

О ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ С МНОГОСЛОЙНЫМИ ОБМОТКАМИ

И. Д. КУТЯВИН, Л. И. ДЕЛЬ.

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций
и кафедры электрических систем и сетей)

В дополнение к [1] в данной статье рассматривается определение предельной мощности трансформаторов с обобщенной катушечной (непрерывная катушечная, дисковая и винтовая) обмоткой НН (низкого напряжения) и многослойной обмоткой ВН (высокого напряжения).

Для исследования воспользуемся выражением мощности трансформатора на один стержень (Мва)

$$S_c = K \cdot \Delta \cdot V q_m q_c, \quad (1)$$

где Δ — плотность тока в обмотке, a/cm^2 ;

V — индукция в стали стержня, $гс$;

q_c — площадь сечения стали стержня, $см^2$;

q_m — полная площадь сечения материала обмотки, $см^2$;

$$K = 4,44 f \cdot 10^{-11}. \quad (2)$$

Примем следующие ограничения и упрощения:

1. Ограничена удельная теплоотдача с поверхности обмотки, $ε$ вт/ $см^2$;

2. Ограничено напряжение короткого замыкания U_K в соответствии с ГОСТ;

3. Ограничены транспортные габариты трансформатора;

4. Не учитываются добавочные потери от циркулирующих токов в параллельных проводниках в предположении идеальной транспортиции.

Для слоевых обмоток уравнение теплового баланса на единицу длины среднего слоя по [2]:

$$2hεk_{п2} = ρkr2Δ_2^2 \frac{x_2 y_2}{(y_2 + i_2)} \cdot h, \quad (3)$$

где $k_{п2}$ — коэффициент, учитывающий закрытие части поверхности слоя изоляционными деталями;

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

h — осевая высота обмотки, $см$;

x_2 — радиальная ширина меди слоя обмотки, $см$;

y_2 — осевой размер меди провода, $см$;

i_2 — толщина изоляции проводника на две стороны, $см$.

Коэффициент увеличения активного сопротивления материала обмотки из-за поверхностного эффекта для слоевых обмоток на основании [3] выразится

$$k_{r2} = 1 + \frac{c^2 x_2^4 y_2^2 m_2^2}{9(y_2 + i_2)^2}, \quad (4)$$

$$c = \pi \cdot f \frac{\mu_0}{\rho}, \quad (5)$$

где f — частота тока, $гц$;

μ_0 — магнитная проницаемость воздуха.

Плотность тока в обмотке определяется из (3):

$$\Delta_2 = \sqrt{\frac{a_2(y_2 + i_2)}{x_2 y_2 k_{r2}}}, \quad (6)$$

где

$$a_2 = \frac{2\epsilon k_{\pi^2}}{\rho}. \quad (7)$$

Площадь поперечного сечения меди обмотки

$$q_{m2} = \frac{x_2 y_2 m_2}{(y_2 + i_2)} \cdot h, \quad (8)$$

где m_2 — число слоев обмотки ВН.

Площадь поперечного сечения стали стержня

$$q_c = k_c \frac{\pi}{4} d^2, \quad (9)$$

где d — диаметр окружности, описанной около ступенчатого стержня, $см$;

k_c — коэффициент заполнения сталью площади круга диаметром d .

Выражение мощности (1) с учетом (6), (8), (9) примет вид

$$S_c = KB \frac{k_c \pi}{4} d^2 h \cdot \sqrt{\frac{\alpha_2 m_2^2 x_2 y_2}{k_{r2}(y_2 + i_2)}}. \quad (10)$$

С ростом переменных d , h мощность трансформатора неограниченно возрастает. При определении предельной мощности по транспортным габаритам величина d и h определяется этими габаритами [1]. С увеличением m_2 мощность стремится к некоторому пределу

$$\sqrt{\frac{m_2^2 x_2 y_2}{k_{r2}(y_2 + i_2)}} \Big|_{m_2 \rightarrow \infty} = \sqrt{\frac{9(y_2 + i_2)}{c^2 x^3 y_2}}. \quad (11)$$

При заданных значениях Δ_2 и x_2 величина y_2 определяется номинальным током вторичной обмотки стержня

$$I_{нс2} = x_2 y_2 \Delta_2. \quad (12)$$

В результате выражение мощности (10) имеет максимум только по переменной x_2 .

Дифференцируя (10) по x_2 , после преобразований получаем уравнение

$$k_{r2} - x_2 k_{r2}^1(x) = 0, \quad (13)$$

где $k_{r2}^1(x)$ — производная k_{r2} по x_2 .

