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

Том 191 1969

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ СГЛАЖИВАЮЩИХ ДРОССЕЛЕЙ СРЕДНЕЙ И БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ С ЗАЗОРОМ, РАВНЫМ ВЫСОТЕ ОБМОТКИ

Л. И. ПИЛЕЦКИЙ

(Рекомендована научным семинаром кафедр электрических станций и электрических систем и сетей)

В отличие от [1], имеющей приближенную формулу типовой мощности, в настоящей статье приводится более точное выражение мощности для дросселя, имеющего ту же конструкцию, что и в [1].

Индукция внутри обмотки и по ширине ее распределяется, согласно [2], по закону трапеции (рис. 1).

Индукция внутри обмотки $B_з$.

$$B_з = \frac{0{,}4\pi IW}{H}, \tag{1}$$

где I — постоянная составляющая тока, протекающего через обмотку дросселя, *a*;

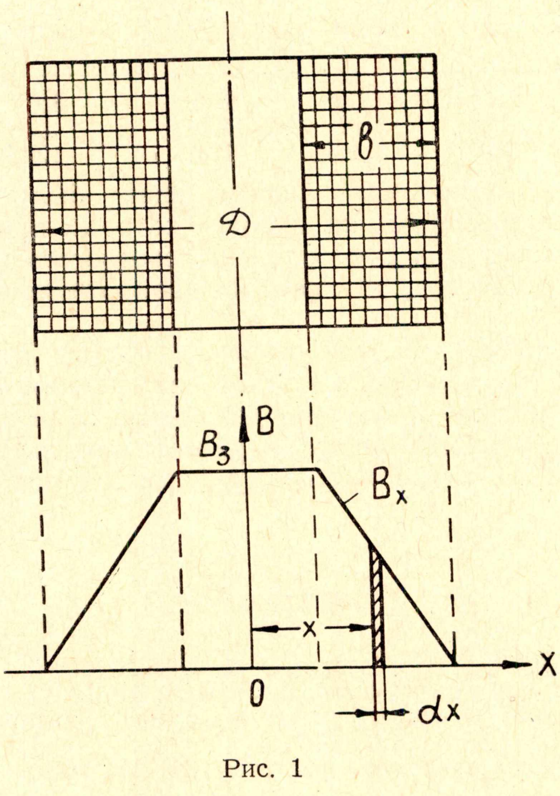

Рис. 1

W — число витков обмотки;

H — длина воздушного зазора, *см.*

Индукция по ширине обмотки B_x.

$$B_x = \frac{B_з D}{2b}\left(1 - \frac{2x}{D}\right). \qquad (2)$$

Магнитный поток, создаваемый обмоткой и проходящий по ширине обмотки, неодинаково сцепляется с витками обмотки. Магнитный поток элементарной трубки радиусом x равен

$$d\Phi_x \quad B_x 2\pi x dx. \qquad (3)$$

Этот поток сцепляется со всеми витками, расположенными вправо (наружу) от трубки, т. е. с числом витков $\frac{W}{b}\left(\frac{D}{2} - x\right)$.

Общее потокосцепление по ширине обмотки будет

$$\psi_b = \int\limits_{\frac{D-2b}{2}}^{\frac{D}{2}} \pi B_з \frac{DW}{b^2}\left(1 - \frac{2x}{D}\right) x \left(\frac{D}{2} - x\right) dx = \frac{\pi B_з W_в}{6}(2D - 3b). \qquad (4)$$

Потокосцепление внутри обмотки

$$\psi = \frac{\pi B_з W}{4}(D - 2b)^2. \qquad (5)$$

Суммарное потокосцепление $\psi_п$.

$$\psi_п = \pi B_з W\left[\frac{(D - 2b)^2}{4} + \frac{b}{6}(2D - 3b)\right]. \qquad (6)$$

Габаритная мощность дросселя S.

$$S = \omega L I^2, \qquad (7)$$

где L — индуктивность дросселя, *гн*;

ω — частота промышленной сети.

