

УДК 621.318.4

ШУНТИРУЮЩИЕ РЕАКТОРЫ СО СТЕРЖНЕВЫМИ И БРОНЕСТЕРЖНЕВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ И С НЕМАГНИТНЫМИ ЗАЗОРАМИ В СТЕРЖНЯХ

Канд. техн. наук, доц. КОСТРИЦКАЯ Н. П. докт. техн. наук, проф.
КУТЯВИН И. Д., инж. ЧЕШЕВА Т. В.

Гомельский политехнический институт
Томский ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени политехнический институт имени С. М. Кирова

В статье приведены результаты исследования размеров, параметров и весов активных материалов однофазных шунтирующих реакторов мощностью 100 МВ·А, напряжением 500 кВ и сравнительные данные двух типов конструкций: бронестержневой с равномерно распределенным немагнитным зазором в стержне (рис. 1б) и с панцирным ярмом и зазором,

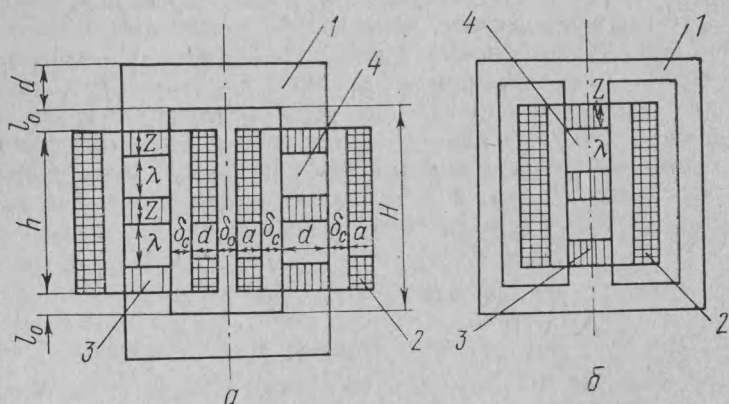


Рис. 1. а — реактор стержневого типа; б — бронестержневой реактор:

1 — магнитопровод; 2 — обмотка; 3 — воздушный зазор; 4 — магнитная вставка

равным высоте окна обмотки (рис. 2). Обмотка — катушечная, дисковая.

Данные о соотношениях размеров и параметров реакторов с панцирным ярмом и результаты их расчетов приводятся в [1, 2].

Основные соотношения для конструкций, изображенных на рис. 1а, б: высота окна сердечника

$$H = h + 2l_0; \quad (1)$$

площадь сечения стали стержня

$$Q_c = k_c \frac{\pi d^2}{4}; \quad (2)$$

площадь сечения стали ярма для стержневого сердечника

$$Q_{\pi} = k_{\pi} Q_c; \quad (3)$$

то же, для бронестержневого

$$Q_{\text{я}} = 0,5k_{\text{я}}Q_{\text{с}}, \quad (4)$$

где h — осевая высота обмотки;

l_0 — расстояние от обмотки до ярма;

d — диаметр круга, описанного вокруг стержня;

$k_{\text{с}}$ — коэффициент заполнения сталью площади круга с диаметром d ;

$k_{\text{я}}$ — коэффициент увеличения сечения стали ярма.

Расчетная длина стали однофазного стержневого сердечника (рис. 1а), приведенная к площади сечения стали стержня,

$$l_{\text{с1}} = 2(H - Z + 2d + 2a + 2\delta_{\text{с}} + \delta_0); \quad (5)$$

то же, для однофазного бронестержневого (рис. 1б)

$$l_{\text{с1}} = H - Z + k_{\text{я}}(H + 2d + 2a + 4\delta_{\text{с}}); \quad (6)$$

то же, для трехфазного стержневого

$$l_{\text{с3}} = 3(H - Z) + k_{\text{я}}(6d + 8a + 8\delta_{\text{с}} + 4\delta_0); \quad (7)$$

то же, для трехфазного бронестержневого

$$l_{\text{с3}} = 3(H - Z) + k_{\text{я}}(H + 4d + 6a + 8\delta_{\text{с}} + 2\delta_0), \quad (8)$$

где a — радиальная ширина сечения обмотки;

Z — суммарная длина немагнитных зазоров в стержне, равная сумме элементарных зазоров $z = 5 \div 10$ см, разделенных магнитными вставками A (рис. 1б);

$\delta_{\text{с}}$ — расстояние между обмоткой и стержнем;

δ_0 — расстояние между обмотками разных фаз. Здесь и далее все размеры в сантиметрах.

