

# Применение прогрессивных решений в разработках газонаполненного оборудования высокого напряжения

ЗЕТКИН М.В., ИВАНОВ А.Н., ИВАНОВ А.С., КАМАЛОВ Р.С., ПАРФЕНОВ Д.Е.,  
РАХМАТУЛИН А.В., ЧЕМЕРИС В.С.

*Проведён анализ особенностей совершенствования и общих тенденций использования прогрессивных решений при создании высоковольтного газонаполненного герметичного оборудования. Представлены примеры таких решений при создании отдельных видов высоковольтного газонаполненного герметичного оборудования. Проанализированы проблемы при оптимизации основного изоляционного узла в газонаполненном оборудовании высокого напряжения.*

**Ключевые слова:** КРУЭ, газоизолированные линии, выключатель, разъединитель-заземлитель, изолятор

Совершенствование высоковольтной техники определяется прежде всего постоянно действующими потребительскими факторами, вызванными необходимостью

- повышения надёжности работы;
- увеличения межревизионных периодов в эксплуатации;
- повышения оперативного ресурса;
- создания наибольших удобств при обслуживании в эксплуатации;
- снижения затрат в эксплуатации;
- маневренности в применении;
- обеспечения высокого экологического уровня.

Разработчик-изготовитель при создании высоковольтного оборудования с заданными техническими параметрами стремится к снижению производственных затрат на основе использования передовых технологических приёмов и процессов, увеличению доли унифицированных деталей и узлов, внедрению прогрессивных организационных мероприятий в производственный процесс, применению новых принципиальных и конструктивных решений, кардинально улучшающих технические характеристики оборудования.

Внедрение газонаполненного оборудования высокого напряжения — комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией (КРУЭ), выключателей, газоизолированных линий (ГИЛ) — можно отнести к таким прогрессивным решениям, которые снимают многие проблемы как у потребителя, так и у изготовителя. Оборудование на энергетических объектах страны в основном изготовлено и

*The specific features relating to improvement of sealed gas-filled high-voltage equipment and general trends in using advanced solutions for development of such equipment are analyzed. Examples of such solutions used in construction of certain kinds of sealed gas-filled high-voltage equipment are given. Problems concerned with optimizing the main insulation component in gas-filled high-voltage equipment are analyzed.*

**Key words:** gas-insulated switchgear, gas-insulated power lines, circuit breaker, grounding disconnecter, insulator

установлено в 50–70-х годах прошлого столетия и по своим техническим характеристикам, массогабаритным показателям, показателям надёжности уступает современным образцам.

Применение элегазовой техники повышает и технические характеристики, и надёжность оборудования. По данным СИГРЭ повреждаемость подстанций с КРУЭ составляет 1% в год (для сравнения повреждаемость ОРУ составляет 6–7% в год) [1]. Основным показателем надёжности высоковольтного оборудования является вероятность отказа, определяемая по числу отказов в год. Для элегазового коммутационного оборудования этот показатель составляет 0,67%, причем для аппаратов в заземленной оболочке его значение достигает 0,32%, а для элегазовой аппаратуры ОРУ — 0,94% (по выключателям). Помимо высокой надёжности отметим еще одно достоинство газонаполненного оборудования — компактность, что является важным фактором для устройств электроснабжения крупных городов и промышленных центров. Подстанция с КРУЭ занимает в несколько раз меньше площади по сравнению с традиционной подстанцией аналогичного класса напряжения. Закрытый корпус КРУЭ также позволяет располагать оборудование в районах с неблагоприятной экологической обстановкой, с агрессивным воздействием окружающей среды.

Основные усилия разработчиков газонаполненного оборудования сейчас направлены на повышение его надёжности с одновременным снижением стоимости. Это достигается путем оптимизации и

упрощения конструкции, использованием модульного принципа при проектировании, применением новых материалов. Повышение надежности связано в первую очередь с совершенствованием приводов. Стремление производителей к упрощению конструкции отражает общую тенденцию в создании элегазовых выключателей с одним разрывом вплоть до номинального напряжения 500 кВ.

В последнее время производители стремятся к созданию многофункциональных устройств. Например, комбинированный выключатель типа PASS (Plug And Switch System – система «присоединяй и включай»), совмещающий в одном корпусе кроме выключателя и трансформатора тока еще и разъединители с заземлителями. (Правда, применение такого устройства в традиционной схеме подстанции ограничено по безопасности персонала.)