$$L = \frac{\psi_п}{I} \qquad (8)$$

Согласно [1] сечение проводникового материала обмотки $q_м$ с учетом осевых каналов охлаждения

$$q_м = \frac{k_o b h x y}{(x + i)(y + \delta)} \qquad (9)$$

и плотность тока Δ, выраженная через основные геометрические размеры,

$$\Delta = \sqrt{\frac{\alpha P(x + i)}{b_1 x y}}, \qquad (10)$$

где

$$P = k_п b_1 + y. \qquad (11)$$

Тогда мощность дросселя в *ква*, выраженная через геометрические размеры, примет вид

$$S = K\frac{k_o^2 b^2 h^2 x y P}{b_1 H(x + i)(y + \delta)^2}\left[\frac{(D - 2b)^2}{4} + \frac{b}{6}(2D - 3b)\right], \qquad (12)$$

где

$$K = 0{,}4\,\pi^2 \omega \alpha \cdot 10^{-11};$$

S — является функцией пяти переменных: b; h; x; y и D. С увеличением либо h, либо x, либо D мощность неограниченно возрастает. С ростом y или b мощность увеличивается, а затем уменьшается.

Воспользовавшись

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0, \qquad (13) \qquad\qquad \frac{\partial S}{\partial y} = 0, \qquad (14)$$

можно получить те оптимальные значения b_0 и y_0, при которых S достигает максимума.

(13) и (14) дают соответственно

$$b_0 = 0{,}5\,D; \qquad (15)$$

$$y_0 = \frac{k_п b_1}{k_п b_1 - 2\delta}. \qquad (16)$$

Так как конструкция панцирного сердечника должна предусматривать в верхней плоскости отверстие для выводного высоковольтного изолятора и в нижней плоскости отверстие для подключения или отключения вывода обмотки к изолятору, необходимо оптимальное значение b_0 брать не 0,5 D, а несколько меньше, т. е.

$$b_0 = k_1 D, \qquad (15')$$

где

$$k_1 < 0{,}5.$$

Изменение же y в сторону уменьшения на 30 проц. или увеличения на 45 проц. от y_0 дает уменьшение мощности всего лишь на 2,2 проц. от своего максимального значения.

Выбирая радиальный размер проводника x из существующих типоразмеров обмоточного провода, принимая b_0 и y_0 и исходя либо из габаритов железной дороги, либо из минимума расхода активных материалов, либо из минимума расчетных затрат, можно получить остальные независимые переменные, характеризующие дроссель.

Для определения веса дросселя при заданной постоянной индукции в стали по всей ее длине B_c необходимо определить поток, создаваемый обмоткой. Согласно рис. 1

поток, создаваемый элементарной трубкой, на участке

$$\frac{D}{2} - \frac{D - 2b}{2}$$

$$d\Phi_x = B_x 2\pi x dx. \qquad (17)$$

Поток, создаваемый всеми ампервитками, на участке $\frac{D}{2} - \frac{D - 2b}{2}$ равен

$$\Phi_b = \int\limits_{\frac{D-2b}{2}}^{\frac{D}{2}} \pi B_з \frac{D}{b}\left(1 - \frac{2x}{D}\right) x dx = \frac{\pi B_з b}{6}(3D - 4b). \qquad (18)$$

Поток внутри обмотки

$$\Phi = \pi B_з \frac{(D - 2b)^2}{4}. \qquad (19)$$

Сложив (18) и (19), получим суммарный поток, создаваемый обмоткой дросселя $\Phi_п$.

$$\Phi_п = \pi B_з \left[\frac{(D - 2b)^2}{4} + \frac{b}{6}(3D - 4b)\right]. \qquad (20)$$

Исходя из предположения, что поток, создаваемый обмоткой, замыкается только по стали, т. е.

$$\Phi_п = \Phi_c, \tag{21}$$

можно определить сечение стали q_c;

$$q_c = k_c \cdot n \cdot r \cdot \tau, \tag{22}$$

где k_c — коэффициент заполнения стали пакета;

n — число пакетов расщепленного сердечника ($n = 6 \div 12$);

r — радиальный размер пакета сердечника, *см*;

τ — тангенциальная ширина пакета, *см*;

$$\tau = D \cdot \sin \frac{180^\circ}{n}. \tag{23}$$

С другой стороны,

$$\Phi_c = B_c \cdot \pi \cdot D \cdot r \tag{24}$$

или

$$r = \frac{\Phi_п}{\pi B_c D}. \tag{25}$$

Используя условие максимума мощности (15′), выражение (25) запишем:

$$r = \frac{B_з}{B_c} D \left[\frac{(1 - 2k_1)^2}{4} + \frac{k_1}{6} (3 - 4k_1) \right]. \tag{26}$$

Вес стали ярем $Q_{ся}$,

$$Q_{ся} = 2\pi b (D - b) k_c \cdot r \cdot \gamma_c, \tag{27}$$

где γ_c — удельный вес стали.

