

## О ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ \*

И. Д. КУТЯВИН,  
Н. П. КОСТРИЦКАЯ

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

Конструкция мощных реакторов высокого напряжения должна учитывать условия их перевозки от завода-изготовителя к месту монтажа.

Вопрос определения предельной мощности шунтирующих реакторов, исходя из транспортных ограничений, является актуальным в настоящее время ввиду роста напряжений и мощности реакторов.

В данной статье излагается методика определения предельной мощности шунтирующих реакторов путем максимизации выражения для мощности реактора при введении необходимых ограничений по габариту. Рассматривается реактор с панцирным ярмом, выполненным из 8-ми С-образных элементов, с катушечной обмоткой и воздушным зазором, равным высоте окна сердечника.

Обозначение размеров и основные соотношения приведены в [1].

Для исследования воспользуемся выражением мощности однофазного реактора в *кВА*:

$$S = 4,44f \cdot 10^{-11} \psi I, \quad (1)$$

где  $f$  — частота сети,

$\psi$  — полное потокосцепление,

$I$  — ток реактора.

Для рассматриваемой конструкции реактора полное потокосцепление может быть записано:

$$\psi = \pi B_3 w \left[ \frac{(D - 2b)^2}{4} + \frac{b}{6} (2D - 3b) \right], \quad (2)$$

где индукция в воздушном зазоре

$$B_3 = \frac{0,4\pi\sqrt{2} I w}{H}. \quad (3)$$

Подставляя в (2) значение  $B_3$  из (3) и вместо  $(Iw)^2$  значение  $(\Delta q_m)^2$  — см [1], запишем формулу мощности в следующем виде:

$$S = K_s \frac{P_b x y h^2}{k_r H (x + i)(y + \delta)^2} \left[ \frac{(D - 2b)^2}{4} + \frac{b}{6} (2D - 3b) \right], \quad (4)$$

где

$$K_s = 1,776\sqrt{2} \pi^2 f \alpha \cdot 10^{-11}. \quad (5)$$

\* В отличие от [1] в настоящей статье используются уточненные выражения (2), (4), (21).

Значения  $D$  и  $h$  определяются транспортными габаритами реактора. Поэтому мощность реактора является функцией переменных:  $b$ ,  $x$ ,  $y$ .

Для определения критических значений переменных воспользуемся условием:

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

В результате получим следующие уравнения:

$$4b^2 - 4Db + D^2 = 0, \quad (7)$$

$$k_r i - x(x+i) \cdot k'_{r(x)} = 0, \quad (8)$$

$$k_r [\delta(y+P) - k_{\pi} b y] - k'_{r(y)} P(y+\delta) = 0, \quad (9)$$

где  $k'_{r(x)}$  и  $k'_{r(y)}$  — производные  $k_r$  по соответствующим переменным.

Из (7) найдем оптимальное значение радиального размера обмотки:

$$b_0 = 0,5 D. \quad (10)$$

Практически  $b_0$  не может быть выполнено, так как необходимо обеспечить вывод высокого напряжения от середины обмотки наружу. Поэтому  $b$  определяем как

$$b = 0,5(D-d), \quad (11)$$

где  $d$  — внутренний диаметр обмотки, определяемый размерами линейного вывода и необходимым изоляционным расстоянием от экрана вывода до обмотки.

Решая совместно (8) и (9), найдем оптимальные значения размеров провода обмотки. Уравнение (8) имеет четвертую степень относительно  $x$  и аналитически не может быть решено.

Поэтому  $x_0$  определяется графоаналитически из соотношения

$$\sqrt{\frac{3(K_{\pi} b - \delta)}{K_{\pi} b^2 c i}} = U_1 = \frac{v}{\sqrt[4]{2v+3}}, \quad (12)$$

где

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

На рис. 1 приведена кривая, построенная по правой части выражения (12).

Определив  $U_1$  (при известном  $b$ ) из левой части (12), по кривой рис. 1 находим  $v$  и, следовательно,  $x_0$ . Из уравнения (9) найдем оптимальное значение осевого размера провода обмотки:

$$y_0 = \frac{k_{\pi} b \delta (x+i)}{k_{\pi} b (x+2i) - \delta (2x+3i)}. \quad (14)$$

Если принятое значение  $y$  существенно отличается от найденного, то оптимальное значение  $x_0$  определяется из уравнения (8) или по кривой 2 рис. 1, построенной по правой части выражения:

$$\frac{3(y+\delta)}{b i y} = U_2 = \frac{v^2 \sqrt{2v+3}}{v+1}, \quad (15)$$

Из рассмотрения геометрии ярма можно записать объем стали верхних и нижних горизонтальных элементов ярма:

$$V_{c1} = 2k_c \pi r_1 \left\{ \tau \left[ r_2 + \delta_0 + \frac{D}{2} \left( 1 - \cos \frac{180}{n} \right) \right] - \frac{\pi}{n} \left( \frac{d - 2\delta_0}{2} \right)^2 \right\}, \quad (16)$$