При большом многообразии газонаполненного оборудования высокого напряжения многолетний опыт ВЭИ в разработке и освоении промышленного производства элегазовой техники позволяет выделить наиболее перспективные решения при создании новых видов высоковольтной техники на номинальные напряжения начиная с 10 и до 1150 кВ [2, 3].

В условиях постоянно растущего рынка предложений герметичного газонаполненного оборудования и одновременно роста требований по надежности, компактности, уменьшению массогабаритных характеристик и экологической безопасности разработчик решает ряд необходимых и сложных задач. Во-первых, это обеспечение высокой степени гибкости оборудования, что достигается благодаря использованию модульной конструкции. Модули состоят из отдельных или объединенных элемен-

тов, заключенных в металлическую оболочку. Каждый модуль отделен от другого герметичным изолятором, но в отдельных случаях внутренние объемы нескольких модулей, работающих под одинаковым избыточным давлением, объединяют в секции. Каждая секция имеет свою контрольно-измерительную газовую аппаратуру. При модульной конструкции компоненты монтируются в соответствии с их функциональным и техническим назначением. В местах соединения модулей имеются уплотнения, которые обеспечивают высокую степень герметичности. При модульном исполнении с помощью небольшого числа активных и пассивных модулей можно легко изменить функциональность оборудования, его состав, очередность элементов и реализовать все варианты электрических схем. Модульное исполнение предполагает унификацию деталей и узлов оборудования, что значительно упрощает его изготовление и монтаж.

Достоинства модульной конструкции рассмотрены на примере КРУЭ 252 кВ, разработанного ВЭИ для китайской фирмы LYEC (рис. 1 и 2) на параметры: номинальный ток (сборных шин/отводов) 4000/3150 А; ток отключения выключателем 40 кА; ширина ячейки 1200 мм. На рисунках представлены 4 варианта ячеек КРУЭ с расположением трех фаз в одной оболочке, отличающихся составом элементов ячейки и условиями присоединения её к сети:

- 1) с трансформатором напряжения и воздушным вводом (рис. 1,а);
- 2) без трансформатора напряжения и с вертикально расположенным кабельным вводом в подполе (рис. 1,б);
- 3) без трансформатора напряжения, с воздушным вводом (рис. 2,а);

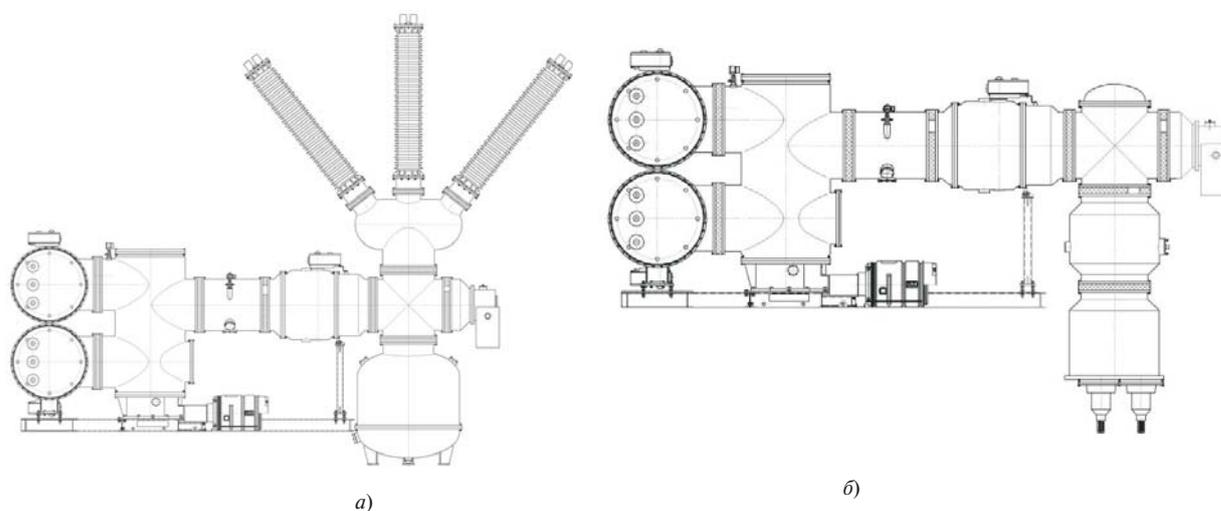


Рис. 1. Варианты формирования ячеек КРУЭ 252 кВ ВЭИ для LYEC модульного исполнения