Вес стали стержней $Q_{сс}$.

$$Q_{сс} = n \cdot r \cdot \tau \cdot k_c (H + 2r + 2\delta_0) \cdot \gamma_c, \tag{28}$$

где δ_0 — изоляционное расстояние от обмотки до пакета стали, *см*.

Суммарный вес стали Q_c.

$$Q_c = Q_{ся} + Q_{сс}. \tag{29}$$

Вес меди $Q_м$.

$$Q_м = q_м l_м \cdot \gamma_м, \tag{30}$$

где $l_м$ — длина среднего витка обмотки, *см*,

$$l_м = \pi (D - b); \tag{31}$$

$\gamma_м$ — удельный вес проводникового материала.

Тогда с учетом (31) и (9) вес меди можно представить в следующем виде

$$Q_м = \pi \gamma_м \frac{k_0 bhxy(D - b)}{(x + i)(y + \delta)}. \tag{32}$$

Для технико-экономического исследования необходимо вес проводникового материала привести к весу стали или наоборот. Тогда полный приведенный вес дросселя $Q_п$

$$Q_п = Q_c + \beta Q_м \tag{33}$$

в (33),

β — коэффициент приведения, характеризующий, во сколько раз больше удельная стоимость материала обмотки удельной стоимости стали в изделии.

Представляет интерес исследование влияния геометрических размеров дросселя, исходя из условия минимального удельного расхода активных материалов, т. е.

$$\frac{Q_п}{S} = \frac{Q_c}{S} + \beta \frac{Q_м}{S}. \tag{34}$$

Выражение (34) является функцией пяти переменных.

Для определения минимального значения $\frac{Q_п}{S}$ необходимо сократить число переменных. Для этого воспользуемся условием максимума мощности (15′) и выражением мощности (12). Из (15′) b заменяем через D, т. е. $b=k_1$, D, а D выразим через мощность S.

Следовательно,

$$D=\sqrt[4]{\frac{12Sb_1H(x+i)(y+\delta)^2}{Kk_0^2k_1^2h^2xyP(3-8k_1+6k_1^2)}}. \tag{35}$$

Тогда (34) явится функцией только трех переменных x, y и h.

$$\frac{Q_п}{S}=a_1\beta\gamma_м(1-k_1)\sqrt{\frac{Hxy}{\alpha SP(x+i)T}}+a_2\frac{(1-k_1)(y+\delta)M}{hT}\sqrt{\frac{x+i}{\alpha Pyx}}+$$
$$+a_3M\sqrt[4]{\frac{h^2(x+i)(y+\delta)^2}{S\alpha k_1^2HxyPT}}+2a_4\delta_0M\sqrt[4]{\frac{(x+i)(y+\delta)^2}{S\alpha Hh^2k_1^2xyPT^3}}+$$
$$+a_5\frac{M^2}{T}\sqrt[4]{\frac{S(x+i)(y+\delta)^2}{\alpha k_1^2H^3h^2xyPT}}, \tag{36}$$

где

$$a_1=\pi\sqrt{\frac{12b_1}{A}};\quad a_2=\frac{0{,}8\pi^2\gamma_c\sqrt{b_1}}{AB_ck_0};\quad a_3=\frac{0{,}4\pi\gamma_c n\sin\frac{180^\circ}{n}}{B_c}\sqrt{\frac{b_1}{12A^3k_0^2}}$$
$$a_4=\frac{0{,}8\pi\gamma_c n\sin\frac{180^\circ}{n}}{B_c}\sqrt[4]{\frac{b_1}{12A^3k_0^2}};\quad a_5=\frac{0{,}32\pi^2\gamma_c n\sin\frac{180^\circ}{n}}{AB_c^2\kappa_c^2}\sqrt[4]{\frac{b_1}{12A^3k_0^2}}; \tag{37}$$

$$A=0{,}4\,\pi^2\omega\cdot10^{-11};\quad M=(3-6\,k_1+4\,k_1^2);\quad T=(3-8\,k_1+6\,k_1^2).$$

Исследования на минимум удельного расхода показали, что с ростом мощности вес приведенных материалов в единице мощности уменьшается. Оптимальные значения высоты обмотки h_0 получаются небольшими по отношению к ее диаметру. Элементарные размеры проводника x_0 и y_0 получаются неконструктивными, т. е. очень малыми, так, для мощности $S=10^3$ *ква*; $y<0{,}1$ *см*; $x<0{,}1$ *см*. Изменение x при y_0 и h_0 дает меньшее изменение $\frac{Q_п}{S}$ чем изменение y при x_0 и h_0.

