

В.В. АФОНИН, К.А. НАБАТОВ

**ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ

УДК 629.4.082.3
ББК 3264я 73-5
А44

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор ТВВАИУ
В.В. Алексеев,

Доктор технических наук, профессор ТГТУ
Ю.Ю. Громов

Афонин, В.В.

А44 Элегазовые выключатели распределительных устройств высокого напряжения: учебное пособие / В.В. Афонин, К.А. Набатов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 96 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0797-1.

Приводятся основные характеристики и свойства элегаза, номенклатура и основные технические параметры элегазовых выключателей отечественного и зарубежного производства.

Предназначено для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» при изучении дисциплины «Электрические аппараты».

УДК 629.4.082.3

ББК 3264я 73-5

ISBN 978-5-8265-0797-1

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» (ТГТУ), 2009

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

В.В. АФОНИН, К.А. НАБАТОВ

**ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Утверждено Учёным советом университета
в качестве учебного пособия
для студентов специальности 140211 «Электроснабжение»
дневной и заочной форм обучения



Тамбов
Издательство ТГТУ
2009

Учебное издание

АФОНИН Владимир Васильевич,
НАБАТОВ Константин Александрович

**ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова
Инженер по компьютерному макетированию М.А. Филатова

Подписано в печать 27.03.2009.
Формат 60 × 84/16. 5,58 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 126.

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

Высокую надёжность работы всех отраслей народного хозяйства страны обеспечивает современное электротехническое оборудование.

Особую роль в этом играют изделия и оборудование, установленные в системах питания и электроснабжения, причём как в сетях низкого, так и высокого напряжения.

В настоящее время остро стоит задача технического перевооружения парка электротехнического оборудования. Для решения этой задачи необходимо владеть информацией о современном его состоянии, новых типах, технических характеристиках, зарубежных аналогах, продлении срока службы или возможной их замене.

Данное пособие содержит подробную информацию о технических характеристиках, принципах действия, области применения элегазового коммутационного электрооборудования, теоретическое обоснование его работы, а также данные о физических и химических свойствах элегаза. Это позволит будущим специалистам-энергетикам в их работе реально определить состояние оборудования и существенно повысить электробезопасность, надёжность, безаварийность и экономичность электроснабжения.

1. ОТКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Большая группа электрических аппаратов представлена коммутационными устройствами, с помощью которых замыкается и размыкается электрическая цепь.

Качество коммутации электрической цепи определяется временем и глубиной коммутации, коммутационными перенапряжениями, а для контактных аппаратов с возникающей в них дугой или искрой, кроме того, объёмом ионизированных газов, электрическим износом контактов, звуковыми и световыми эффектами при гашении дуги и т.д.

Обычно стремятся к тому, чтобы время коммутации электрической цепи аппаратами было минимальным. У контактных аппаратов оно составляет $0,01 \dots 0,1$ с.

Под глубиной коммутации понимают отношение электрического сопротивления $R_{\text{отк}}$ коммутирующего органа в отключенном состоянии к его сопротивлению $R_{\text{вкл}}$ во включенном состоянии:

$$h_{\text{ком}} = R_{\text{отк}} / R_{\text{вкл}} . \quad (1.1)$$

Так, у контактных аппаратах $h_{\text{ком}} \approx 10^{12} \dots 10^{14}$, а у бесконтактных – $h_{\text{ком}} \approx 10^4 \dots 10^7$.

Для контактных аппаратов наиболее трудной и определяющей является стадия отключения. Это связано с тем, что электрический разряд, возникающий при замыкании контактов, приводит к их износу и в значительной степени определяет надёжность и долговечность аппарата. Этот разряд в окружающем контакт газе является либо тлеющим разрядом, либо электрической дугой. Тлеющий разряд возникает при отключении тока менее $0,1$ А при напряжении на контактах $250 \dots 300$ В. Такой разряд происходит на контактах маломощных реле, а в более мощных аппаратах является переходной фазой к разряду в виде электрической дуги.

1.1. Минимальные значения напряжения и тока, необходимые для поддержания дугового разряда

Материал контактов	U_0 , В	J_0 , А	Материал контактов	U_0 , В	J_0 , А
Платина	17,0	0,90	Вольфрам	17,0	0,90
Золото	15,0	0,38	Медь	12,3	0,43
Серебро	12,0	0,40	Уголь	18...22	0,03

Если ток и напряжение в цепи выше значений, указанных в табл. 1.1, то имеет место дуговой разряд, обладающий следующими особенностями:

- 1) дуговой разряд имеет место только при относительно больших токах; минимальный ток дуги для различных материалов приведен в табл. 1.1 и для металлов составляет примерно 0,5 А;
- 2) температура центральной части дуги очень велика и может достигать 6000...25000 К;
- 3) при дуговом разряде плотность тока на катоде чрезвычайно велика и достигает 102...103 А/мм²;
- 4) падение напряжения у катода составляет всего 10...20 В и практически не зависит от тока.

1.2. ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Из курса физики известны разновидности электрических разрядов в газах.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) газового разряда, т.е. зависимость напряжения на дуге от протекающего через неё тока i на разных стадиях разряда в газах [1] показана на рис. 1.1.

