

# Оптимизация и оценка параметров реакторов с сетевой и вентильной обмотками<sup>1</sup>

ГВОЗДЕВ Д.Б., КОЧКИН В.И., КУБАРЕВ Л.П., ФЕДОСОВ Л.Л., ЧЕРЕЗОВ А.В.

*Предложен унифицированный метод расчета и проектирования электромагнитных частей управляемого тиристорными шунтирующего реактора и устройства ограничения токов короткого замыкания. На основе полученных аналитических выражений разработана компьютерная программа электромагнитного расчета трехфазных компенсирующих реакторов трансформаторного типа, зарегистрированная в государственном реестре. Приведены примеры расчета.*

**Ключевые слова:** шунтирующие реакторы, обмотки, электромагнитные части, расчет, проектирование

Для обеспечения устойчивости современных электроэнергетических систем необходимо воздействовать на процессы передачи и распределения активной и реактивной мощности с высоким быстродействием в режиме реального времени. Аналогичные требования возникают к устройствам, предупреждающим или ограничивающим последствия аварийных и внештатных режимов работы энергосистемы. Для этих целей применяются высоковольтные устройства силовой электроники и специальные электрические реакторы, индуктивность которых можно изменять с высокой скоростью.

Одним из способов быстрого изменения индуктивности реактора является применение в нем наряду с сетевой обмоткой (СО) вентильной обмотки (ВО), подключенной к блоку управляемых полупроводниковых приборов (тиристорным ключам) или к быстродействующему коммутационному устройству [1].

Следует отметить, что в дальнейшем это направление было продолжено компанией ВВС и Г.Н. Александровым [2]. Однако опубликованные идеи не получили широкого практического внедрения в электрических сетях, возможно по коммерческим соображениям. Авторам настоящей статьи удалось развить метод расчёта реактора трансформаторного типа [3] с  $E_k = 100\%$  и создать оптимизационную компьютерную программу по выбору параметров такого типа реакторов, что позволило снизить затраты на их изготовление и эксплуатацию.

Особенностью конструкции реакторов является наличие замкнутой магнитной системы, возможно

*A unified method for calculating and designing the electromagnetic parts of a thyristor-controlled shunting reactor and a device for limiting short-circuit currents is proposed. A computer program for carrying out electromagnetic calculations of three-phase transformer-type compensating reactors is developed on the basis of the obtained analytical expressions, which has been entered in the state register. Calculation examples are given.*

**Key words:** shunting reactors, windings, electromagnetic parts, calculation, designing

с небольшими немагнитными зазорами в основных стержнях и магнитных шунтов, защищающих бак и металлические элементы конструкции от магнитных потоков, замыкающихся вне магнитопровода.

Например, в высоковольтном компенсирующем реакторе, предназначенном для работы параллельно с мощной конденсаторной батареей, имеющем замкнутый магнитопровод, применяется ВО (как правило, относительно низкого напряжения, ближайшая к стержню), к зажимам которой присоединен блок из двух параллельно встречно включенных тиристоров. Управляя моментом включения тиристоров, можно практически мгновенно изменить действующее значение тока СО и, следовательно, потребление реактивной мощности в диапазоне от номинального значения (режим короткого замыкания – КЗ ВО) до долей процента номинального значения (режим холостого хода – х.х.). Аналогичная конструкция применима и для шунтирующих реакторов, используемых для компенсации зарядной мощности высоковольтных линий электропередачи, или дугогасящих реакторов в распределительных сетях 6, 10 и 35 кВ.

Для сетей 110–220 кВ с токами КЗ, превышающими значения токов отключения установленной коммутационной аппаратуры, возможно применение ранее предлагаемых проф. Б.Н. Неклепаевым токоограничивающих реакторов, к ВО которых присоединены быстродействующие отключающие устройства на основе управляемых полупроводниковых приборов, вакуумных дугогасительных камер или взрывного типа. В этом случае номинальным режимом работы реактора будет режим КЗ ВО, при котором индуктивное сопротивление реактора, оп-

<sup>1</sup>В порядке обсуждения. *Ред.*

ределяемое магнитным полем вне стержня магнитопровода, мало. В кратковременном режиме работы с разомкнутой ВО сопротивление реактора может быть увеличено на 2–3 порядка (в случае замкнутого магнитопровода) или в 10–20 раз (если магнитопровод с зазорами).