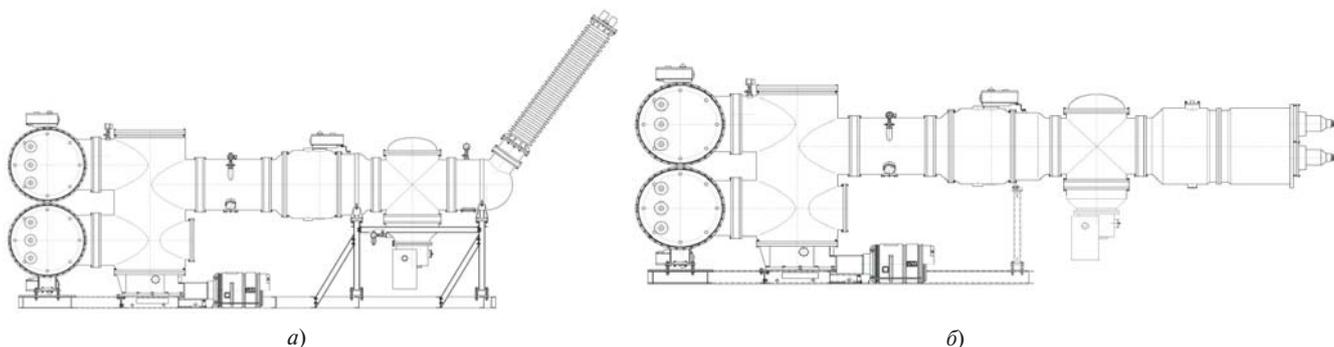


Рис. 2. Варианты формирования ячеек КРУЭ 252 кВ ВЭИ для LYEC модульного исполнения

4) без трансформатора напряжения, с горизонтально расположенным кабельным вводом (рис. 2, б).

В составе ячеек предусматриваются: выключатель, трансформатор тока, комбинированный разъединитель-заземлитель, быстродействующий заземлитель, две сборных шины с комбинированными разъединителями-заземлителями.

Для обеспечения компактности оборудования первостепенное значение имеет выбор компоновки. Компоновка может быть: пофазной, когда каждая фаза расположена в собственной герметичной оболочке; трехфазной, когда все три фазы расположены в общей герметичной оболочке; гибридной, когда часть элементов имеет однофазное исполнение, а часть трехфазное. Анализ эксплуатируемого герметичного газонаполненного оборудования показывает, что до напряжения 220 кВ такое оборудование изготавливается во всех трех вариантах; а начиная от 220 кВ и выше, как правило, только в пофазном варианте. Опыт разработок ВЭИ в последние годы был связан преимущественно с трехфазным оборудованием на напряжение 110–220 кВ. Это работы по созданию трехфазного КРУЭ 126 кВ для китайской фирмы «Tianshui Changcheng Switchgear Factory» (TCS) [4]; трехфазных КРУЭ на 126 и 252 кВ и токопровода 252 кВ для китайской

фирмы «Long Yuan Electric Corporation Council» (LYEC) [5]. Такая компоновка позволяет прежде всего значительно уменьшить шаг (ширину) оборудования, снизить ее металлоемкость, уменьшить число приводных механизмов. Например, для КРУЭ 126 кВ, разработанного ВЭИ для китайской фирмы LYEC (рис. 3) на номинальный ток (сборных шин/отводов) 4000/3150 А и ток отключения выключателем 40 кА, ширина ячейки составляет всего 800 мм.

В последнее время большое внимание уделяется повышению экологичности оборудования. Ужесточаются требования к герметизации элегазового оборудования. Норма допустимой годовой утечки обычно составляет 0,5% объема. Наметилась тенденция к применению смесей газов: азот – элегаз ( $N_2+SF_6$ ) и хладон – элегаз ( $CF_4+SF_6$ ), а в некоторых случаях и сжатого воздуха. В практически используемых смесях азота и элегаза по сравнению с чистым элегазом не происходит значительного падения изоляционных свойств, но понижается коммутационная способность газовой среды. Для смесей хладона и элегаза наблюдаются обратные характеристики, т.е. снижение изоляционных свойств и почти неизменная коммутационная способность. Такие смеси газов используют в газоизолированных токопроводах, баковых выключателях,



Рис. 3. КРУЭ 126 кВ ВЭИ для LYEC. Испытание электрической прочности изоляции

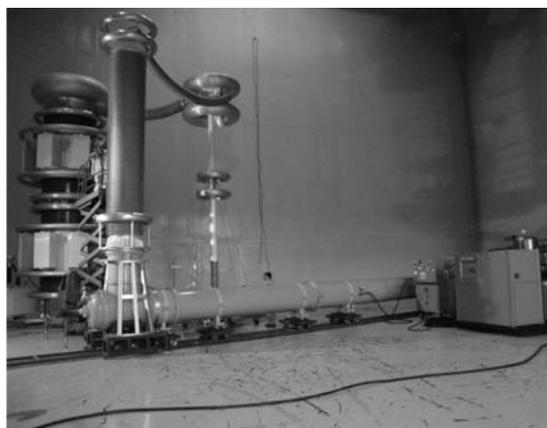


Рис. 4. Токопровод 550 кВ в процессе испытания изоляции

в трансформаторах тока и напряжения для открытых распределительных устройств и др.

