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

Том 191 1969

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*:

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

где f — частота сети,

ψ — полное потокосцепление,

I — ток реактора.

Для рассматриваемой конструкции реактора полное потокосцепление может быть записано:

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

где индукция в воздушном зазоре

$$B_з = \frac{0{,}4\pi\sqrt{2}\,Iw}{H}. \tag{3}$$

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

$$S = K_S\frac{Pbxyh^2}{\kappa_r H(x+i)(y+\delta)^2}\left[\frac{(D-2b)^2}{4} + \frac{b}{6}(2D-3b)\right], \tag{4}$$

где

$$K_S = 1{,}776\sqrt{2}\,\pi^2 f\alpha\cdot 10^{-11}. \tag{5}$$

---

* 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:

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

В результате получим следующие уравнения:

$$4\,b^2 - 4\,Db + D^2 = 0, \tag{7}$$

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

$$k_r[\delta(y+P) - k_п by] - k'_{r(y)}P(y+\delta) = 0, \tag{9}$$

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

Из (7) найдем оптимальное значение радиального размера обмотки:

$$b_0 = 0{,}5\,D. \tag{10}$$

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

$$b = 0{,}5(D - d), \tag{11}$$

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

$$\sqrt{\frac{3(K_п b - \delta)}{K_п b^2 ci}} = U_1 = \frac{v}{\sqrt[4]{2v+3}}, \tag{12}$$

где

$$v = \frac{x}{i}. \tag{13}$$

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:

$$y_0 = \frac{к_п b\delta(x+i)}{k_п b(x+2i) - \delta(2x+3i)}. \tag{14}$$

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:

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

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

$$Vc_1 = 2k_c nr_1\left\{\tau\left[r_2 + \delta_0 + \frac{D}{2}\left(1 - \cos\frac{180}{n}\right)\right] - \frac{\pi}{n}\left(\frac{d - 2\delta_0}{2}\right)^2\right\}, \tag{16}$$

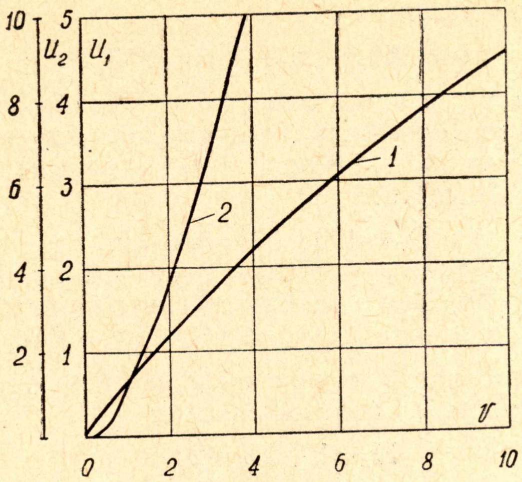

Рис. 1.

где
$$\tau = D \cdot \sin \frac{180}{n}. \tag{17}$$

То же, но для вертикальных элементов ярма:

$$V_{c_2} = к_c n r_2 D \sin \frac{180}{n} H. \tag{18}$$

Толщина горизонтальных и вертикальных элементов ярма принята равной

$$r_1 = r_2 = r. \tag{19}$$

Площадь сечения стали вертикального элемента ярма

$$q_{c_2} = к_c r_2 D \sin \frac{180}{n}. \tag{20}$$

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

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

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

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

где
$$к_{r_2} = \frac{0{,}4\pi^2 \sqrt{2\alpha}}{к_c n B_c \sin \frac{180}{n}}; \tag{23}$$

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

Высота выемной части

$$H_в=360,8-25-35,8=300 \text{ см},$$

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:

$$D_в=400-50=350 \text{ см},$$

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:

$$H_в=h+2l_0+2r_1, \tag{24}$$

$$D_в=d+2b+2\delta_0+2r_2. \tag{25}$$

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

$$D_в-d-2\delta_0=2b+\frac{\kappa r_2 h(3d^2+6bd+4b^2)}{3H(d+2b)(y+\delta)}\times\sqrt{\frac{(\kappa_п b+y)bxy}{K_г(x+i)}}. \tag{26}$$