По исполнению магнитной системы и обмоток указанные реакторы близки к конструкциям силовых трансформаторов (ГОСТ 16110–82), методы электромагнитного расчета которых достаточно подробно описаны в [3]. Однако особенности эксплуатационных характеристик реакторов с сетевой и вентиляльной обмотками (напряжение КЗ пары обмоток до 100%, стремление снизить потери х.х. и КЗ в обмотках и элементах конструкции) требуют определенных корректировок электромагнитного расчета, которые не нашли должного отражения в публикациях.

Кроме того, представляет интерес вывод достаточно простых формул и соотношений, устанавливающих связь геометрических размеров реакторов с их основными параметрами и электромагнитными нагрузками. Такие соотношения особенно полезны на стадии предварительного выбора оптимального варианта конструкции реактора.

Рассмотрим однофазный компенсирующий реактор с круглыми СО и ВО, бронестержневым магнитопроводом и замкнутой системой магнитных

шунтов для канализации магнитного потока в режиме КЗ ВО (рис. 1,а).

Основным параметром, определяющим габариты и стоимость реактора, является его максимальная мощность в режиме КЗ ВО. Для компенсирующего реактора – это по определению номинальная мощность, а для токоограничивающего реактора – мощность, определяемая произведением приложенного к СО напряжения сети при внешнем КЗ на ток линии, протекающий через реактор:

$$Q_K = U_{\text{фСО}}^2 / x_{\text{СО}}; Q_{\text{ТО}} = I_{\text{л.н}} U_{\text{КЗ}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{фСО}}$  – напряжение на зажимах реактора, равное наибольшему длительно допустимому фазному напряжению сети, В;  $x_{\text{СО}}$  – индуктивное сопротивление реактора со стороны СО в режиме КЗ ВО, Ом;  $I_{\text{л.н}}$  – номинальный ток линии;  $U_{\text{КЗ}}$  – напряжение на реакторе при КЗ.

Учитывая, что одним из условий работы указанных типов реакторов является отсутствие насыщения стали в любом режиме, номинальное напряжение на зажимах СО принимаем равным напряжению в режиме работы с разомкнутой ВО (аналогичном режиму х.х. силовых трансформаторов):

$$U_{\text{фСО}} = 2\pi f w_{\text{СО}} \frac{B_{\text{ст.м}}}{\sqrt{2}} \frac{\pi D_{\text{ст}}^2}{4} k_{\text{ст}}, \quad (2)$$

где  $f$  – частота, Гц;  $w_{\text{СО}}$  – число витков сетевой обмотки;  $B_{\text{ст.м}}$  – амплитуда индукции в стали магнитопровода, Тл;  $D_{\text{ст.м}}$  – диаметр стержня магнитопровода, м;  $k_{\text{ст}}$  – коэффициент заполнения сталью.

Индуктивностью реактора является индуктивность рассеяния в опыте КЗ пары обмоток:

$$x_{\text{СО}} = \omega L_{\text{СО}} = 2\pi\mu_0 w_{\text{СО}}^2 S_{\text{рас}} / h_{\text{ок}}, \quad (3)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $h_{\text{ок}}$  – высота окна магнитопровода (в двухстержневом реакторе – удвоенная), принятая совпадающей с длиной силовых линий поля рассеяния (поскольку радиальный размер обмоток и канала между обмотками заведомо больше зазора между торцом обмоток и магнитными шунтами), м;  $S_{\text{рас}}$  – площадь канала рассеяния в предположении, что радиальные размеры обмоток не сильно отличаются друг от друга:

$$S_{\text{рас}} = \pi(D_{\text{с.м}} + 2\Delta_{\text{с-ВО}} + 2b_{\text{ВО}} + b_{\text{К}}) \left( b_{\text{К}} + \frac{b_{\text{ВО}} + b_{\text{СО}}}{3} \right). \quad (4)$$

Здесь  $\Delta_{\text{с-ВО}}$  – радиальный размер изоляционного канала между стержнем и ВО, м;  $b_{\text{ВО}}$ ,  $b_{\text{СО}}$  – радиальные размеры ВО и СО, м;  $b_{\text{К}}$  – радиальный размер изоляционного канала между ВО и СО, м.