Масса стали сердечника (кг)

$$G_{\text{сс}} = Q_{\text{с}} l_{\text{с}} \gamma_{\text{с}} \cdot 10^{-3}; \quad (9)$$

площадь сечения материала обмотки

$$Q_{\text{м}} = N q_{\text{п}} = N \frac{I_{\text{н}}}{\Delta}; \quad (10)$$

длина среднего витка обмотки

$$l_{\text{м}} = \pi(d + 2\delta_{\text{с}} + a); \quad (11)$$

масса материала обмотки фазы

$$G_{\text{м}} = Q_{\text{м}} l_{\text{м}} \gamma_{\text{м}} \cdot 10^{-3}; \quad (12)$$

площадь сечения одной стороны обмотки

$$Q_0 = ah = N n_{\text{п}}(x + i)(y + \sigma_0) = pN; \quad (13)$$

высота обмотки

$$h = \frac{Q_0}{a} = \frac{pN}{a}; \quad (14)$$

где

$$p = n_{\text{п}}(x + i)(y + \sigma_0);$$

N — число витков в обмотке;

Δ — плотность тока в проводе обмотки, А/см²;

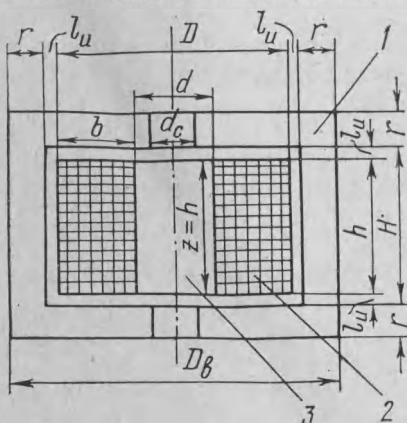


Рис. 2. Реактор с панцирным ярмом.
Обозначения см. на рис. 1

$q_{\text{п}}$ — площадь сечения провода обмотки;
 $\gamma_{\text{с}}$ и $\gamma_{\text{м}}$ — удельные плотности стали и материала обмотки;
 x и y — радиальная толщина и осевая ширина элементарных проводников (эп), составляющих провод обмотки;
 $n_{\text{п}}$ — число параллельных эп в проводе обмотки;
 σ_0 — осевое расстояние между медью соседних катушек, состоящее из ширины радиального охлаждающего канала $\sigma_{\text{к}}$, витковой $i_{\text{в}}$ и эмалевой $i_{\text{э}}$ изоляции

$$\sigma_0 = \sigma_{\text{к}} + i_{\text{в}} + i_{\text{э}}; \quad (15)$$

i — средняя изоляция эп на две стороны, состоящая из эмалевой изоляции эп и доли витковой изоляции

$$i = i_{\text{э}} + i_{\text{в}}/n_{\text{п}}. \quad (16)$$

Потокосцепление магнитного поля, проходящего по стержню,

$$\Psi_{\text{с}} = k_{\text{с}} B_{\text{с}} N \frac{\pi d^2}{4}; \quad (17)$$

то же, для потока, проходящего в зоне между стержнем и обмоткой,

$$\Psi_{\text{со}} = \frac{\pi BN}{4} [(d + 2\delta_{\text{с}})^2 - d^2] = \pi BN \delta_{\text{с}} (d + \delta_{\text{с}}); \quad (18)$$

то же для потока, проходящего через толщу обмотки,

$$\begin{aligned} \Psi_0 &\simeq \frac{\pi BN}{4} \left[\left(d + 2\delta_{\text{с}} + \frac{2a}{3} \right)^2 - (d + 2\delta_{\text{с}})^2 \right] = \\ &= \frac{\pi BN}{3} \left(d + 2\delta_{\text{с}} + \frac{a}{3} \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Суммарное потокосцепление реактора

$$\Psi = \left(k_{\text{с}} B_{\text{с}} N \frac{\pi d^2}{4} + \pi BN U_1 \right), \quad U_1 = \delta_{\text{с}} (d + \delta_0) + \frac{a}{3} \left(d + 2\delta_{\text{с}} + \frac{a}{3} \right), \quad (20)$$

где $B_{\text{с}}$ — индукция в стали стержня, Тл;

B — индукция в промежутке между стержнем и обмоткой, имеющая выражение

$$\begin{aligned} B &= \frac{k_{\text{в}} Q_{\text{м}} \Delta}{h} = \frac{k_{\text{в}} N I_{\text{н}}}{h} = \frac{k_{\text{в}} a I_{\text{н}}}{p}; \\ k_{\text{в}} &= 4\pi \sqrt{2} k_{\text{р}} \cdot 10^{-5}; \end{aligned} \quad (21)$$

$k_{\text{р}}$ — коэффициент Роговского.