Изменение h при x_0 и y_0 в сторону уменьшения на 5 проц. дает изменение $\frac{Q_п}{S}$ на 0,7 проц. от минимального значения, а увеличение на 5 проц. дает изменение $\frac{Q_п}{S}$ на 3 проц. от минимального значения.

Больший практический интерес представляет исследование дросселя на минимум расчетных затрат. Исследование проводилось по методике [3].

Исходя из мощности дросселя, принятой индукции в стали и допустимой удельной плотности теплового потока с поверхности обмотки, можно определить оптимальные значения основных размеров дросселя путем минимизации расчетных затрат, состоящих из расходов на производство и эксплуатацию дросселя, а также капиталовложений на добавочную мощность системы с топливной базой, связанную с эксплуатацией дросселя.

Применительно к сглаживающим дросселям общие расчетные затраты З на приобретение и эксплуатацию дросселя выразятся через веса активных материалов в следующем виде:

$$З=(A_1+A_2)\ Q_c+(\beta A_1+E\cdot\Delta_2)Q_м, \tag{38}$$

где A_1; A_2 и E — постоянные.

Используя (15′) и (35) для сокращения переменных, можно получить расчетные затраты в функции трех переменных: x, y и h.

$$\begin{aligned} З = {} & (A_1 + A_2)a_2 \frac{(1 - k_1)S(y + \delta)M}{hT} \sqrt{\frac{x + i}{\alpha Pxy}} + \\ & + a_3(A_1 + A_2)M \sqrt[4]{\frac{S^3h^2(x + i)(y + \delta)^2}{\alpha k_1{}^2HxyPT^3}} + \\ & + 2a_4(A_1 + A_2)\delta_0 M \sqrt[4]{\frac{S^3(x + i)(y + \sigma)^2}{\alpha Hh^2k_1{}^2xyPT^3}} + \\ & + a_5(A_1 + A_2)\frac{SM^2}{T}\sqrt[4]{\frac{S(x + i)(y + \delta)^2}{\alpha k_1{}^2H^3h^2xyPT}} + \\ & + \beta A_1a_1\gamma_м \sqrt{\frac{SHxy(1 - к_1)^2}{\alpha P(x + i)T}} + Ea_1\gamma_м \frac{\alpha}{b_1}\sqrt{\frac{SHP(x + i)(1 - k_1)^2}{xyT}}. \end{aligned} \tag{39}$$

Исследования на минимум расчетных затрат еще раз подтвердили, что оптимальное значение ширины обмотки b_0 получается равным половине ее диаметра, и зависимость $З=f(k_1)$ (рис. 2) в интервале $k_1 = 0{,}35 \div 0{,}5$ почти линейная. Оптимальное значение осевого размера проводника y_0, напротив, по сравнению с условием максимальной мощности изменилось в большую сторону и достигло таких размеров, которые промышленностью не выпускаются, т. е. $y_0 \cong (2{,}7 \div 3{,}3)\ y_{max}$,

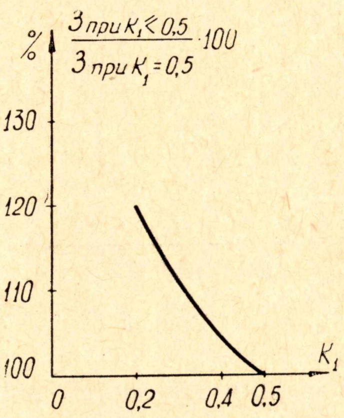

Рис. 2

где y_{max} — максимальный осевой размер проводника, выпускаемого промышленностью.

Если применять не y_0, а y_{max}, то расчетные затраты возрастут. На рис. 3 изображена зависимость $З=f(y)$ для мощности $S=10^3$ *ква*, где за 100 проц. приняты расчетные затраты, соответствующие оптимальному значению y_0.