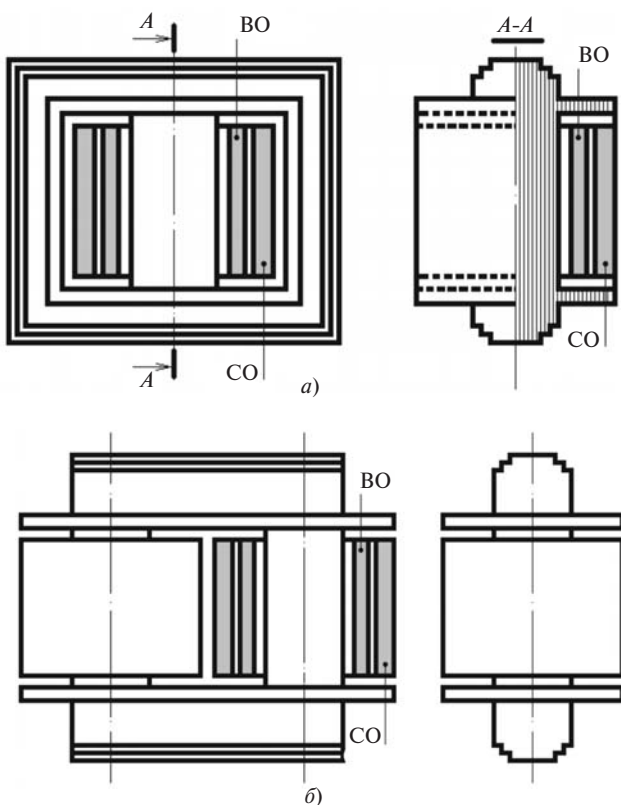


Рис. 1. Схема конструкции реактора: а – бронестержневого (БСТ); б – двухстержневого (2СТ)

Радиальные размеры обмоток в первом приближении можно оценить, используя значения коэффициентов заполнения обмоток материалом провода из близких аналогов обмоток, используемых в силовых трансформаторах, по формулам:

$$\begin{aligned} I_{CO} w_{CO} &= J_{CO} h_{CO} b_{CO} k_{CO}; \\ I_{BO} w_{BO} &= J_{BO} h_{BO} b_{BO} k_{BO}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $I_{CO}$ ,  $I_{BO}$  – номинальные токи в СО и ВО, А;  $J_{CO}$ ,  $J_{BO}$  – плотность тока в СО и ВО, А/м<sup>2</sup>;  $h_{CO}$ ,  $h_{BO}$  – высота обмоток, м;  $k_{CO}$ ,  $k_{BO}$  – коэффициенты заполнения обмоток.

Принимая высоту ВО и СО одинаковой и равной  $h_{обм}$ , учитывая равенство ампер-витков обмоток в режиме КЗ ВО и подставляя в (5) значение  $w_{CO}$  из (2), получим:

$$\begin{aligned} b_{BO} &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2} \frac{U_{\phi CO} J_{CO}}{f B_{ст.м} J_{BO} h_{обм} k_{ст} k_{BO} D_{с.м}^2} \cdot 1; \\ b_{CO} &= \frac{J_{BO} k_{BO}}{J_{CO} k_{CO}} b_{BO}; \quad h_{обм} = h_{ок} - 2\Delta_{о-я}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\Delta_{о-я}$  – размер изоляционного канала между торцами обмоток и ярами, м.

Подставляя в (1) значения, полученные из (2) и (3) с учётом (4) и (6) при  $J_{CO} = J_{BO}$ , получим уравнение для определения диаметра стержня и высоты окна магнитопровода по заданным значениям номинальных параметров, электромагнитных нагрузок и размеров основных изоляционных промежутков:

$$\begin{aligned} A_1 h_{ок} D_{с.м}^4 - \pi \left( D_{с.м} + 2\Delta_{с-во} + b_k + \right. \\ \left. + \frac{A_2}{(h_{ок} - 2\Delta_{о-я}) D_{с.м}^2} \right) \left( b_k + \frac{A_2 (1 + k_{BO} / k_{CO})}{6(h_{ок} - 2\Delta_{о-я}) D_{с.м}^2} \right) = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где для компенсирующих и шунтирующих реакторов:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\pi^2}{64} 10^7 \frac{f B_{ст.м}^2}{Q_{max}} k_{ст}^2, \quad 1/\text{м}^3; \\ A_2 &= \frac{4\sqrt{2}}{\pi^2} \frac{Q_{max}}{f B_{ст.м} J_{BO} k_{ст} k_{BO}}, \quad \text{м}^4; \end{aligned} \quad (8)$$