Отметим положительный опыт ВЭИ по разработке токопроводов на сжатом воздухе: трехфазного токопровода 252 кВ в общей оболочке и токопровода 550 кВ в пофазной компоновке (рис. 4), разработанных по контрактам с китайской фирмой LYEC, со следующими техническими характеристиками: номинальный ток 4000 А; ток короткого замыкания 63 кА; давление сжатого воздуха абсолютное (1,5÷2,0 МПа). Применение сжатого воздуха в качестве газовой изоляционной среды позволяет кардинально решить проблему, связанную с экологичностью изоляционной среды в оборудовании.

Основной коммутационный аппарат в распределительных устройствах высокого напряжения — выключатель — используется как самостоятельный элемент и как один из элементов КРУ и КРУЭ.

Гашение дуги в элегазовом выключателе при отключении переменного тока происходит при прохождении кривой тока через нуль. Для успешного отключения зона дуги в межконтактном промежутке должна эффективно охлаждаться, чтобы сопротивление дуги после прохождения кривой тока через нуль стало настолько большим, что выделяющаяся в дуге энергия под действием восстанавливающегося напряжения не смогла вызвать нагрев газа и повторное зажигание дуги вследствие теплового пробоя. Охлаждение дуговой зоны должно оставаться эффективным также после погасания дуги, к моменту достижения восстанавливающимся напряжением максимальных значений. Охлаждение дуги в элегазовых выключателях осуществляется с помощью организации потока газа вдоль дуги. Для создания перепада давления, под действием которого происходит дутье газа, используется энергия приводного механизма — в автокомпрессионном типе выключателя и в основном энергия дуги — в автогенерирующем типе коммутационного аппарата.

Для номинальных токов отключения более 50 кА наибольшее распространение нашел автокомпрессионный тип выключателей благодаря простоте и высокой отключающей способности. В то же время сжатие больших объемов элегаза в компрессионных цилиндрах таких выключателей вызывает необходимость использования приводов с повышенной энергоемкостью, как правило, гидравлических или пружинно-гидравлических.

Для номинальных токов отключения менее 50 кА применяются выключатели с автогенерирующим типом дугогасительного устройства (ДУ). Увеличение давления в компрессионной камере здесь достигается за счет нагрева газа в межконтактном

промежутке и поступления в камеру газообразных продуктов разложения изоляционного материала, формирующего газодинамический тракт промежутка. Небольшие по сравнению с автокомпрессионным масса и размеры ДУ автогенерирующего типа и необходимость в незначительной предварительной компрессии для отключения малых токов позволяют использовать в таких выключателях пружинные приводы, наиболее удобные в эксплуатации.

В настоящее время элегазовые выключатели изготавливаются на напряжения до 500 кВ на единственный разрыв, номинальный ток отключения достигает 80 кА в одноразрывном выключателе на напряжение 220 кВ. Увеличение напряжения и номинального тока отключения на разрыв оказалось возможным благодаря большому числу исследований и оптимизаций электростатического поля, газодинамического тракта межконтактного промежутка, зоны выхлопа дугогасительного устройства, применению новых композиционных материалов для электроизоляционных сопел.

В ВЭИ были разработаны выключатели для КРУЭ на напряжения 110–1150 кВ в пофазном исполнении, с размещением трех фаз в одной оболочке на напряжения 126–220 кВ с токами отключения 31,5; 40; 50 кА и двухразрывный выключатель в пофазной компоновке на напряжение 362 кВ с током отключения 63 кА (для промышленной частоты 60 Гц). Основные параметры разработанных выключателей соответствуют требованиям МЭК и ГОСТ Р52565–2006.

Основой для указанных проектов стал обширный опыт ВЭИ им. В.И. Ленина по разработке элегазовых выключателей высокого напряжения, в том числе широкий комплекс теоретических и экспериментальных исследований, связанных с созданием ДУ на высокие и сверхвысокие напряжения: газовых потоков в ДУ с применением созданных расчетных программ газодинамических процессов, влияния конфигурации электрического поля и распределения плотности изоляционной среды в межконтактном промежутке на электрическую прочность последующего промежутка ДУ, коммутационной износостойкости электродных и изоляционных материалов, электрических характеристик материалов сопел. Были изучены зависимость отключающей способности от характеристик компрессионного устройства, закупорки сопла, взаимовлияния тяговых характеристик привода и компрессионного устройства.

