

О ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ С МИНИМАЛЬНЫМ АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

И. Д. КУТЯВИН

В статье рассматривается локальный вопрос оптимизации размеров катушечных обмоток силовых трансформаторов, исходя из минимума добавочных потерь в меди (алюминии) на вихревые токи при постоянстве геометрии сердечника. Фундаментальное решение этой задачи возможно только при общем технико-экономическом определении оптимальной геометрии и параметров трансформаторов с учетом добавочных потерь в меди. Однако несомненный теоретический и практический интерес представляет и частное решение этой задачи, предлагаемое в статье.

Рассмотрение данного вопроса приводится в [1], где автор аналитически определяет оптимальные размеры элементарных проводников и число витков в катушке, исходя из максимального заполнения медью площади обмотки. В статье указывается, что «для катушечных обмоток невозможно аналитически определить минимум активного сопротивления обмотки» и решается эта задача на ЭЦВМ. Между тем имеется возможность аналитически определить условия проектирования катушечных обмоток (дисковых, непрерывных катушечных и винтовых) с минимальным активным сопротивлением.

Рассмотрим решение этой задачи для случая когда заданы: осевая высота обмотки — h , радиальная ширина катушки — b и число витков обмотки — w , осевое расстояние между медью соседних катушек — δ (состоящее из радиального охлаждающего канала и из изоляции катушки на две стороны), толщина изоляции элементарного проводника на две стороны — i . В качестве переменных оптимизируемых величин примем число элементарных проводников в катушке m , число витков в катушке w_k , радиальный и осевой размеры элементарного проводника x и y (рис. 1).

Коэффициент увеличения активного сопротивления обмотки с учетом потерь активной мощности на вихревые токи [1, 2].

$$k_r \cong 1 + \frac{m^2}{9} \xi^4 = 1 + \frac{c^2 m^2 x^4 y^2}{9(y + \delta)^2} \quad \text{при } m > 2, \quad (1)$$

где

$$c = \pi f \frac{\mu_0}{\rho}, \quad (2)$$

f — число периодов тока (Гц), $\mu_0 = 0,4, \pi \cdot 10^{-8}$, ρ — расчетное удельное сопротивление материала обмотки (Ом, см).

Число элементарных проводников в катушке (заходе) m связано с шириной катушки b и размером проводника x следующим выражением:

$$m = \frac{b}{x+i} \quad (3)$$

Сопротивление меди катушки (захода) постоянному току на погонный сантиметр среднего проводника

$$R_0 = \frac{\rho}{mxy} = \frac{\rho(x+i)}{bxy} \quad (4)$$

Активное сопротивление меди катушки (захода) на погонный сантиметр среднего проводника с учетом (1)–(4)

$$R = R_0 k_r = \frac{\rho}{by} \left[\frac{x+i}{x} + \frac{b^2 c^2 y^2}{9(y+\delta)^2} \frac{x^3}{(x+i)} \right] \quad (5)$$

Число катушек в обмотке

$$n = \frac{h+\delta}{y+\delta} \quad (6)$$

Число витков в катушке (заходе)

$$w_k = \frac{w}{n} = \frac{w(y+\delta)}{h+\delta} \quad (7)$$

Ток в сечении катушки (захода)

$$I_H w_k = \frac{I_H w (y+\delta)}{h+\delta} = \text{var.} \quad (8)$$

Потери активной мощности в меди катушки на погонный сантиметр ее средней длины с учетом (5) и (8).

$$P = (I_H w_k)^2 R = \left(\frac{I_H w}{h+\delta} \right)^2 \frac{\rho}{b} \left[\frac{(x+i)(y+\delta)^2}{xy} + \frac{b^2 c^2}{9} y \frac{x^3}{x+i} \right] \quad (9)$$

Частные производные выражения (9) по переменным x и y :

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{i(y+\delta)^2}{x^2 y} + \frac{b^2 c^2 x^2 y^2 (2x+3i)}{9(x+i)^2} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = -\frac{(x+i)(\delta^2 - y^2)}{xy^2} + \frac{b^2 c^2 x^3}{9(x+i)} = 0 \quad (11)$$

Совместное решение (10) и (11) дает следующее выражение для оптимального значения y :

$$y_0 = \delta \frac{1+V}{2+V} < \delta, \quad (12)$$

где

$$V = \frac{x}{i} \quad (13)$$

Подставив y_0 из (12) в уравнение (11), найдем:

$$b \cdot c \cdot i = U_1 = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{2V+3} \quad (14)$$

На рис. 1 приведена кривая зависимости U_1 (V), построенная по выражению (14), которая может быть использована для определения V по предварительно найденному из (14) значению U_1 , (через постоянные b , c и i).