Суммарная осевая длина немагнитных зазоров в стержне

$$Z = \frac{k_{\text{в}} N I_{\text{н}}}{B_{\text{с}}} = n_z z, \quad (22)$$

где n_z — число элементарных зазоров в стержне.

Противоэлектродвижущая сила реактора

$$E = U_{\text{ф}} = 4,44 f \pi N \cdot 10^{-7} \left(\frac{k_{\text{с}} B_{\text{с}} d^2}{4} + B U_1 \right); \quad (23)$$

мощность фазы реактора

$$S_{\text{ф}} = U_{\text{ф}} I_{\text{н}} = 4,44 f \pi N I_{\text{н}} \cdot 10^{-7} \left(\frac{k_{\text{с}} B_{\text{с}} d^2}{4} + B U_1 \right). \quad (24)$$

Из выражения (23) можно определить число витков в обмотке фазы

$$N = \frac{U_{\phi} \cdot 10^7}{700 \left(\frac{k_c B_c d^2}{4} + \frac{k_B a I_H U_1}{p} \right)}. \quad (25)$$

Суммарная масса активных материалов

$$G_a = G_{cc} + G_m. \quad (26)$$

Суммарная масса приведенных к стали активных материалов, характеризующая стоимость реактора,

$$G_{\pi} = G_{cc} + \beta G_m. \quad (27)$$

Расчетные затраты на приобретение, установку и эксплуатацию реактора [1, 2]

$$Z_p \approx A (Q_c l_c + Q_3 h) + 2 B_1 Q_m l_m; \quad (28)$$

оптимальная плотность тока [2]

$$\Delta_0 = \sqrt{\frac{B_1}{k_q B_2}}; \quad (29)$$

осевая ширина эп [2]

$$y = \frac{\alpha B_1}{B_2}; \quad (30)$$

коэффициент добавочных потерь в обмотке из меди [2]

$$k_q = \frac{1}{1 - M}; \quad M = 0,086 \frac{a^2 I_H^2 B_1}{k^2 \alpha^2 n_{\pi}^2 B_2}; \quad (31)$$

вертикальный размер выемной части для бронестержневого сердечника

$$H_B = H + d; \quad (32)$$

радиальная ширина эп [2]

$$x = \frac{I_H}{n_{\pi} y \Delta}; \quad (33)$$

горизонтальный размер (габаритный) без радиаторов

$$D_T = d + 2a + 4\delta_c + l_6. \quad (34)$$

Магнитный поток, проходящий в зоне между стержнем и обмоткой, а также в толще обмотки, частично замыкается через боковые ярма, а частично через стенки бака или магнитные экраны, защищающие их.

Магнитный поток, проходящий между стержнем и обмоткой,

$$\Phi_{co} = \pi B \delta_c (d + \delta_c); \quad (35)$$

то же, через толщу обмотки

$$\Phi_o = \frac{\pi B a}{4} (2d + 4\delta_c + a); \quad (36)$$

суммарный магнитный поток рассеяния

$$\Phi_p = \pi B U_2, \quad (37)$$

где

$$U_2 = \delta_c (d + \delta_c) + \frac{a}{4} (2d + 4\delta_c + a).$$

Часть этого потока, замыкающегося через боковые ярма, можно приближенно определить из выражения

$$\Phi_{\text{я}} = \frac{d\Phi_{\text{р}}}{2(d+a+\delta_0)}. \quad (38)$$

Коэффициент увеличения сечения ярма

$$k_{\text{я}} = 1 + \frac{\Phi_{\text{я}}}{\Phi_{\text{ст}}} = 1 + \frac{4\Phi_{\text{я}}}{k_{\text{с}}B_{\text{с}}\pi d^2} = 1 + \frac{2BU_2}{k_{\text{с}}B_{\text{с}}d(d+a+2\delta_0)}. \quad (39)$$

Наибольший поток рассеяния, приходящийся на один погонный сантиметр экрана в горизонтальной плоскости,

$$\Phi_{\text{пс}} = \frac{\Phi_{\text{р}}}{4(d+a+2\delta_{\text{с}})} = \frac{\pi BU_2}{4(d+a+2\delta_{\text{с}})}. \quad (40)$$

Расчетную индукцию в стенке экрана примем $B_{\text{э}}=1,0$ Тл. Тогда толщина стенки экрана

$$T_{\text{э}} = \Phi_{\text{пс}}/B_{\text{э}}; \quad (41)$$

горизонтальная площадь сечения экрана

$$Q_{\text{э}} = 2k_{\text{с}}T_{\text{э}}(d+2a+4\delta_{\text{с}}). \quad (42)$$