На базе данных расчетных методик для всей разрабатываемой гаммы выключателей были проведены оценки и оптимизация таких основных конструктивных факторов ДУ, как давление газа,

заполняющего аппарат, основные геометрические размеры ДУ, масса подвижных частей, силовые характеристики привода и передаточного механизма, параметры демпфирующего устройства привода.

Достоинствами выключателей с расположением трёх фаз в общей оболочке являются: уменьшение материалоемкости и габаритов, меньшие затраты при производстве, снижение числа уплотнений и увеличение герметичности. Целесообразность такого решения при достигнутой достаточной надежности работы оборудования обусловлена также его эксплуатационными достоинствами: сокращением монтажных площадей, возможностью использования общих для трех фаз приводных механизмов, что значительно облегчает работу обслуживающего персонала (рис. 5).

Отдел вакуумной коммутационной аппаратуры института проводит работы по созданию выключателей с вакуумными дугогасительными камерами (ВДК). Разработана и внедрена в промышленное производство ВДК для двухразрывного выключателя на номинальное напряжение 110 кВ. Создаётся ВДК для одnorазрывного выключателя на этот же класс напряжения с током отключения 40 кА. Успехи в этом направлении могут изменить подходы в отечественном аппаратостроении к разработкам выключателей и КРУ с газовой изоляцией при использовании в них ВДК.

Другими ответственными коммутационными аппаратами в распределительных устройствах являются разъединители и заземлители. В КРУЭ и гибридных КРУ широко используются комбинированные разъединители-заземлители, выполняющие в одном аппарате функции разъединителя и заземлителя.



**Рис. 5.** Дугогасительное устройство выключателя для КРУЭ 126 кВ с номинальным током отключения 40 кА

Комбинированный быстродействующий трехпозиционный разъединитель-заземлитель предназначен для соединения или разъединения двух элементов КРУЭ. Разъединители-заземлители устанавливаются по обе стороны выключателя, чтобы была возможность заземлить оба контакта выключателя. Шинный разъединитель-заземлитель устанавливается между системой сборных шин и выключателем, а линейный — между выключателем и отводящей линией до ввода (рис. 6). Разъединители также обеспечивают в ячейке видимый разрыв, для чего в корпусе предусмотрены смотровые окна.

В процессе разработки и эксплуатации газонаполненных разъединителей выявилось несколько проблем. Одна из них — это пробой при расхождении контактов одной фазы разъединителя на заземленный корпус либо на другую фазу. С ростом номинального напряжения расстояние между контактами разъединителя увеличивалось. Дуга, возникающая при отключении ёмкостных токов, растягивалась на большие расстояния и не могла в полной мере экранироваться системой экранов. Так как движущийся канал разряда представляет собой «острие», т.е. создается резко неоднородное поле в межконтактном промежутке, радиальная составляющая напряженности электрического поля может достигать значений, достаточных для продвижения лидера в сторону заземленного корпуса или другой фазы разъединителя. Эта проблема решается применением специальной экранной системы, что в оборудовании на номинальное напряжение до 220 кВ не вносит существенных изменений общих габаритов. Другая проблема — появление высокочастотных перенапряжений. Такие перенапряжения появляются при повторных пробоях при отключении емкостных токов. В процессе пробоя перенапряжения могут достигать трехкратного увеличения, что может приводить к новым пробоям на



**Рис. 6.** Комбинированный трехпозиционный шинный разъединитель-заземлитель на напряжение 126 кВ в положении «отключено»; внизу хорошо видны три шины, вверху — контакты заземления

больших расстояниях. Высокочастотные перенапряжения наиболее опасны для электромагнитных устройств (в частности электромагнитных измерительных трансформаторов), цепей сигнализации и управления, а также для обслуживающего персонала подстанции, так как потенциалы заземленных частей КРУЭ могут достигать нескольких киловольт. Чтобы избавиться от высокочастотных колебаний, достаточно обеспечить отключение таким образом, чтобы не возникало повторных пробоев в межконтактном промежутке. Это достигается обеспечением превышения электрической прочности межконтактного промежутка на всем участке над восстанавливаемым напряжением между контактами при использовании быстродействующего привода и увеличения скорости отключения подвижного контакта.