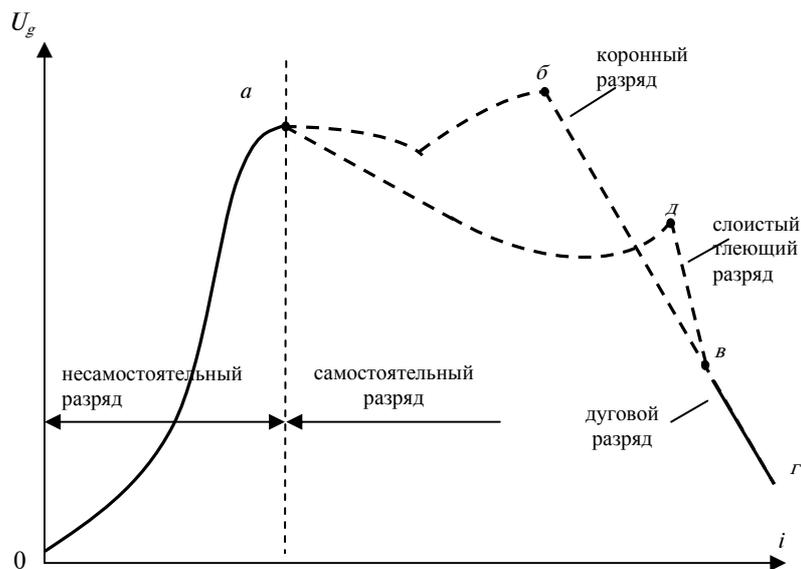


Рис. 1.1. ВАХ газового разряда

Участок $0a$ ВАХ относится к области несамостоятельного заряда, когда промежуток между электродами ионизируется за счёт внешнего источника.

При больших напряжениях несамостоятельный разряд переходит в самостоятельный, который может продолжаться и при устранении внешнего ионизатора. Течение самостоятельного газового разряда зависит от свойств газовой среды, формы и материала электродов, характера электрического поля между электродами.

Самостоятельный разряд переходит в дуговой (участок vg) через коронный (участок abv) или через слоистый тлеющий разряд (участок adv). Возможен и непосредственный переход несамостоятельных зарядов в дуговой.

В дуге одновременно происходят два процесса: образование заряженных частиц газа — ионов и свободных электронов — процесс ионизации и исчезновение заряженных частиц — процесс деионизации.

1.3. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОТКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Отключение нагруженной электрической цепи сопровождается появлением электрической дуги между контактами отключающего аппарата. Дуга должна быть возможно быстрее погашена, что особенно важно при отключении токов короткого замыкания.

При отключении электрической цепи постоянного тока отключающий аппарат должен принудительно уменьшить ток в цепи до нуля. Последнее в цепи с индуктивностью приводит к появлению перенапряжения, значение которого тем больше, чем быстрее ток спадает до нуля и чем больше индуктивность отключаемой цепи. Выключатель постоянного тока должен быть рассчитан на поглощение значительной энергии, которая выделяется в нём в период гашения дуги. Все это сильно осложняет отключение цепей постоянного тока.

Выключение электрических цепей переменного тока облегчается тем, что ток периодически проходит через нуль и дуга в этот момент гаснет. Поэтому отключающий аппарат переменного тока должен лишь предотвратить повторное зажигание дуги после её собственного угасания при прохождении тока через нуль.

При малых токах (до единиц А) и напряжениях источника питания меньше напряжения пробоя межконтактного промежутка или при небольших напряжениях (не выше 10...20 В) и любых токах отключение цепи не сопровождается образованием дуги на электрических контактах.

В процессе отключения цепи межконтактный промежуток отключающего аппарата превращается из проводника электрического тока в диэлектрик: когда электрические контакты замкнуты и по ним проходит ток, сопротивление их мало, а электрическая прочность промежутка равна нулю. Когда аппарат погасит возникшую дугу на его контактах, и остаточный столб ионизированных газов рассеется, электрическое сопротивление образовавшегося изоляционного слоя станет практически равным бесконечности. Электрическая прочность промежутка станет равной пробивному напряжению $U_{ПРБ}$ образовавшегося изоляционного слоя.

В процессе отключения электрической цепи электрическая прочность промежутка, называемая восстанавливающейся прочностью, нарастает практически от нуля до напряжения электрической прочности межконтактного промежутка. Восстанавливающаяся прочность межконтактного промежутка обозначается $U_{ВП}$.

Одновременно в процессе отключения растёт (восстанавливается) напряжение на электрических контактах – от падения на замкнутых контактах (мВ) до напряжения источника питания. Это напряжение обозначают U_B .

Отключение электрической цепи протекает в соревновании процессов восстановления электрической плотности промежутка ($U_{ВП}$) и напряжения на нем (U_B).

Электрическая цепь отключается успешно, если кривая восстанавливающейся прочности межконтактного промежутка аппарата будет лежать выше кривой восстанавливающегося напряжения на нём.