Радиальный размер обмотки (b) может быть найден из (26) методом поиска. Задаваясь различными значениями b=20; 40; 60; ... 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: $\alpha=13,5\cdot10^4$; $c=0,92$; $\gamma_c=7,65$; $\gamma_м=8,9$; $k_c=0,8$; $k_п=0,78$; $B_c=16,5$ *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:

$$Q_c=\gamma_c(V_{c1}+V_{c2})\cdot10^{-3}, \text{ кг}. \tag{27}$$

Вес меди

$$Q_м=\gamma_м q_м l_м\cdot10^{-3}, \text{ кг}. \tag{28}$$

Из табл. 1 видно, что снижение изоляции провода обмоток от i=0,1 до i=0,01 (применение эмалевой 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

i(см)	0,01			0,1			0,2			0,3		
δ(см)	1,21			1,3			1,4			1,6		
b(см)	20	40	60	20	40	60	20	40	60	20	40	60
U_1	2,8	2,8	2,3	3,87	0,78	0,525	0,86	0,62	0,512	0,61	0,44	0,36
V		5,4	4,2	8,2	1,18	0,77	1,12	0,93	0,74	0,9	0,63	0,51
x_0(см)		0,05	0,04	0,82	0,12	0,08	0,26	0,19	0,15	0,36	0,25	0,2
y_0(см)		1,13	1,17	1,4	0,96	0,88	1,15	1,0	0,94	1,26	1,1	1,02
k_r		1,07	1,1	6,37	1,012	1,007	1,17	1,22	1,23	1,214	1,21	1,23
f(b)		35,5	—28,5	112,2	74,05	35,0	104,5	51	—3	107	56	4,5
b_0(см)		51			78			59			62	
D(см)		222			276			238			244	
x_0(см)		0,05			0,1			0,15			0,2	
y_0(см)		1,1			0,9			0,65			0,63	
k_r		1,07			1,085			1,14			1,14	
r(м)		29,4			37			20,4			18,5	
$q_м$(см^2)		4650			3670			1840			1340	
$l_м$(см)		536			622			562			572	
S(ква)		$2,2 \cdot 10^6$			$1,13 \cdot 10^6$			$0,366 \cdot 10^6$			$0,270 \cdot 10^6$	
Q_c(кг)		44400			78600			34400			31300	
$Q_м$(кг)		22200			20300			9200			6820	
$Q_{общ}$ (кг)		66600			98900			43600			38120	

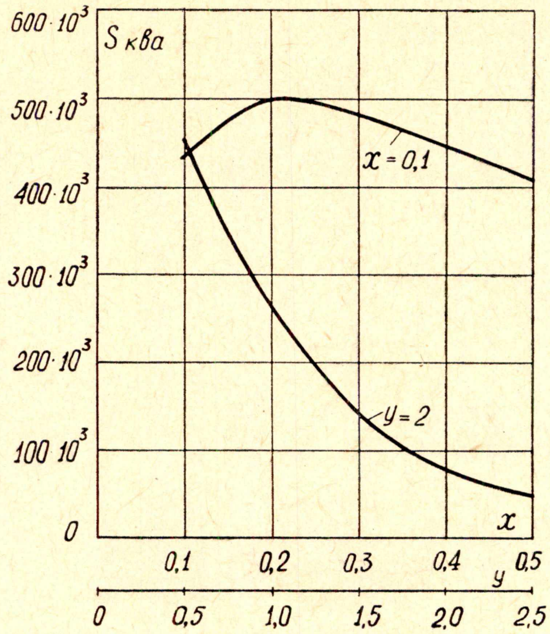

Рис. 1.

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.