для токоограничивающих реакторов:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\pi^2}{64} 10^7 \frac{f B_{ст.м}^2}{U_{\phi CO}^2} k_{ст}^2 x_{CO}, \quad 1/\text{м}^3; \\ A_2 &= \frac{4\sqrt{2}}{\pi^2} \frac{U_{\phi CO} I_{CO}}{f B_{ст.м} J_{BO} k_{ст} k_{BO}}, \quad \text{м}^4. \end{aligned} \quad (9)$$

Определенные по (7) взаимосвязанные значения диаметра стержня и высоты окна магнитопровода, а по (6) – значения радиальных размеров обмоток позволяют провести оценочный электромагнитный расчет реакторов при разных значениях диаметра стержня магнитопровода и выбрать его оптимальный диаметр.

Для однофазных реакторов с очень большим диаметром стержня магнитопровода целесообразно применение двухстержневой конструкции (рис. 1, б). В этом случае коэффициенты (9) в уравнении (7) рассчитывают как

$$A_{1(2с)} = 2A_{1(бс)}; \quad A_{2(2с)} = 2A_{2(бс)} / 2, \quad (10)$$

где индексы «2с» и «бс» означают двухстержневую и бронестержневую однофазные конструкции.

Наличие небольших по высоте немагнитных зазоров в стержне магнитопровода не очень заметно влияет на выбор его диаметра. Для расчетов необходимо в правую часть (2) ввести коэффициент потокосцепления  $K_{\psi} = 1,01 - 1,03$ , учитывающий отличие среднего потока в витках обмотки от наибольшего потока в стержне магнитопровода. В числитель правой части  $A_1$  и знаменатель правой части  $A_2$  (8) и (9) подставляем соответственно  $K_{\psi}^2$  и  $K_{\psi}$ . Однако наличие зазоров приводит к увеличению намагничивающей мощности реактора в режиме работы с разомкнутой ВО.

Диапазон изменения мощности реактора (глубина регулирования  $K_{рег}$ ) – отношение его максимальной мощности в режиме КЗ ВО к намагничивающей мощности зазоров ( $Q_{МГН}$ ) – равен:

$$K_{рег} = \frac{Q_{max}}{Q_{МГН}} = \frac{x_{МГН}}{x_{CO}} = \frac{S_3}{S_{рас}} \frac{h_{ок}}{l_{3\Sigma}}, \quad (11)$$

где  $S_3$  – площадь сечения зазора с учетом «выпучивания» магнитного поля на расстояние, примерно равное высоте единичного зазора  $l_3$ :

$$S_3 = \frac{\pi}{4} (D_{с.м} + 2l_3)^2; \quad (12)$$

$l_{3\Sigma}$  – суммарная высота зазоров на стержень, м.

Влияние размера зазоров на глубину регулирования мощности компенсирующих и токоограничивающих реакторов можно оценить по (11) с учетом (4), (7) и (12) при конкретных значениях их параметров и размеров.

Для канализации магнитного потока в режиме КЗ ВО применяется система магнитных шунтов, конструкция которых аналогична конструкции магнитных систем броневых или ярмовых реакторов [2]. Площадь сечения магнитных шунтов определяется площадью канала рассеяния за вычетом

доли магнитного потока рассеяния, входящего в ярма основного магнитопровода.

В бронестержневом однофазном реакторе активное сечение каждого из двух замкнутых шунтов можно оценить как

$$S_{ш} = \frac{1}{4} \frac{B_{ос}}{B_{ш}} \frac{S_{рас}}{1 + 0,5(S_{рас} / S_{рас.ш} - 1)}, \quad (13)$$

где  $B_{ос}$  – индукция осевого поля в канале рассеяния, вычисленная по номинальным ампер-виткам, деленным на высоту окна;  $B_{ш}$  – наибольшая индукция в стали магнитного шунта;  $S_{рас.ш}$  – часть площади канала рассеяния, находящаяся в зоне магнитных шунтов (площадь двух кольцевых сегментов).