Таблица 1

№ пп.	Обозначение	Размерность	Номер формул	Результаты расчета			
1	a	см	прин.	10	15	20	25
2	d	то же	»	50	75	100	125
3	k_q	о. е.	31	1,029	1,066	1,116	1,181
4	Δ_0	А/см ²	29	300	294	288	280
5	x	см	33	0,24	0,25	0,25	0,25
6	p	см ²	14	2,56	2,56	2,63	2,63
7	N	шт.	25	4450	2060	1170	760
8	G_0	см ²	13	11400	5200	2530	2000
9	h	см	14	1140	350	126	80
10	H	то же	1	1210	420	196	150
11	$H_{\text{в}}$	»	32	1260	495	296	275
12	D_{Γ}	»	34	230	265	300	335
13	Z	»	22	115	53	30	20
14	$k_{\text{я}}$	о. е.	39	1,13	1,15	1,17	1,18
15	$T_{\text{э}}$	см	41	3,5	6,0	9,4	11,6
16	$l_{\text{с}}$	то же	6	2875	1275	887	875
17	$l_{\text{м}}$	»	11	408	502	598	690
18	$Q_{\text{с}}$	см ²	2	1675	3740	6670	10400
19	$Q_{\text{э}}$	то же	42	830	1720	3360	4850
20	$Q_{\text{м}}$	»	10	3420	1010	935	617
21	$G_{\text{с}}$	т	44	44,05	41,50	48,40	73,00
22	$G_{\text{м}}$	то же	12	12,40	7,20	5,00	3,80
23	$G_{\text{а}}$	»	26	56,45	48,70	53,40	76,80
24	$G_{\text{п}}$	»	27	81,0	73,0	63,4	84,4
25	$З_{\text{р}}$	тыс. руб	28	71,0	51,5	49,5	62,5

Осевая высота экранов равна h . На стенках бака, закрытых боковыми ярмами, магнитные экраны не навешиваются.

Масса стали экранов

$$G_{сэ} = Q_э h \gamma_c \cdot 10^{-3} \text{ кг.} \quad (43)$$

Суммарная масса стали реактора

$$G_c = G_{сэ} + G_{ср}. \quad (44)$$

В табл. 1 приведены результаты определения основных размеров и параметров однофазного реактора мощностью 100 МВ·А с бронестержневым сердечником. Для принятого соотношения $d=5a$ оптимальный вариант соответствует $d=100$.

ВЫВОДЫ

1. Сравнение бронестержневого реактора (рис. 1б) мощностью 100 МВ·А, напряжением 500 кВ с реактором, имеющим панцирное ярмо [2], показывает, что он имеет расчетные затраты 49,5 тыс. руб против 46,0 тыс. руб для реактора с панцирным ярмом и полный вес $G_{п}=63,4$ т против 57,9 т.

2. Реакторы бронестержневого типа более целесообразны по расходу цветного металла для обмоток, расход меди для них почти в три раза меньше. Для приведенных вариантов вес меди составил 5 т против 13,3 т и стали 48,4 т против 17,9 т.

ЛИТЕРАТУРА

1. Некоторые вопросы оптимизации геометрии и параметров мощных реакторов / Е. И. Гольдштейн, Н. П. Кострицкая, И. Д. Кутявин и др. — Томск: ТПИ, 1971.
2. Кострицкая Н. П., Кутявин И. Д., Чешева Т. В. Шунтирующие реакторы с панцирным ярмом. — В сб.: Исследование специальных электрических машин и машинно-вентильных систем. Томск, 1981.

Представлена кафедрой
электрооборудования промышленных
предприятий и городов ГПИ

[19.4.1982]

УДК 537.523.5

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ПРОМЕЖУТКА МЕЖДУ ЭКРАНАМИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АППАРАТОВ НАД ЗЕМЛЕЙ

Докт. техн. наук, проф. АЛЕКСАНДРОВ Г. Н., канд. техн. наук,
доц. ИВАНОВ В. Л., канд. техн. наук СОКОЛОВ А. М.

Ленинградский ордена Ленина политехнический институт имени М. И. Калинина

Для выбора изоляционных расстояний аппаратов высокого напряжения и открытых распределительных устройств большое значение имеют данные об электрической прочности системы воздушных промежутков типа экран — экран над заземленной плоскостью при коммутационных перенапряжениях. Электрическая прочность системы экран — экран — земля зависит от большого числа факторов: расстояния между электродами и над землей, соотношения амплитуд напряжений на экранах, размеров экрана и др. Поэтому проведение соответствующих экспериментов достаточно трудоемко [1]. Это обуславливает целесообразность разработки расчетных методов оценки электрической прочности системы изоляционных промежутков на основе результатов испытаний простейшего промежутка экран — земля. Весьма перспективно в этом отношении использование концепции критического заряда [2], устанавливающей