по (22), для различных значений d , принятых в подкоренном выражении второго из сомножителей (22). (Для $S = 10$ Мва; $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,1$ вт/см²).

Т а б л и ц а 1

№ п. п.	Принимаемое d	0	20	40	60	80	100
1.	Подкоренное выражение 2-го из сомнож. (22)	0,0638	0,0614	0,0653	0,0677	0,0697	0,0711
2.	Второй из сомножителей (22)	0,501	0,498	0,506	0,509	0,514	0,516
3.	d по (22), см	42,9	42,6	43,3	43,6	44	44,2

На основании данных этой таблицы можно не решать уравнение (22) относительно d , а принять, что его (уравнения) второй сомножитель не зависит от d .

Поэтому оптимальное значение диаметра окружности, описанной около ступенчатого стержня, можно найти из формулы [приняв $d = 40$ см в подкоренном выражении (22)]:

$$d = \sqrt[4]{\frac{S}{N}} \cdot \sqrt[4]{\frac{20R+L}{60b_1+c_1} \cdot M + \frac{8a^2 \cdot 10^3}{Y_1 \left(20 + \frac{c}{2}\right)^2 (60b_1+c_1)}} \quad (23)$$

Это выражение для d является показательным до некоторой степени, ибо показывает, что $S \equiv d^4$. Такой вывод у нас получился только потому, что было принято $B = \text{const}$ и $\Delta = \text{const}$.

После определения d , из (23) или (22) находим x_1 из выражения

$$x_1 = \frac{d+c}{a} \quad (24)$$

Остальные размеры и параметры трансформатора определяются по формулам:

$$\Delta_1 = \frac{\lambda_1 + \sqrt{\lambda_1^2 + \frac{2z_1}{y_1}}}{z_1}, \quad (25)$$

$$\text{где } z_1 = \frac{2L_1x_1}{k_{n1}x_1 + y_1};$$

$$\Delta_2 = \frac{k_{n2}\lambda_2 + \frac{y_2}{X(y_2 + \delta_2)} + \sqrt{\left[k_{n2}\lambda_2 + \frac{y_2}{X(y_2 + \delta_2)} \right]^2 + 4L_2 \frac{k_{n2}}{y_2}}}{2L_2}, \quad (26)$$

$$\text{где } \lambda = \frac{x_1 y_1 \Delta_1}{(1 + \lambda_1 y_1 \Delta_1)(y_1 + \delta_1)};$$

$$x_2 = \frac{X}{\Delta_2 y_2} (1 + \lambda_2 y_2 \Delta_2)(y_2 + \delta_2); \quad (27)$$

$$h = \frac{S}{K} \cdot \frac{1}{X d^2}. \quad (28)$$

В таблице 2 приведены данные некоторых трансформаторов, рассчитанных по точному методу [2] и по предложенной упрощенной методике.

Таблица 2

№ п. п.	Расчет по упрощенной методике			[2]			
	материал обмотки	медь		алюми- ний	медь		алюми- ний
		10	80		10	80	
1.	$x_1, \text{ см}$	6,88	8,9	9,6	6,96	9,42	10,5
2.	$y_1, \text{ см}$	1,0	1,5	1,5	1,0	1,75	2,0
3.	$\Delta_1, \text{ а/см}^2$	442	383	264	453	365,5	248
4.	$x_2, \text{ см}$	4,12	6,54	6,4	4,1	6,68	6,38
5.	$y_2, \text{ см}$	1,0	1,5	1,5	1,0	1,45	1,48
6.	$\Delta_2, \text{ а/см}^2$	335	327	208	346	327,5	207
7.	$d, \text{ см}$	43,3	72,7	47	42	72,4	46,7
8.	$h, \text{ см}$	105	192	160	109	190,5	163
9.	$Q_c, \text{ кг}$	7390	33320	11390	6960	33212	11346
10.	$Q_m, \text{ кг}$	1967	9600	1522	1990	9886	1595
11.	$Q_n, \text{ кг}$	13960	60970	17200	13340	61830	17410
12.	$P_c, \text{ вт}$	14440	51900	17750	10820	51950	17850
13.	$P_m, \text{ вт}$	73100	29300	114500	78500	287000	108300
14.	$\Sigma P, \text{ вт}$	84540	344900	129250	89300	338950	126150
15.	$Z, \text{ руб.}$	4805	18570	6250	4830	18568	6227

Примечание. Обозначение величин в таблице соответствует [2].

Общий вывод: имеются реальные способы упрощения предложенного ранее метода технико-экономических исследований трансформаторов (см. [1] и [2]), один из которых, применительно к трехфазным трансформаторам, показан выше. При этом, точность расчета, связанная с принятием определенных допущений, остается вполне удовлетворительной по сравнению с расчетом по [2]. В данном случае (согласно таб. 2) погрешность расчета по предложенной методике не превышает 1,5% при сравнении по величине расчетных затрат.

Приложение: после подстановки переменных в упрощенном виде и преобразований формул (15) и (16) работы [2] получим:

$$Z = \frac{3}{4} \pi \gamma_c k_c \cdot \frac{S}{K} (A + dB^2 + 1,5\alpha_{\text{рст}}) \varphi(x_1),$$

где

$$\varphi(x_1) = \frac{1}{Y_1 x_1} + \frac{N}{S} (ax_1 - c)^2 (b_1 x_1 - 0,7c + l_r + \frac{3}{4} l_u) +$$

$$+ \frac{M}{(ax_1 - c)^2} [(a + 2b + 1 + ra + rb)x_1 + (l_1 - 2c + r \cdot \delta_{e2})].$$

Здесь N , M и r соответствуют (15) ÷ (17). От $\varphi(x_1)$ можно перейти к $\varphi(d)$, если вместо x_1 подставить (24).

$$\varphi(d) = \frac{a}{Y(d+c)} + \frac{N}{S \cdot a} d^2 (b_1 d + c_1) + M \frac{(Rd + L)}{a \cdot d^2};$$

где b_1 , c_1 , R и L согласно (18) ÷ (21).

Взяв первую производную $\varphi(d)$ по d , получим:

$$\varphi'(d) = -\frac{a}{Y_1(d+c)^2} + \frac{N}{a \cdot S} [2d(b_1 d + c_1) + b_1 d^2] +$$

$$+ \frac{M}{a} \cdot \frac{Rd^2 - 2d(Rd+L)}{d^4},$$

что после преобразования дает уравнение (14).

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», т. 130, 1964.
2. Г. В. Дель, В. П. Краснов. Техничко-экономические исследования оптимальных размеров силовых трансформаторов, «Известия ТПИ», т. 132, 1965.
3. В. И. Смирнов. Курс высшей математики, ГИТТЛ, т. 1, 1953.