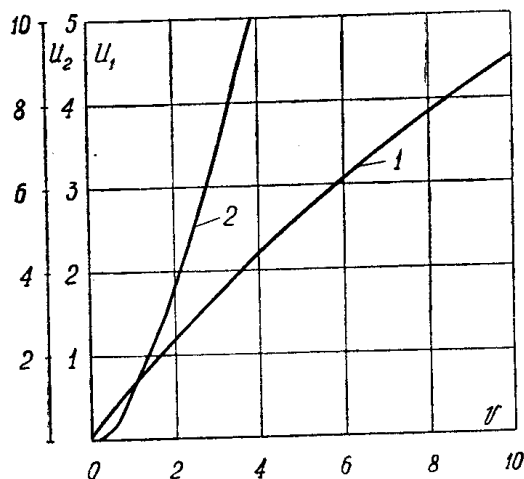


Рис. 1.

где 
$$\tau = D \cdot \sin \frac{180}{n}. \quad (17)$$

То же, но для вертикальных элементов ярма:

$$V_{c_2} = k_c n r_2 D \sin \frac{180}{n} H. \quad (18)$$

Толщина горизонтальных и вертикальных элементов ярма принята равной

$$r_1 = r_2 = r. \quad (19)$$

Площадь сечения стали вертикального элемента ярма

$$q_{c_2} = k_c r_2 D \sin \frac{180}{n}. \quad (20)$$

Толщина ярма —  $r$  может быть определена из условия равенства потока в стали и в воздушном зазоре, при заданной индукции в стали —  $B_c$ .

$$B_c q_{c_2} n = \frac{\pi B_3}{2} \left[ \frac{(D - 2b)^2}{2} + \frac{b}{3} (3D - 4b) \right]. \quad (21)$$

Учитывая (20), запишем толщину ярма  $r_2$  из (21):

$$r_2 = k_{r_2} \frac{h}{DH(y + \delta)} \sqrt{\frac{Pbxy}{k_r(x + i)} \left[ \frac{(D - 2b)^2}{2} + \frac{b}{3} (3D - 4b) \right]}, \quad (22)$$

где 
$$k_{r_2} = \frac{0,4\pi^2 \sqrt{2\alpha}}{k_c n B_c \sin \frac{180}{n}}; \quad (23)$$

Транспортные размеры реактора приняты из очертаний негабаритности 4-й степени. По высоте железнодорожный габарит используется с учетом перевозки реактора подвешенным на сочлененном транспорте. При этом зазор между дном бака и уровнем головки рельсов составляет 250 мм [2]. От очертаний железнодорожного габарита  $H_r = 360,8$  см и  $D_r = 400$  см можно перейти к габаритам выемной части реактора 500 кв.

Высота выемной части

$$H_B = 360,8 - 25 - 35,8 = 300 \text{ см},$$

где 25 см — высота от головки рельсов до дна бака, 35,8 см — включает толщину дна и крышки бака, ребра жесткости — 13 см, расстояние от бака до магнитопровода — 28 см (на две стороны).

Диаметр выемной части:

$$D_B = 400 - 50 = 350 \text{ см},$$

где 50 см включают: толщину стенок бака — 2 см (на две стороны), ребра жесткости 13 см, зазор между магнитопроводом и баком 30 см (на две стороны), 5 см — запас между очертаниями габарита и бака.

Размеры выемной части в свою очередь связаны с основными размерами реактора простыми соотношениями:

$$H_B = h + 2l_0 + 2r_1, \quad (24)$$

$$D_B = d + 2b + 2\delta_0 + 2r_2. \quad (25)$$

Подставляем в (25) значение  $r_2$  из (22).

$$D_B - d - 2\delta_0 = 2b + \frac{\kappa r_2 h (3d^2 + 6bd + 4b^2)}{3H(d + 2b)(y + \delta)} \times \sqrt{\frac{(\kappa_{II} b + y) b x y}{K_r(x + i)}}. \quad (26)$$

Радиальный размер обмотки ( $b$ ) может быть найден из (26) методом поиска. Задаваясь различными значениями  $b=20; 40; 60; \dots$  находим  $x_0; y_0$ .

В табл. 1 приводятся результаты расчета реактора предельной мощности по вышеизложенной методике с обмоткой из медного провода и толщиной изоляции на две стороны:  $i=0,01; 0,1; 0,2; 0,4$ . Размер масляного канала принят равным 1,2 см. Изоляционные расстояния для реактора напряжением 500 кВ приняты  $\delta_{01}=l_1=35$  см,  $l_0=10$  см. Остальные общие данные:  $\alpha=13,5 \cdot 10^4$ ;  $c=0,92$ ;  $\gamma_c=7,65$ ;  $\gamma_m=8,9$ ;  $\kappa_c=0,8$ ;  $\kappa_{II}=0,78$ ;  $V_c=16,5$  кгс;  $f=50$  гц.