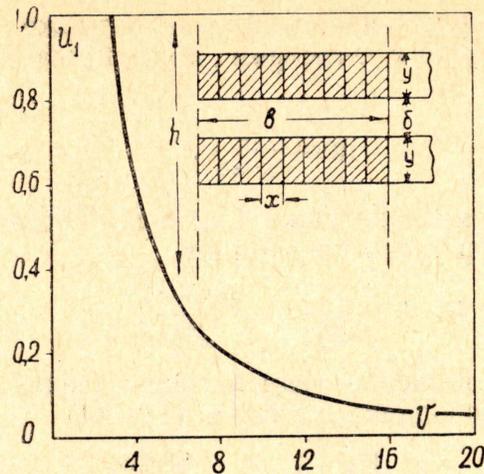


Рис. 1.

В пунктах 4—6 таблицы приведены оптимальные значения x_0 , y_0 , m_0 в зависимости от толщины изоляции i при $b=10$ см; $c=0,92$ (для меди); $\rho=2,14 \cdot 10^{-6}$ ом см; $\delta=1,0$ см.

В пункте 7 показаны добавочные потери в меди на вихревые токи P_d , выраженные в процентах от основных и вычисленные из формулы (из выражения 1):

$$P_d \% = 100 \frac{c^2 m_0^2 x_0^4 y^2}{9(y_0 + \delta)^2} \quad (15)$$

Таблица

1	i	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,10
2	U_1	0,09	0,18	0,28	0,46	0,64	0,92
3	V	13,2	8,8	6,7	4,8	4,0	3,1
4	x_0	0,13	0,18	0,20	0,24	0,28	0,31
5	y_0	0,94	0,91	0,89	0,85	0,83	0,80
6	m_0	70	51	44	34	29	24
7	$P_d \%$	3,3	5,3	6,3	7,9	9,7	10,2
8	U_2	54,3	27,1	18,1	10,9	7,80	5,43
9	V	12	7,2	5,5	3,9	3,3	2,7
10	x_0	0,12	0,15	0,17	0,20	0,23	0,27
11	m_0	79	61	51	41	33	27
12	$P_d \%$	4,2	6,0	7,0	8,7	10,5	11,3

Однако оптимальный размер y_0 получился малым (пункт 5 табл.). Если по конструктивным соображениям величина y принимается отличной от y_0 , то для определения x_0 и m_0 можно воспользоваться уравнением (10), из которого следует

$$\frac{3(y+\delta)}{b \cdot c \cdot i \cdot y} = U_2 = \frac{V^2 \sqrt{2V+3}}{1+V} \quad (16)$$

Определив U_2 из левой части (16), находим V по кривой рис. 2 и затем вычисляем x_0 из (13) и m_0 из (3).

В пунктах 10 и 11 таблицы приведены значения x_0 и m_0 в зависимости от i при $y=1,5$ см и при остальных постоянных, принятых ранее.

Добавочные потери активной мощности в обмотке в процентах, вычисленные из (15), показаны в пункте 12. При увеличении значения y с y_0 (пункт 5) до 1,5 см добавочные потери увеличились на (0,7—1) проц.

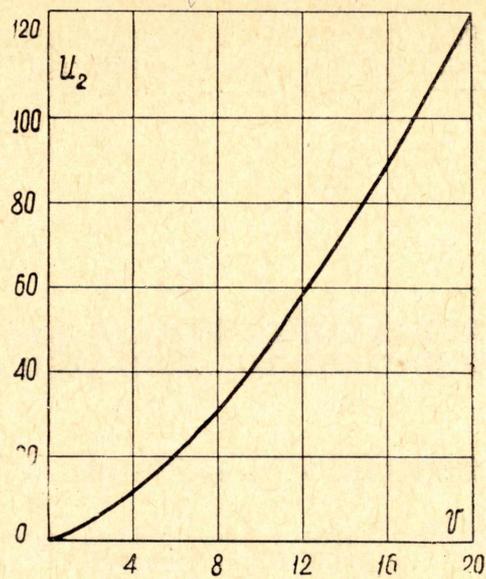


Рис. 2.

В заключение отметим, что оптимальные m_0 и x_0 зависят от толщины изоляции и материала проводников обмотки, а также от радиальной ширины катушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dietrich W. Auslegung von Transformatorenwicklungen mit kleinstem wirkwiderstand „Elektrotechn“, z № 6. 1965.
2. И. М. Постников. Проектирование электрических машин. Киев, 1960.