ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 152 1966

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

$$\left.\begin{array}{l} y_1 = \text{const} \\ y_2 = \text{const} \end{array}\right| . \qquad (1)$$

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

Из [2] уравнение теплового баланса обмоток запишется

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

(обозначения величин соответствуют [2]).

Анализ показал возможность принятия допущения

$$k_{п}\, x+y\approx x. \tag{3}$$

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

$$(1-k_{п})x\approx y. \tag{3'}$$

С учетом 3 из 2 имеем

$$\left.\begin{aligned}\Delta_1&=\frac{\lambda_1+\sqrt{\lambda^2_1+\dfrac{4L_1}{y_1}}}{2L_1}\,;\\ \text{и }\Delta_2&=\frac{\lambda_2+\sqrt{\lambda^2_2+\dfrac{4L_2}{y_2}}}{2L_2}\,.\end{aligned}\right| \tag{4}$$

С учетом (1), выражение (4) означает

$$\left.\begin{aligned}\Delta_1&=\mathrm{const}\\ \Delta_2&=\mathrm{const}\end{aligned}\right\} \tag{4'}$$

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

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

$$\frac{y_2\Delta_2}{(1+\lambda\Delta_2 y_2)\ (y_2+\delta_2)}=Y_2=\mathrm{const}. \tag{6}$$

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

$$x_2=b\,x_1, \tag{7}$$

где

$$b=\frac{Y_1}{Y_2}\,. \tag{8}$$

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 $x_1>3\div4$ *см* принимаем третье допущение

$$d\approx x_1, \tag{9}$$

или

$$d=ax_1-c. \tag{9'}$$

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

$$a=\frac{d_в-d_а}{x_{1в}-x_{1а}}\,. \tag{10}$$

Тогда уравнение прямой запишется так:

$$(d_в - d_а) = a(x_{1в} - x_{1а}), \tag{11}$$

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

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

$$d = \frac{d_в - d_а}{x_{1в} - x_{1а}} x_1 - \frac{d_в\ x_{1а} - d_а\ x_{1в}}{x_{1в} - x_{1а}} .$$

Таким образом,

$$a = \frac{d_а}{x_{1в} - x_{1а}} \left(\frac{d_в}{d_а} - 1 \right), \tag{12}$$

$$c = \frac{d_а}{x_{1в} - x_{1а}} \left(\frac{d_в}{d_а} x_{1а} - x_{1в} \right). \tag{13}$$

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

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

где для сокращения записи принято:

$$N = \frac{8}{3} K k_я \frac{A + ДB^2 \frac{1}{k^2_я} + 1,5\,\alpha_{ря}}{A + ДB^2 + 1,5\,\alpha_{рст}}; \tag{15}$$

$$M = \frac{4\gamma_м}{\Delta_1 \gamma_с\ k_с} \cdot \frac{\beta A + E\Delta^2_1}{A + ДB^2 + 1,5\,\alpha_{рст}}; \tag{16}$$

$$r = \frac{\beta A + E\Delta^2_2}{\beta A + E\Delta^2_1} \cdot \frac{\Delta_1}{\Delta_2}; \tag{17}$$

$$R = 1 + b + (a + b)(1 + r); \tag{18}$$

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

$$b_1 = 1 + b + 0,7a; \tag{20}$$

$$c_1 = c(1 + b) + a\left(l_г + \frac{3}{4} l_и \right). \tag{21}$$

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

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

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/см*^{2}).

Таблица 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)]:

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

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 = const и Δ = const.

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

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

Остальные размеры и параметры трансформатора определяются по формулам:

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

где $z_1=\dfrac{2L_1x_1}{k_{п1}x_1+y_1}$;

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

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

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

$$h = \frac{S}{K}\cdot\frac{1}{Xd^2}. \tag{28}$$

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		алюминий	медь		алюминий
	S, *мва*	10	80	16	10	80	16
1.	x_1, *см*	6,88	8,9	9,6	6,96	9,42	10,5
2.	y_1, *см*	1,0	1,5	1,5	1,0	1,75	2,0
3.	Δ_1, *а/см²*	442	383	264	453	365,5	248
4.	x_2, *см*	4,12	6,54	6,4	4,1	6,68	6,38
5.	y_2, *см*	1,0	1,5	1,5	1,0	1,45	1,48
6.	Δ_2, *а/см²*	335	327	208	346	327,5	207
7.	d, *см*	43,3	72,7	47	42	72,4	46,7
8.	h, *см*	105	192	160	109	190,5	163
9.	$Q_{\text{с}}$, *кг*	7390	33320	11390	6960	33212	11346
10.	$Q_{\text{м}}$, *кг*	1967	9600	1522	1990	9886	1595
11.	$Q_{\text{п}}$, *кг*	13960	60970	17200	13340	61830	17410
12.	$P_{\text{с}}$, *вт*	11440	51900	17750	10820	51950	17850
13.	$P_{\text{м}}$, *вт*	73100	29300	111500	78500	287000	108300
14.	ΣP, *вт*	84540	344900	129250	89300	338950	126150
15.	$З$, *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:

$$З = \frac{3}{4}\pi\gamma_{\text{с}} k_{\text{с}} \cdot \frac{S}{K}(A + ДB^2 + 1{,}5\sigma_{\text{рст}})\varphi(x_1),$$

где $$\varphi(x_1)=\frac{1}{Y_1 x_1}+\frac{N}{S}(ax_1-c)^2(b_1x_1-0{,}7c+l_\text{г}+\frac{3}{4}l_\text{ц})+$$

$$+\frac{M}{(ax_1-c)^2}[(a+2b+1+ra+rb)x_1+(l_1-2c+r\cdot\delta_{02})].$$

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

$$\varphi(d)=\frac{a}{Y(d+c)}+\frac{N}{S\cdot a}d^2(b_1d+c_1)+M\frac{(Rd+L)}{a\cdot d^2};$$

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

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

$$\varphi'(d)=-\frac{a}{Y_1(d+c)^2}+\frac{N}{a\cdot S}[2d(b_1d+c_1)+b_1d^2]+$$

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

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. Технико-экономические исследования оптимальных размеров силовых трансформаторов, «Известия ТПИ», т. 132, 1965.
3. В. И. Смирнов. Курс высшей математики, ГИТТЛ, т. 1, 1953.