Решая уравнение (13), получаем

$$x_{20} = \sqrt[4]{\frac{3(y_2 + i_2)}{cm_2 y_2}}. \quad (14)$$

Для определения y_2 воспользуемся выражением для тока стержня вторичной обмотки (12).

$$y_2 = \frac{I_{нс2}}{x_2 \Delta_2}. \quad (15)$$

С учетом (6) и (14) формула (15) принимает вид

$$y_2 = I_{нс2} \sqrt[4]{\frac{cm_2 \cdot r_2^2}{3 \alpha^2}} - i_2, \quad (16)$$

где

$$I_{nc2} = \frac{\sqrt{3} S_c}{U} . \quad (17)$$

При выводе формулы (16) принято, что

$$y_2(y_2 + i_2)^3 \cong (y_2 + i_2)^4 . \quad (18)$$

Погрешность, получаемая при такой замене, при $i_2 = 0,1 \div 0,3$ и $y_2 \geq 1$ не выходит за пределы $(1 \div 7)$ проц.

При подстановке (14) в (10) получаем

$$S_c = K B q_c h \cdot m_2^{\frac{3}{4}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\sqrt{3} \alpha_2}{c k_{r2}^2}} . \quad (19)$$

Коэффициент k_{r2} для слоевых обмоток при подстановке оптимального x_2 из (14) будет равен

$$k_{r2} = 1 + \frac{1}{3} . \quad (20)$$

В случае расщепления проводника толщиной x_2 на k параллельных ветвей в [3] показано, что оптимальный коэффициент выразится

$$K_{r2k} = 1 + \frac{1}{3k^2} . \quad (21)$$

В табл. 1 с 1 по 9 пункты определены геометрические размеры и параметры трансформаторов предельных мощностей со слоевыми обмотками на стороне ВН при заданных постоянных величинах:

Таблица 1.

№ п.п.	m_2	4	6	8	10	12	16
1	δ_2	4,3	2,9	2,2	1,7	1,45	1,1
2	S_c	136,5	184	228	264	298	377
3	Y_{02}	0,543	0,982	1,39	1,82	2,23	3,09
4	X_{02}	0,840	0,626	0,525	0,460	0,414	0,353
5	B_2	9,66	10,76	11,9	12,7	12,7	14,05
6	K_{r2}	1,0210	1,037	1,0830	1,0830	1,0830	1,0830
7	Δ_2	616	650	670	704	730	780
8	K	4	3	2	2	2	2
9	B_1	5,8	8,1	10,1	12	13,8	17,6
10	x_1	0,173	0,138	0,123	0,114	0,104	0,09
11	Y_1	1,16	0,99	0,91	0,88	0,85	0,81
12	Δ_1	466	486	496	502	509	522
13	q_{m2}	562	748	896	1026	1114	1340
14	l_m	525	536	544	555	560	576
15	δ_{21}	6	6	6	6	6	6
16	δ^1	25,73	27,4	29	30,35	31,25	35,8
17	δ_0	10	10	10	10	10	10
18	I_p	0,0324	0,05	0,066	0,085	0,099	0,15

$$h = 260 \text{ см}; \quad d = 120 \text{ см}; \quad \rho = 2,14 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}; \quad k_c = 0,8; \\ k_R = 0,95; \quad B = 17\,500 \text{ гс}; \quad f = 50 \text{ гц}; \quad k_{п2} = 0,75; \quad i_2 = 0,3 \text{ см}; \\ C = 0,92; \quad \varepsilon = 0,3 \text{ вт/см}^2; \quad \delta_{02} = 10 \text{ см}.$$

Параллельные проводники выполнены с эмалевой изоляцией толщиной 0,01 см, а витковая изоляция выполняется из электрокартона.