Если же стремиться все-таки к дросселю с минимальными расчетными затратами, то необходимо применять сдвоенные дисковые катушки. Оптимальное значение высоты h_0 стремится получить конструкцию дросселя с малой величиной воздушного зазора и большим значением D, что подтверждает необходимость введения осевых каналов охлаждения.

С ростом отношения $\frac{b}{D} = k_1\ h_0$ линейно уменьшается (рис. 4).

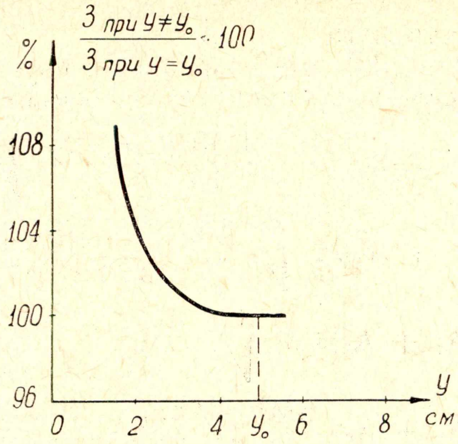

Рис. 3

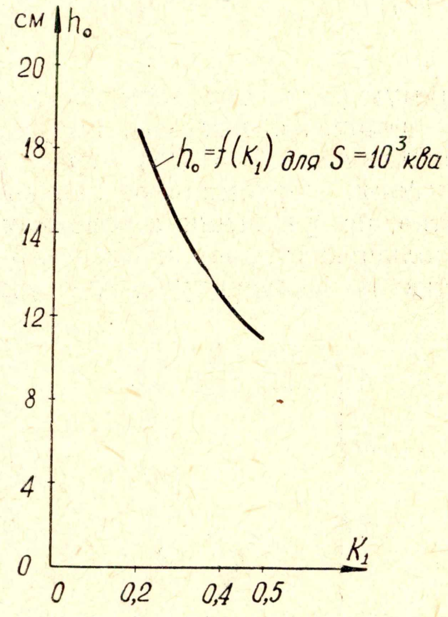

Рис. 4

Исследования проводились для дросселей мощностью $S = 10^3$; 10^4; 10^5 и $5 \cdot 10^5$ *ква* при следующих данных: индукция в стали $B_c = 1,6$ *тл*; величина радиального канала охлаждения $\delta = 1,4$ *см* [4]; удельная плотность теплового потока с обмотки $\varepsilon = 0,16$ *вт/см*^{2}; ширина «элементарной» катушки $b_1 = 9$ *см*; $k_п = 0,78$; $k_1 = 0,5$; 0,45; 0,2. Изоляционное расстояние между обмоткой и сталью дросселя $\delta_0 = 20$ *см*; удельный вес стали $\gamma_c = 7,65 \cdot 10^{-3}$ *кг/см*^{3}; удельный вес меди $\gamma_м = 8,9 \cdot 10^{-3}$ *кг/см*^{3}; $\beta = 3,5$; $\alpha = 13,5 \cdot 10^4$. Коэффициенты A_1, A_2 и E подсчитывались по методике, изложенной в [3] с учетом [5].

$$A_1 = 0,084; \; A_2 = 0,204; \; E = 8,1 \cdot 10^{-6}.$$

Определение оптимальных значений переменных x, y и h для выражений (36) и (39) проводилось на электронной цифровой вычислительной машине (ЭЦВМ) вычислительного центра Томского политехнического института *.

---

* Работы по минимизации расчетных затрат на ЭЦВМ выполнены сотрудником кафедры электрических станций ТПИ Вальковой Л. М.

ЛИТЕРАТУРА

1. **И. Д. Кутявин, Л. И. Пилецкий**. О предельной мощности сглаживающих дросселей с линейной характеристикой. Изв. ТПИ, т. 179, 1969.

2. **Г. Н. Петров.** «Электрические машины», ч. 1, ГЭИ, 1956.

3. **И. Д. Кутявин.** К определению оптимальных размеров трехфазных двухобмоточных трансформаторов. Изв. ТПИ, т. 130, 1964.

4. **С. А. Фарбман, Ю. А. Бун.** «Ремонт и модернизация трансформаторов», «Энергия», 1966.

5. **И. А. Морель.** Замечания и предложения по новой методике технико-экономических расчетов в энергетике, «Электрические станции», № 12, 1967.