На рис. 7 представлен межконтактный промежуток разъединителя-заземлителя на номинальное напряжение 220 кВ в момент размыкания цепи. Тонкой линией показан контакт, входящий в токосъемники. После размыкания цепи через четверть периода скорость контакта составляет не менее 2 м/с, что обеспечивает превышение электрической прочности над восстанавливаемым напряжением на всем межконтактном промежутке.

Отличительная особенность разъединителя-заземлителя – многофункциональность, поэтому использование такого разъединителя позволяет сократить габариты и стоимость КРУЭ в целом. Разъединитель может быть в положении «включено» (пропускается ток), «отключено» (среднее положение) и «заземлено» (заземляется контакт выключателя) – рис. 8.

Для обеспечения возможности автономного испытания кабеля и трансформатора напряжения в составе КРУЭ используются специальные, отделяющие эти элементы, устройства. При приемосдаточных испытаниях КРУЭ испытывается напряжением, составляющим 0,8 номинального испытательного напряжения промышленной частоты. В соответствии с нормативными документами высо-

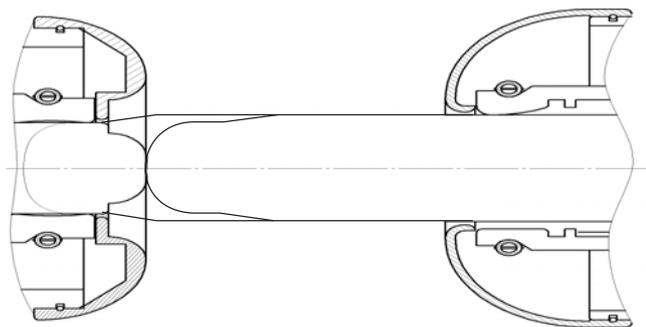


Рис. 7. Схема межконтактного промежутка разъединителя

ковольтные кабели испытываются постоянным напряжением. Такие испытания могут быть опасны для электромагнитных измерительных трансформаторов. Поэтому в них предусмотрен отделитель, позволяющий отключать трансформатор напряжения от ячейки КРУЭ во время испытаний. Также в элементе подсоединения кабеля к ячейке КРУЭ предусмотрен разъединитель для отключения кабеля от ячейки. Такой разъединитель показан на рис. 9.

Удобство монтажа и поддержание стабильности соединений в КРУЭ и токопроводах обеспечивается с помощью сильфонных узлов. Обычно при большой длине шины, чтобы избежать повреждений оборудования вследствие температурных деформаций и погрешностей при монтаже, между отсеками устанавливаются сильфоны. Кроме того, когда КРУЭ напрямую соединено с внешним источником колебаний, для компенсации колебаний также часто устанавливаются сильфоны. Пример конструкции сильфонного узла приведен на рис. 10.

Основным изоляционным элементом в герметичных газонаполненных устройствах высокого напряжения являются изоляторы, которые кроме основной функции – обеспечения необходимой изоляции по отношению к земле и между фазами, служат для секционирования сложной конструкции оборудования. Так, для повышения надёжности и улучшения ремонтпригодности герметичного газонаполненного оборудования принято разделять общий объём, заполненный изоляционным газом, на герметичные отсеки. Изолятор изготавливается из эпоксидного компаунда и содержит токоведущий проводник с системой электростатических экранов. Известны разнообразные формы герметичных изоляторов. В герметичном газонаполненном

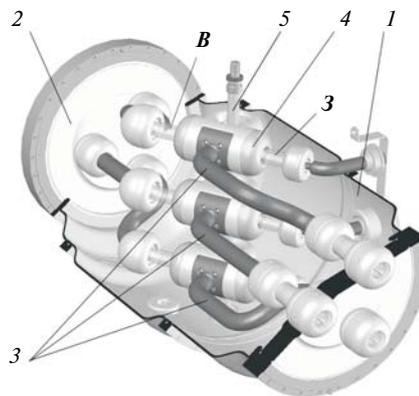


Рис. 8. Модель разъединителя-заземлителя для КРУЭ 220 кВ: 1 – корпус; 2 – герметичный изолятор; 3 – токоведущие части; 4 – корпус подвижного контакта; 5 – изоляционный вал; В – подвижный контакт в положении «включено», З – подвижный контакт в положении «заземлено»

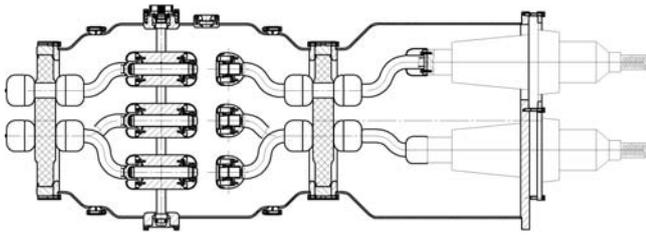


Рис. 9. Элемент подсоединения кабеля к КРУЭ

оборудовании нашли применение плоские изоляторы, а также изоляторы сферической формы. Выбор конкретной формы изолятора определяется при проектировании оборудования и зависит от давления в аппарате, распределения электростатического поля в газовом промежутке и других факторов.