В целях снижения массы магнитных шунтов и торцевых ярм в компенсирующих и шунтирующих реакторах иногда рассматривают применение некруглых (овальных) обмоток. Для упрощения анализа представим описанный овал стержня фигурой из двух полуокружностей диаметром  $D_{с.м}$ , соединенных прямыми линиями длиной  $\alpha D_{с.м}$ . Площадь геометрического сечения стержня

$$S_c = \alpha D_{с.м}^2 + \frac{\pi}{4} D_{с.м}^2 = (\alpha + \pi/4) D_{с.м}^2,$$

а средний периметр канала рассеяния

$$l_{рс} = \pi(D_{с.м} + 2\Delta_{с-во} + 2b_{во} + b_k) + 2\alpha D_{с.м}.$$

В этом случае уравнение для определения сторон сечения стержня и высоты окна магнитопровода вместо (7) принимает вид:

$$(1 + 4\alpha / \pi)^2 A_1 h_{ок} D_{с.м}^4 - \left[ 2\alpha D_{с.м} + \pi \left( D_{с.м} + 2\Delta_{с-во} + b_k + \frac{A_2 / (1 + 4\alpha / \pi)}{(h_{ок} - 2\Delta_{о-я} D_{с.м}^2)} \right) \right] \times \left( b_k + \frac{A_2 (1 + k_{во} / k_{со}) / (1 + 4\alpha / \pi)}{6(h_{ок} - 2\Delta_{о-я}) D_{с.м}^2} \right) = 0, \quad (14)$$

где значения  $A_1$  и  $A_2$  из (8).

Очевидно, что при  $\alpha=0$  (сечение круг) указанное уравнение тождественно (7).

**Примеры расчета.** Исходные данные для оценки параметров однофазных бронестержневых компенсирующих реакторов:

Класс напряжения, кВ	35	110	220
Длительно допустимое напряжение фазы СО, кВ	22,2	73,8	145,7
Номинальная мощность фазы, МВА	1,25	10,0	36,7
Электромагнитные нагрузки: $B_{ст.м}$ , Тл	1,85	1,80	1,75

$J_{во} = J_{со}$ , А/мм <sup>2</sup>	4,0	3,2	3,0
Коэффициенты заполнения:			
$k_{ст}$	0,77	0,86	0,87
$k_{во} / k_{со}$	0,49/0,45	0,48/0,39	0,48/0,31
Изоляционные промежутки, мм:			
$b_k \min$	40	60	90
$\Delta_{с-во}$	20	25	30
$\Delta_{о-я}$	30	50*	50*

\*Применен ввод высокого напряжения в середину СО. Класс напряжения нейтрали 35 кВ.

Исходные данные для оценки параметров двухстержневых токоограничивающих реакторов для сетей 110 кВ (длительно допустимое напряжение фазы СО 72,8 кВ):

Индуктивное сопротивление, Ом	1,6	3,2
Мощность фазы при КЗ, МВА	3310	1655
Номинальный ток СО, А	1000	1000
Электромагнитные нагрузки:		
$B_{ст.м}$ , Тл	2,05	2,05
$J_{во} = J_{со}$ , А/мм <sup>2</sup>	3,2	3,2
Коэффициенты заполнения:		
$k_{ст}$	0,84	0,83
$k_{во} / k_{со}$	0,48/0,39	0,48/0,39
Изоляционные промежутки, мм:		
$b_k \min$	60	60
$\Delta_{с-во}$	30	30
$\Delta_{о-я}$	50*	50*

\*Применен ввод высокого напряжения в середину СО. Класс напряжения нейтрали 35 кВ.

Для удобства расчетов при фиксированных значениях исходных данных и  $h_{ок}$  представим уравнение (7) в виде двух функций от одного переменного  $D_{с.м}$ , точка пересечения которых в плоскости действительных чисел является единственным положительным решением этого уравнения:

$$Y_1 = \frac{A_1}{\pi} D_{с.м}^2;$$

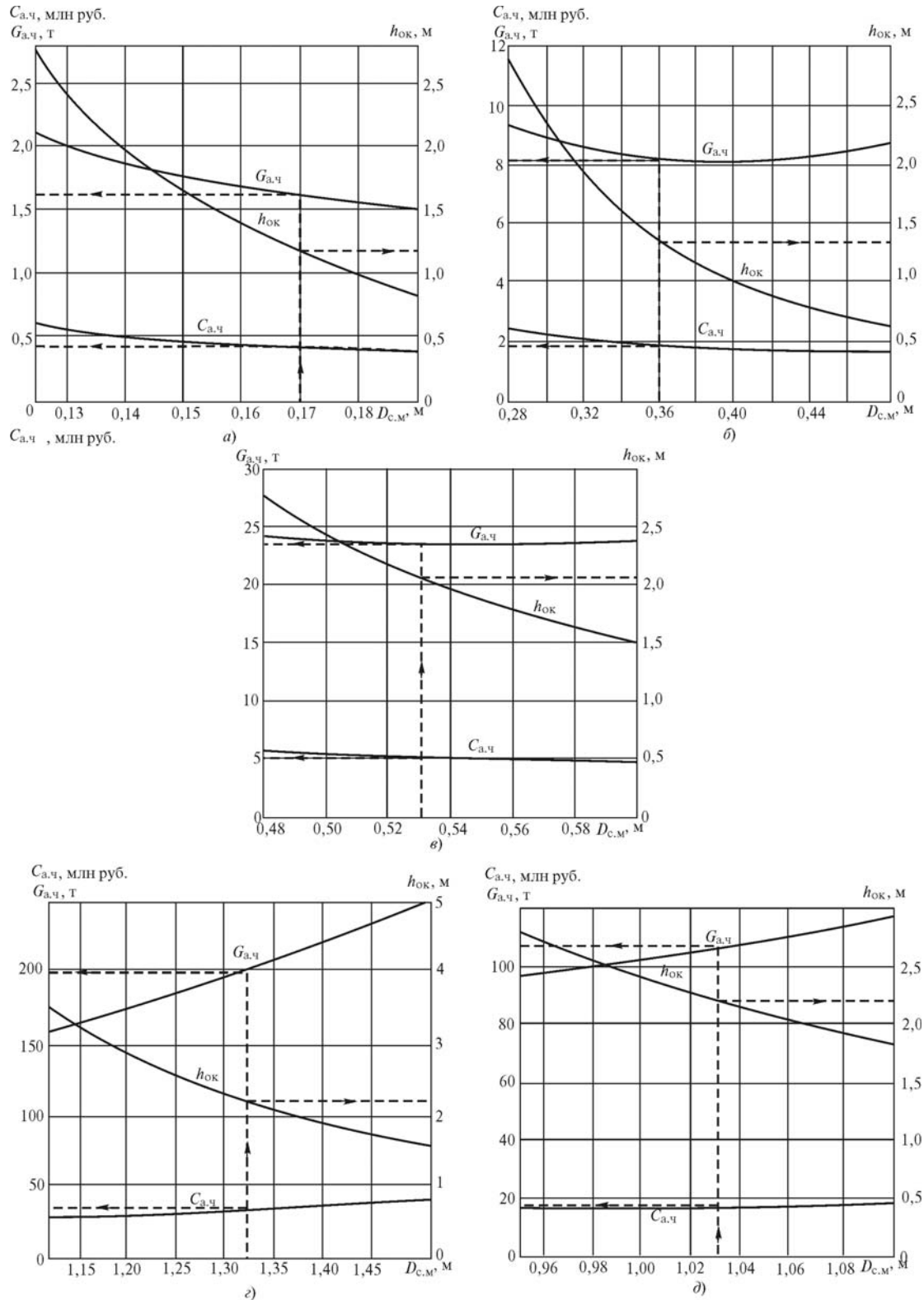
$$Y_2 = \left[ 1 + \frac{b_k + 2\Delta_{с-во}}{D_{с.м}} + \frac{A_2}{D_{с.м}^3 (h_{ок} - 2\Delta_{о-я})} \right] \times \left[ \frac{b_k}{h_{ок} D_{с.м}} + \frac{A_2 (1 + k_{во} / k_{со})}{6h_{ок} D_{с.м}^3 (h_{ок} - 2\Delta_{о-я})} \right]. \quad (15)$$

Совместное решение (15) удобно искать методом «деления отрезка пополам», задав, например,

$$\text{значение } \Delta_Y = \left| \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1} \right| 100\% \leq 0,5\%.$$

Определив по (15) основные размеры реактора ( $D_{с.м}$ ,  $h_{ок}$ ), несложно вычислить его габариты, массу и ориентировочную стоимость по компьютерной программе [4], разработанной на основе полученных аналитических выражений.