В пунктах 10—17 приведены геометрические размеры реактора, в пункте 18 — мощность в кВа, в пунктах 19—21 — веса активных материалов.

Вес стали определялся по формуле:

$$Q_c = \gamma_c (V_{c1} + V_{c2}) \cdot 10^{-3}, \text{ кг}. \quad (27)$$

Вес меди

$$Q_m = \gamma_m q_m l_m \cdot 10^{-3}, \text{ кг}. \quad (28)$$

Из табл. 1 видно, что снижение изоляции провода обмоток от  $i=0,1$  до  $i=0,01$  (применение эмалевого изоляции) приводит к увеличению мощности в 2 раза.

Увеличение изоляции от  $i=0,1$  до  $i=0,2$  уменьшает мощность в 3 раза.

На рис. 2 дана зависимость максимальной мощности от геометрических размеров провода обмотки, вычисленная по данной методике. С изменением радиального размера провода обмотки мощность резко изменяется. Поэтому значение  $x$  целесообразно применять близким к оптимальному. Изменение осевого размера провода  $y$  мало влияет на максимальную мощность.

Приведенная методика может быть также использована для определения оптимальной геометрии реакторов при заданной мощности и напряжении.

Таблица 1

	0,01		0,1		0,2		0,3	
	20	40	20	40	20	40	20	40
$i(\text{см})$								
$\delta(\text{см})$	1,21	1,21	1,3	1,3	1,4	1,4	1,6	1,6
$b(\text{см})$	20	60	20	60	20	60	20	60
$U_1$	2,8	2,3	3,87	0,78	0,86	0,62	0,61	0,44
$V$	5,4	4,2	8,2	1,18	1,12	0,93	0,9	0,63
$x_0(\text{см})$	0,05	0,04	0,82	0,12	0,26	0,19	0,36	0,25
$y_0(\text{см})$	1,13	1,17	1,4	0,96	1,15	1,0	1,26	1,1
$k_r$	1,07	1,1	6,37	1,012	1,17	1,22	1,214	1,21
$f(b)$	35,5	-28,5	112,2	74,05	104,5	51	107	56
$b_0(\text{см})$	51			78		59		62
$D(\text{см})$	222			276		238		244
$x_0(\text{см})$	0,05			0,1		0,15		0,2
$y_0(\text{см})$	1,1			0,9		0,65		0,63
$k_r$	1,07			1,085		1,14		1,14
$r(\text{м})$	29,4			37		20,4		18,5
$q_M(\text{см}^2)$	4650			3670		1840		1340
$I_M(\text{см})$	536			622		562		572
$S(\text{кВв})$	2,2·10 <sup>6</sup>			1,13·10 <sup>6</sup>		0,366·10 <sup>6</sup>		0,270·10 <sup>6</sup>
$Q_c(\text{кг})$	44400			78600		34400		31300
$Q_M(\text{кг})$	22200			20300		9200		6820
$Q_{\text{общ}}(\text{кг})$	66600			98900		43600		38120

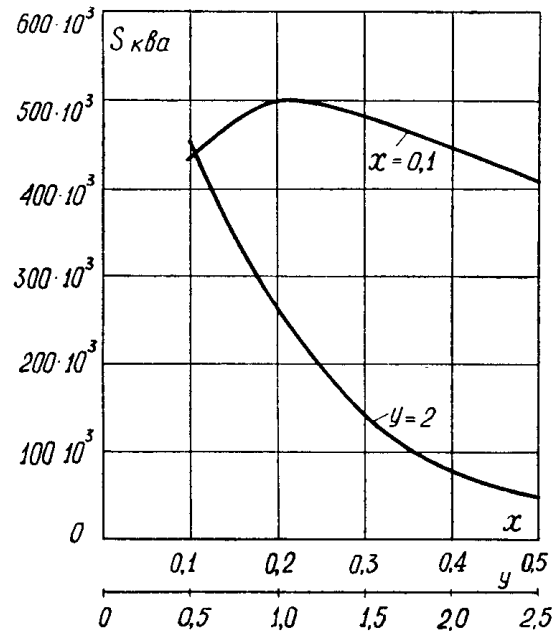


Рис. 1.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Д. Кутявин, Н. П. Кострицкая. О предельной мощности компенсирующих реакторов с воздушным зазором. Изв. ТПИ, т. 172, 1967.
2. В. Ш. Аншин и А. Г. Крайз. Сборка мощных трансформаторов, ГЭИ, 1961.