

Оптимизация и оценка параметров реакторов с сетевой и вентильной обмотками¹

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 изменять 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-

¹В 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 вентиляционной 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:

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

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; $I_{\text{ЛН}}$ – 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 стали.

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.

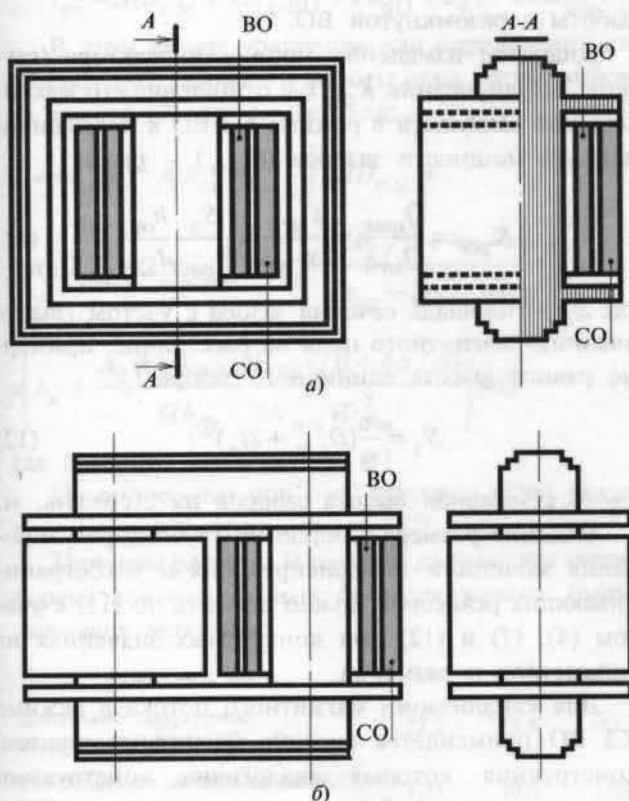


Рис. 1. Схема конструкции реактора: а – бронестержневого (БСТ); б – двухстержневого (2СТ)

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/м²; h_{CO} , h_{BO} – высота обмоток, м; k_{CO} , k_{BO} – коэффициенты заполнения обмоток.

Принимая высоты 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:

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

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_{ψ}^2 и K_{ψ} . 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:			
$V_{ст.м}$, Тл	1,85	1,80	1,75

$J_{ВО} = J_{СО}$, А/мм ²	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:			
$b_{к min}$	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:		
$V_{ст.м}$, Тл	2,05	2,05
$J_{ВО} = J_{СО}$, А/мм ²	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:		
$b_{к min}$	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, 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.