Как отмечалось выше, мощность стержня S_c увеличивается с ростом числа слоев обмотки m_2 . Наряду с этим резко растет и напряжение короткого замыкания, достигая недопустимой величины, как было показано в [1]. Для снижения величины напряжения короткого замыкания обмотку высокого напряжения выполняют с двумя концентриками, как на рис. 1. Тогда напряжение короткого замыкания будет определяться по формуле

$$U_p = \frac{k_R \Delta_2 q_{m2} l_m \delta^1}{3,33 B q_c \cdot h} , \quad (22)$$

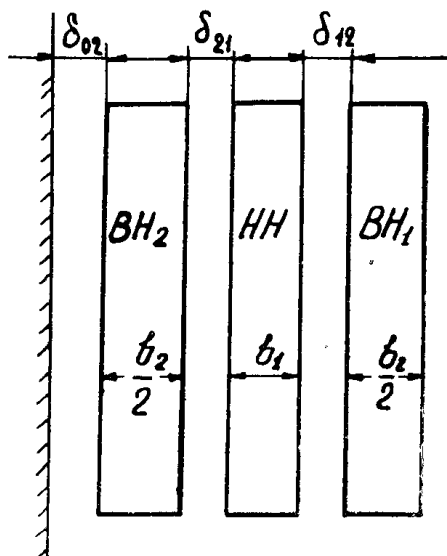


Рис. 1

где

$$\delta^1 = 0,5 b_1 + 0,5 b_2 + 3 \delta_{12}; \quad (23)$$

$$I_M = \pi d_{12}; \quad (24)$$

d_{12} — средний диаметр канала рассеяния, см;

δ' — приведенная ширина канала рассеяния, см;

δ_{01} — изоляционное расстояние от стержня до обмотки, см;

δ_{01} — изоляционное расстояние от стержня до обмотки, см;

b_2 — ширина обмотки высокого напряжения, см;

$$b_2 = m_2 x_2 + \delta_2 (m_2 - 1), \quad (25)$$

δ_2 — осевой канал обмотки высокого напряжения, определяемый межслоевым напряжением и пробивным напряжением на 1 см (пробивное напряжение для масла 25 кВ/см), см;

b_1 — ширина обмотки низкого напряжения, см.

Для определения размеров «обобщенной катушечной» обмотки НН воспользуемся рис. 2, на котором представлены зависимости $b_1 = f(S_c)$; $x_1 = f(S_c)$; $y_1 = f(S_c)$ и $\Delta_1 = f(S_c)$, построенные по данным [1].

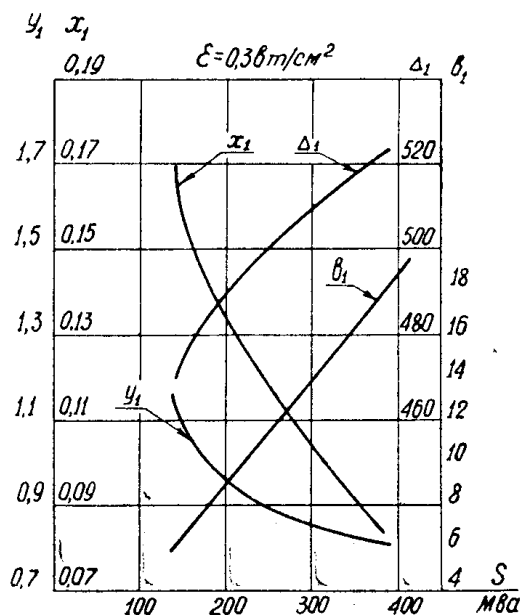


Рис. 2

По S_c , взятой из табл. 1, пользуясь рис. 2, определяем соответствующие размеры обмотки НН, приведенные в пунктах 10÷17 табл. 1. По данным обмотки ВН и НН определено напряжение u_p , показанное в пункте 18.

При определении предельной мощности трансформаторов величины d и h находятся из допустимых железнодорожных габаритов.

Принимая во внимание вышеизложенное, можно определять размеры трансформатора при максимальном использовании активных материалов по заданной мощности и напряжению короткого замыкания, в случае применения катушечной обмотки НН и многослойной обмотки ВН.

По [1] определяется x_1 ; y_1 ; Δ_1 и находится отношение $\frac{S_c}{d^2 h}$

$$\frac{S_c}{d^2 h} = \frac{K \cdot B \cdot k_c \cdot \pi \cdot b_1 \cdot x_1 y_1 \Delta_1}{4(x_1 + i_1)(y_1 + \delta_1)} \quad (26)$$

Далее строятся зависимости

$$x_1 = f\left(\frac{S_c}{d^2 h}\right); \quad y_1 = f\left(\frac{S_c}{d^2 h}\right); \quad \Delta_1 = f\left(\frac{S_c}{d^2 h}\right); \quad b_1 = f\left(\frac{S_c}{d^2 h}\right).$$

Используя заданную мощность стержня, напряжение короткого замыкания и принятое число слоев слоевой обмотки, рассчитывают последовательно параметры обмотки высокого напряжения (y_2 ; x_2 ; b_2 ; Δ_2), определяют отношение:

$$\frac{S_c}{d^2 h} = \frac{KB \cdot k_c \pi}{4} \cdot \frac{x_2 y_2 \cdot \Delta_2 m_2}{(y_2 + i_2)} \quad (27)$$

По полученному отношению $\left(\frac{S_c}{d^2 h}\right)$ определяется из графика (рис. 3) — b_1 .