Основные требования, предъявляемые к герметичным изоляторам.

1. *Механические.* Изолятор должен выдерживать давления, предусмотренные нормами МЭК и ГОСТ. Изолятор подвергается таким давлениям в случае разгерметизации одного из отсеков, например при срабатывании мембраны, в случае скачивания элегаза для ремонта оборудования.

2. *Электроизоляционные.* Изолятор выполняет функцию разделения элементов, одни из которых находятся под высоким потенциалом, а другие — под потенциалом, равным нулю. Предъявляются особые требования к диэлектрической проницаемости компаунда, оказывающей влияние на распределение электрического поля в газовом промежутке. Для эпоксидных изоляторов, работающих при постоянном напряжении, предъявляются требования к поверхностной проводимости. Требуется обеспечить отсутствие на поверхности изоляторов



Рис. 11. Герметичный однофазный изолятор КРУЭ 220 кВ (устанавливается на вводе «воздух—элегаз»)

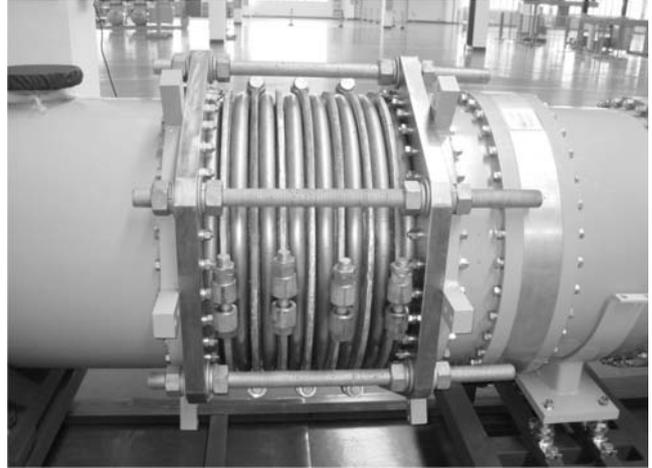


Рис. 10. Фото сильфонного узла для газоизолированной линии на напряжение 550 кВ

раковин, металлических частиц и, особенно, частичных разрядов. Последнее особенно важно, так как возникающие на поверхности диэлектрика частичные разряды могут привести к появлению в газовом промежутке свободных электронов, что приведёт к снижению электрической прочности оборудования. Если в качестве заполняющего газа используется элегаз, то тогда возникшие частичные разряды приведут к появлению химических продуктов разложения элегаза, что также недопустимо. Очевидно, что частичные разряды, возникшие как на поверхности диэлектрика, так и в его теле, разрушают сам диэлектрик, а также являются источником электромагнитного излучения. В связи с тем, что период между ремонтами герметичного газонаполненного оборудования составляет 20 лет, особые требования предъявляются к «кривой жизни» эпоксидной изоляции. Также повышенное внимание уделяется исключению поглощения компаундом влаги при транспортировке и хранении.



Рис. 12. Герметичный трехфазный изолятор КРУЭ 220 кВ на участке сборки разъединителя-заземлителя (в изоляторе закреплены токоведущие элементы)

3. *Климатические.* Изолятор должен выдерживать требуемые стандартами значения температур. Существенное значение может иметь процесс термоциклирования.

Примеры однофазных и трехфазных изоляторов с системой электростатических экранов приведены на рис. 11 и 12.

Для регулирования электростатического поля в герметичном газонаполненном оборудовании применяются металлические электростатические экраны. Наиболее часто применяются тороидальные электростатические экраны. В некоторых случаях применяются экраны эллиптической формы. Применение таких экранов в случае высоконагруженных электростатических конструкций позволяет существенно сократить размеры герметичного газонаполненного оборудования. Известно, что на электрическую прочность такого оборудования существенное влияние оказывают находящиеся на поверхности экранов микронеоднородности. Поэтому к качеству обработки электростатических экранов предъявляются повышенные требования.