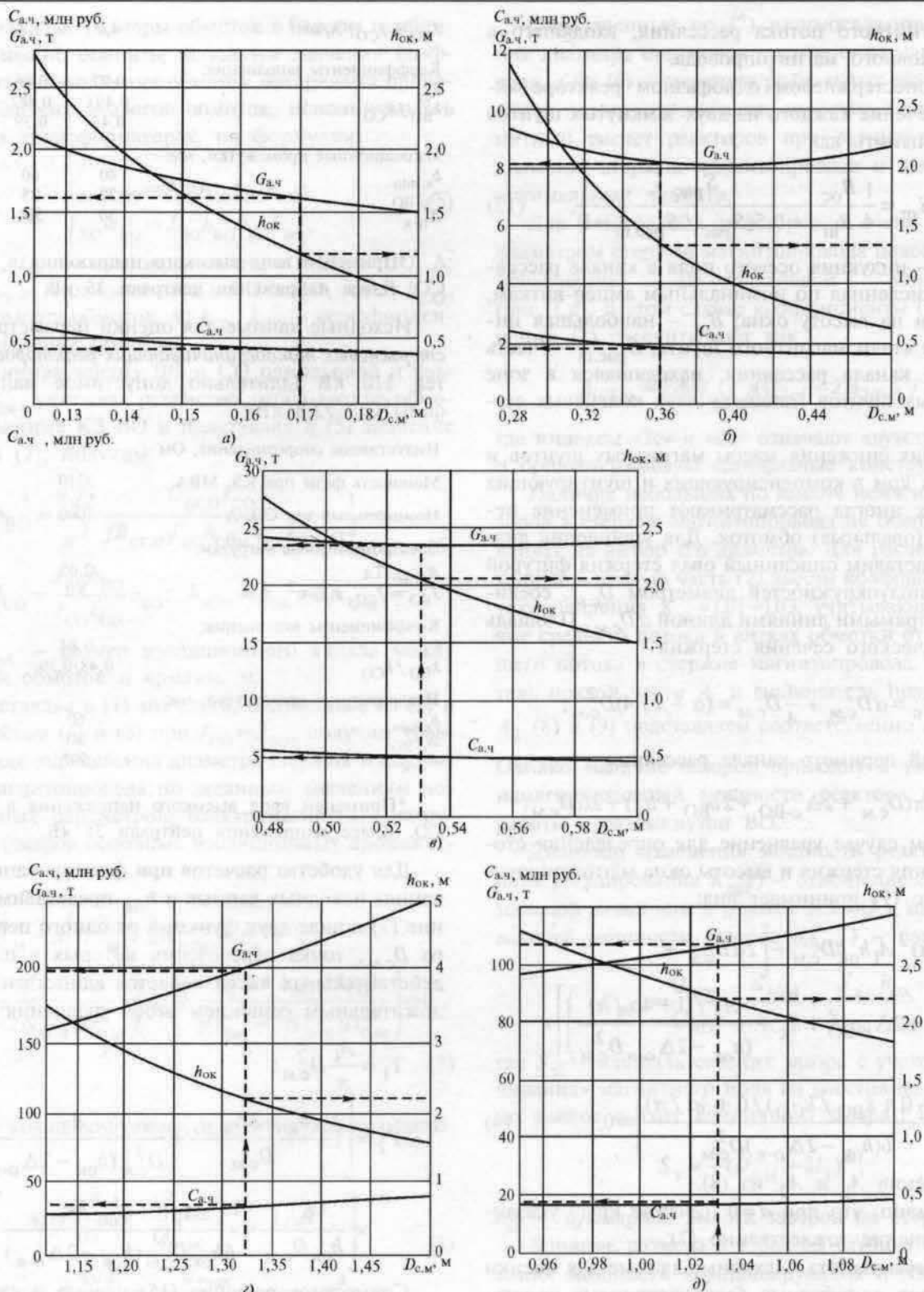


Рис. 2. Зависимость габаритов, массы ($G_{а.ч}$) и ориентировочной стоимости ($C_{а.ч}$) от $D_{с.м}$ для компенсирующих реакторов (а – 35 кВ; б – 110 кВ; в – 220 кВ) и для токоограничивающих 110 кВ (г – индуктивное сопротивление 1,6 Ом; д – 3,2 Ом)

На рис. 2 представлены указанные зависимости для разных типов реакторов с приведенными ранее исходными данными (штриховыми линиями показаны для конкретного значения $D_{с.м}$ 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.

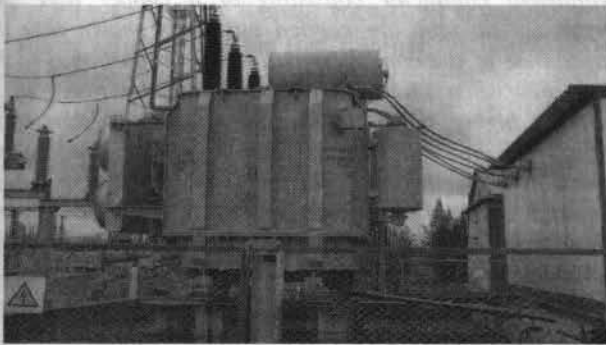


Рис. 3. Внешний вид УШРТ 110 кВ

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].

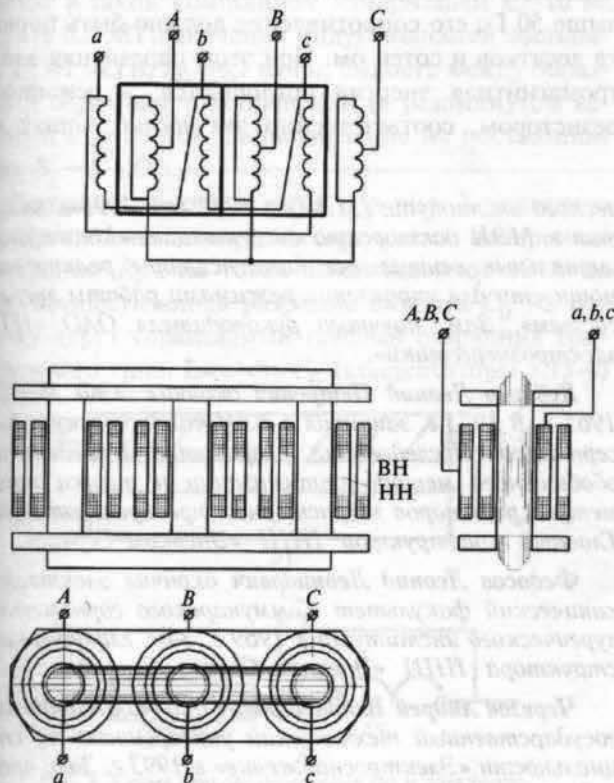


Рис. 4. Схема электромагнитной части УШРТ

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

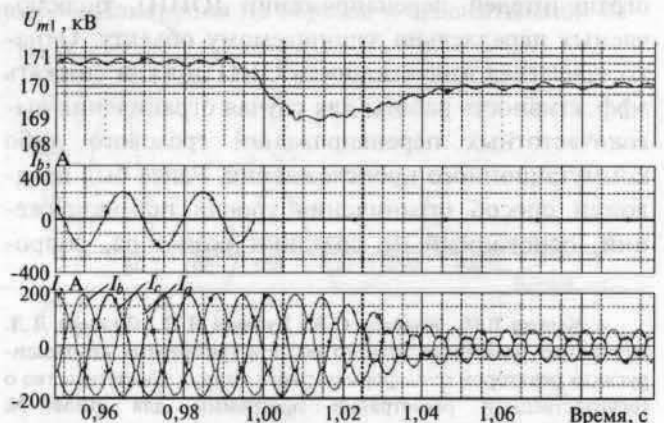


Рис. 5. Динамическая характеристика УШРТ при отключении БСК (быстродействие 40 мс)

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., Kauferle J., Glavtsh N. Controllable reactor compensator for more extensive utilization of high voltage systems. – SIGRE, 25 Session, 1974, Report 32-07.
2. Александров Г.Н., Лукин 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: Гвоздев 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».