Решая совместно уравнение мощности (10) и уравнение напряже-

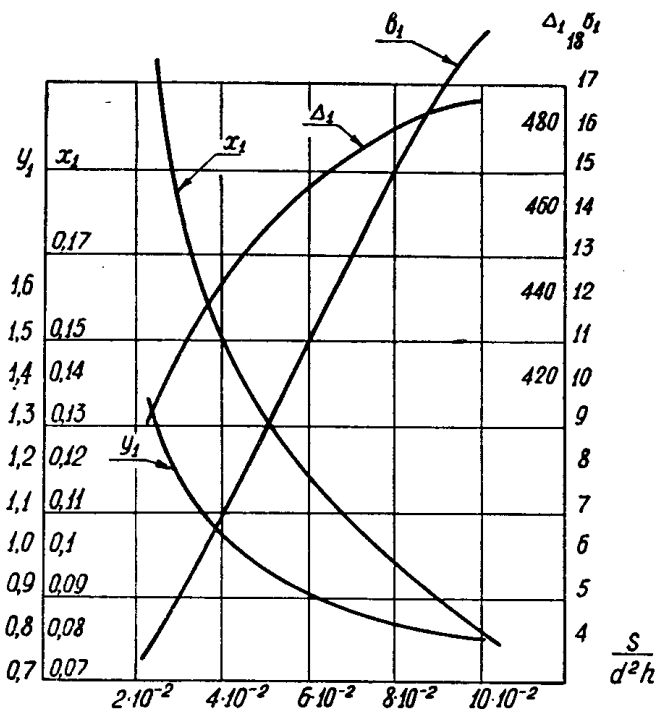


Рис. 3

Таблица 2

№ п.п.	S_c	100	150	200	250	300
1	m_2	4	6	8	10	12
2	I_{2c} (из 17)	231	347	462	578	694
3	Y_{02} (из 16)	0,455	0,96	1,505	2,1	2,58
4	X_{02} (из 14)	0,882	0,64	0,53	0,464	0,417
5	Δ_{20} (из 25)	507	526	555	580	604
6	b_2 (из 25)	16,42	18,33	19,64	19,94	21
7	δ_2	4,3	2,9	2,2	1,7	1,45
8	b_1 (из рис. 3)	4,1	6,1	8,2	10,2	12,1
9	Y_1 (из рис. 3)	1,3	1,09	0,98	0,92	0,88
10	X_1 (из рис. 3)	0,25	0,158	0,136	0,121	0,111
11	Δ_1 (из рис. 3)	415	437	452	462	470
12	h (из 29)	890	416	241	164	134
13	d (из 28)	65,5	97,6	131,5	162,5	183,6
14	$\frac{S_c}{d^2h}$ (из 27)	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$3,72 \cdot 10^{-2}$	$4,76 \cdot 10^{-2}$	$5,71 \cdot 10^{-2}$	$6,55 \cdot 10^{-2}$

ния короткого замыкания (обмотка ВН выполнена с одним концентром)

$$u_p = \frac{2k_R \Delta_2 q_{M2} \cdot I_M \cdot \delta^1}{3,33 V q_c h}, \quad (28)$$

находим последовательно высоту обмотки и диаметр стержня.

Расчет трансформатора по заданной мощности и напряжению короткого замыкания представлен в табл. 2 при следующих принятых постоянных: $\epsilon = 0,26$ вт/см²; $U_p = 0,13$; $U = 750$ кВ; $V = 17\,500$ гс; $\delta_{01} = 5$ см. Остальные постоянные такие же, как и для табл. 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Д. Кутявин, Л. И. Дель. «О предельной мощности трансформатора». Изв. ТПИ, т. 172.
 2. И. Д. Кутявин. «К определению оптимальных размеров трехфазных двухобмоточных трансформаторов». Изв. ТПИ, т. 130, 1964.
- Dietrich W. Auslegung von Transformatorenwicklungen mit kleinstem Wirkwiderstand „Elektrotechnische Zeitschrift“, № 6, 1965 j.