Также сильно снижают электрическую прочность герметичного газонаполненного оборудования металлические частицы, попадающие в газовый промежуток при сборке. Поэтому для надёжной работы герметичного газонаполненного оборудования необходимо обеспечить строгий контроль при сборке такого оборудования.

В последнее время всё большее применение находят экраны, покрытые полиэтиленом. Основной проблемой, тормозящей применение таких покрытий, является необходимость обеспечения надёжной адгезии покрытия к металлическому электроду. Значительную проблему представляет поведение покрытия в условиях высоких температур, а также при термоциклировании. Достигнутые в последнее время успехи по улучшению адгезии позволяют применять такие покрытия в герметичном газонаполненном оборудовании высокого и сверхвысокого напряжения. Применение покрытия позволяет существенно уменьшить размеры такого оборудования.

Особой проблемой при проектировании герметичного газонаполненного оборудования является экранирование так называемой тройной точки, в которой соприкасаются металл, диэлектрик и газ. Для этих целей применяются электростатические экраны различной формы, в том числе залитые эпоксидным компаундом. Правильность выбора зазора между эпоксидным изолятором и электростатическим экраном существенно отражается на электрической прочности герметичного газонаполненного оборудования, особенно на длительной электрической прочности. Именно увеличение

длительной электрической прочности при небольшом снижении кратковременной электрической прочности приводит к повышению надёжности и увеличению срока службы герметичного газонаполненного оборудования в целом.

**Выводы.** 1. Высоковольтное газонаполненное оборудование позволяет перейти на качественно новый уровень надёжности, безопасности, энергосбережения, экологичности в сетях передачи и распределения электроэнергии на классы напряжения от 110 до 1150 кВ.

2. Деятельность ВЭИ в области разработки газонаполненного оборудования высокого напряжения за последние годы соответствует мировым тенденциям развития и совершенствования данного вида оборудования. Используя собственный опыт, ВЭИ объединяет в своих разработках уже проверенные временем решения с перспективными нововведениями, которые позволяют оборудованию успешно конкурировать на мировом рынке. Надёжность оборудования, разработанного в ВЭИ, показывают разработки как советского периода, так и российского, созданные совместно с корейскими, индийскими и китайскими партнерами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Report** on the second international survey on high voltage gas insulated substation (GIS) service experience. – CIGRE Technical brochure 150, 2000.
2. **Вишневский Ю.И., Тарасов В.К., Борин В.Н., Чемерис В.С.** Комплексные распределительные устройства с элегазовой изоляцией на напряжения 110–1150 кВ (состояние и перспективы). – *Электротехника*, 1982, №6.
3. **Быковец Ю.Я., Егоров В.Г., Серяков К.И. и др.** Элегазовые коммутационные аппараты номинального напряжения 10 кВ для ячеек КРУ и КСО. – *Электротехника*, 2006, №9.
4. **Акулов А.С., Борин В.Н., Быковец Ю.Я. и др.** Российско-китайское сотрудничество в создании современной конструкции комплектного распределительного устройства с элегазовой изоляцией на напряжение 126 кВ. – Сборник научных трудов к 85-летию ВЭИ. – М., 2006.
5. **Борин В.Н., Быковец Ю.Я., Герасимов В.П. и др.** Российско-китайские разработки высоковольтного оборудования с газовой изоляцией на номинальное напряжение 110–500 кВ. – Сборник докладов V Международ. конф. «ТРАВЭК» «Высоковольтное коммутационное оборудование». – М., 2009.

*Авторы: Зеткин Михаил Владимирович окончил электроэнергетический факультет МЭИ (ТУ) в 2002 г. Младший научный сотрудник ФГУП ВЭИ.*

*Иванов Александр Николаевич окончил энергетический факультет МГАУ им. В.П. Горячкина в 2007 г. Инженер первой категории ФГУП ВЭИ.*

*Иванов Андрей Сергеевич окончил Институт электроэнергетики МЭИ (ТУ) в 2007 г. Инженер первой категории ФГУП ВЭИ.*

*Камалов Ринат Султанович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1977 г. Старший научный сотрудник ФГУП ВЭИ.*

*Парфенов Дмитрий Евгеньевич* окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Инженер-конструктор первой категории ФГУП ВЭИ.

*Рахматулин Асхат Вагизович* окончил электромеханический факультет МЭИ в 1974 г. Зам. начальника отдела ФГУП ВЭИ.

*Чемерис Владлен Семенович* окончил электромеханический факультет МЭИ в 1953 г. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию «Коммутационная износостойкость элементов дугогасительных устройств автокомпрессионных элегазовых выключателей». Начальник отдела ФГУП ВЭИ.