**Рис. 2.** Зависимость габаритов, массы ( $G_a$ ) и ориентировочной стоимости ( $C_a$ ) от  $D_{c,м}$  для компенсирующих реакторов ( $a - 35$  кВ;  $б - 110$  кВ;  $в - 220$  кВ) и для токоограничивающих 110 кВ ( $г -$  индуктивное сопротивление 1,6 Ом;  $д - 3,2$  Ом)

На рис. 2 представлены указанные зависимости для разных типов реакторов с приведенными ранее исходными данными (штриховыми линиями показаны для конкретного значения  $D_{c,м}$  получаемые параметры). Аналогичным методом можно провести расчёт трёхфазного управляемого реактора.

Апробация данного метода электромагнитного расчета проводилась при проектировании компенсирующего реактора типа РКТВДЦ-30000/110 для быстродействующих источников реактивной мощности в электрических сетях Западной Сибири.

В соответствии с исходными данными и результатами расчетов были выбраны: диаметр стержня магнитопровода – 0,4 м, высота окна – 1,55 м, ширина канала между ВО и СО – 0,085 м. Оптимизационные расчеты по [4] с последующей раскладкой обмоток, уточнением основных и добавочных потерь и проверкой импульсной прочности показали полное соответствие выбранной конструкции техническим требованиям на проектирование при близкой к минимуму полной массе реактора и его стоимости.

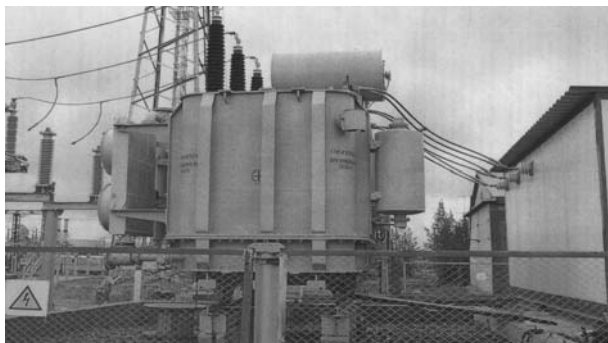


Рис. 3. Внешний вид УШРТ 110 кВ

Изготовленные в соответствии с разработанным комплектом конструкторской документации два реактора успешно прошли приемосдаточные испытания и с октября 2009 г. введены в эксплуатацию на подстанциях 220 кВ Когалым и Прогресс МЭС Западной Сибири [5].

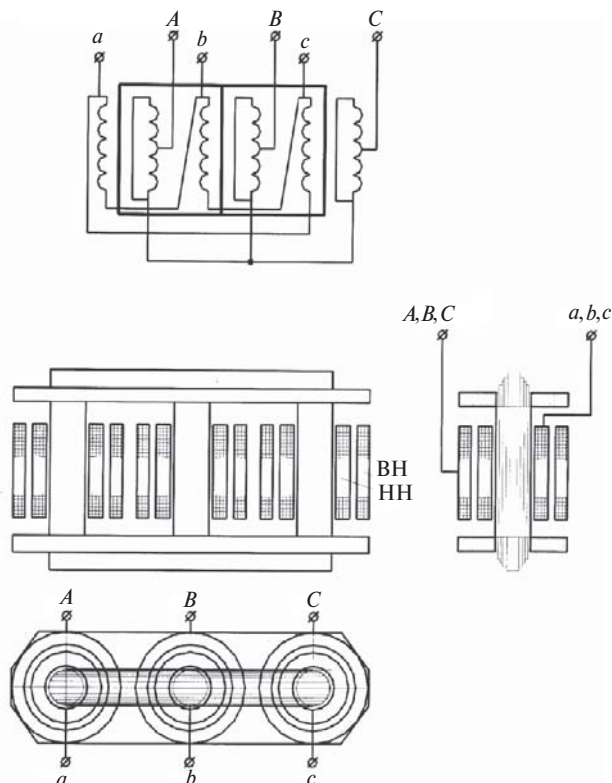


Рис. 4. Схема электромагнитной части УШРТ

Общий вид быстродействующего управляемого тиристорными вентилями шунтирующего реактора (УШРТ) представлен на рис. 3 (слева расположена электромагнитная часть, а справа – контейнер с тиристорными вентилями). Электромагнитная часть (рис. 4) конструктивно выполнена в виде трёхфазной системы с магнитными шунтами, расположенными в верхней и нижней частях магнитопровода и исключающими потери в баке и металлических деталях. Особенностью оборудования УШРТ является то, что оно рассчитано на климатическое исполнение УХЛ ( $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\div+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Проведённые заводские и натурные испытания подтвердили заявленные параметры УШРТ:

Номинальное напряжение сетевой обмотки	110 кВ
вентильной обмотки	10,5 кВ
Номинальная мощность	25,0 Мвар
Длительно допустимая мощность	30,0 Мвар
Напряжение КЗ при 30 Мвар	100,0%
Общие фактические потери, включая потери в тиристорных вентилях	0,9%
Ток холостого хода	0,1%
Уровень шума в режиме КЗ	88 дБА

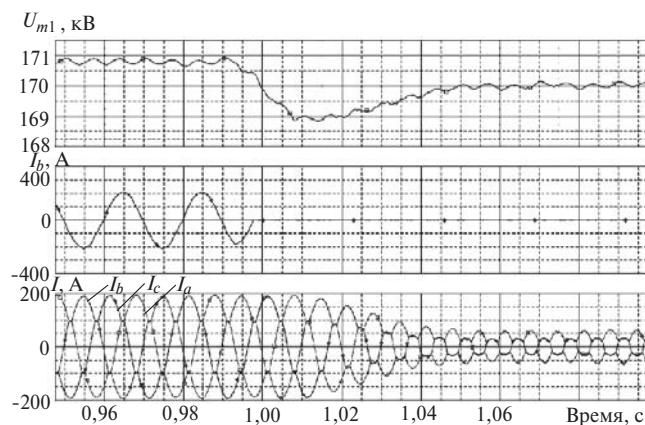


Рис. 5. Динамическая характеристика УШРТ при отключении БСК (быстродействие 40 мс)

Кроме того, подтверждено и высокое быстродействие УШРТ (рис. 5) в замкнутой системе регулирования при коммутации на шинах 110 кВ батареи статических конденсаторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reichert K., Kaufeler J., Glavtsh H. Controllable reactor compensator for more extensive utilization of high voltage systems. – CIGRE, 25 Session, 1974, Report 32-07.
2. Александров Г.Н., Лунии В.П. Управляемые реакторы. – СПб, 2001.
3. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981.

4. **Кочкин В.И., Крайнов С.В., Кубарев Л.П., Федосов Л.Л.** Программа электромагнитного расчета трехфазных компенсирующих реакторов трансформаторного типа. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009615642 (РФ), 2009.

5. **Гвоздев Д.Б., Дроздов А.В., Кочкин В.И. и др.** Применение быстродействующих источников реактивной мощности в электрических сетях Западной Сибири. – Электрические станции, 2010, №11.

[20.12.10]

*Авторы: Гвоздей Дмитрий Борисович окончил факультет электроснабжения Кузбасского государственного технического университета в 1996 г. В 2000 г. там же защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование». Зам. председателя правления ОАО «ФСК ЕЭС», главный инженер.*

*Кочкин Валерий Иванович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1962 г. В 1993 г. защитил в МЭИ докторскую диссертацию «Многофункциональные вентильные компенсаторы реактивной мощности для управления режимами работы энергосистем». Зам. научного руководителя ОАО «НТЦ электроэнергетики».*

*Кубарев Леонид Петрович окончил ЭЭФ МЭИ в 1965 г. В 1975 г. защитил в ВЭИ кандидатскую диссертацию «Исследование, разработка и применение обобщенного метода оптимизации и оценки параметров реакторов тиристорных преобразователей». Главный конструктор НПЦ «Энерком-Сервис».*

*Федосов Леонид Леонидович окончил электромеханический факультет Коммунарского горнометаллургического института в 1969 г. Зам. главного конструктора НПЦ «Энерком-Сервис».*

*Черезов Андрей Владимирович окончил Алтайский государственный технический университет по специальности «Электроснабжение» в 1993 г. Зам. председателя правления ОАО «ФСК ЕЭС».*