1.4. ОПИСАНИЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ ИНДУКТИВНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотрим однофазную (однопроводную) цепь (рис. 1.2), подлежащую отключению однополюсным выключателем при коротком замыкании.

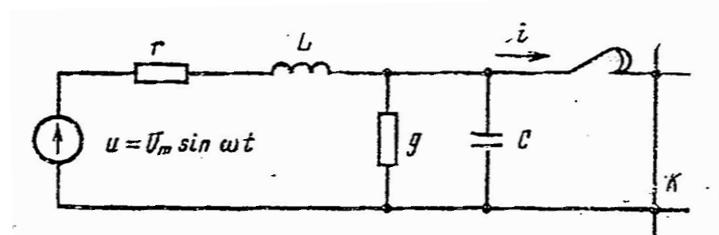


Рис. 1.2. Схема однопроводной цепи, подлежащей отключению при коротком замыкании

Напряжение источника энергии u изменяется синусоидально с угловой частотой ω . Через L и r обозначены результирующая индуктивность и результирующее активное сопротивление цепи, через C – результирующая ёмкость, включенная параллельно выключателю (ёмкость сборных шин, линий, вводов выключателей и др.). Эта ёмкость может быть относительно мала, однако она существенно влияет на процесс отключения. Сопротивление $1/g$, включенное параллельно выключателю (на рис. 1.2 показана проводимость g), имитирует волновое сопротивление длинных линий, присоединённых к сборным шинам станции, а также шунтирующий резистор, искусственно вводимый в конструкцию выключателя [2].

При размыкании контактов выключателя цепь тока не прерывается, так как образовавшийся промежуток перекрывается дугой, сопротивление которой относительно мало. По мере приближения тока к нулю температура, ионизация и проводимость дугового промежутка быстро уменьшаются и в какой-то момент времени, близкий к моменту естественного прихода тока к нулю, угасает (рис. 1.3, *а*). В этот момент промежуток между расходящимися контактами ещё в некоторой степени ионизирован вследствие отставания тепловых процессов в дуговом промежутке от изменения тока. После погасания дуги процесс деионизации дугового промежутка и превращения его из проводника в диэлектрик протекает исключительно быстро, но не мгновенно. Одновременно происходит процесс восстановления напряжения на контактах выключателя. Пока дуга горит, напряжение на разрыве u_d относительно мало. В момент погасания дуги напряжение меняет знак и восстанавливается до напряжения сети, близкого к амплитудному значению. Этот процесс определяется постоянными L , C , r , g цепи. Если отношения r/L и g/C малы, процесс восстановления напряжения протекает колебательно. Если восстанавливающаяся электрическая прочность (пробивное напряжение) промежутка (абсолютное значение) все время превышает восстанавливаемое напряжение на полюсе (рис. 1.3, *а*), дуга не возникает вновь и процесс отключения цепи на этом закончится. В противном случае (рис. 1.3, *б*) произойдёт новое зажигание дуги.

Через половину периода ток опять достигнет нуля, и описанный процесс повторится, но при более благоприятных условиях, поскольку расстояние между контактами увеличится. Обычно дуга в выключателях горит в течение 1 – 3 полупериодов, в зависимости от конструкции выключателя и характеристик сети.

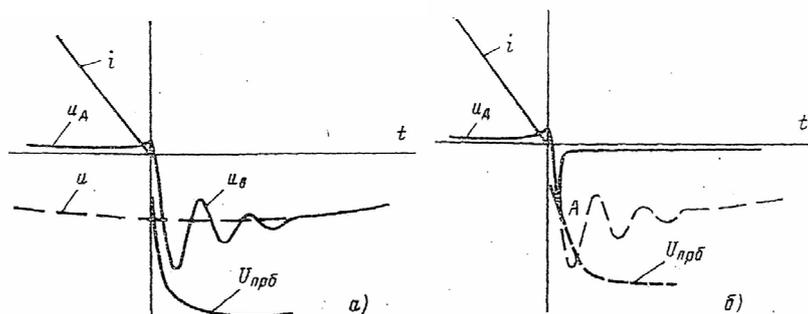


Рис. 1.3. Осциллограммы тока и напряжений при отключении короткозамкнутой цепи:

а – успешное отключение; *б* – повторное зажигание дуги

Состояние ионизированного промежутка в любой момент времени (состояние в смысле способности промежутка проводить электрический ток или способности противостоять приложенному напряжению) принято характеризовать условным понятием пробивного напряжения $U_{прб}$, понимая под этим термином напряжение, при котором образование новых ионов в единицу времени соответствует потере их в течение этого же времени. Понятие пробивного напряжения в указанном смысле приложимо в равной мере и к ионизированному промежутку, находящемуся в состоянии, близком к проводнику, и к промежутку, находящемуся в состоянии, близком к диэлектрику. Если пробивное напряжение промежутка увеличивается, это означает, что процесс деионизации преобладает над процессом ионизации и промежуток превращается из проводника в диэлектрик. Если напряжение, приложенное к промежутку, превышает пробивное напряжение, преобладает процесс ионизации, следовательно, произойдёт новое зажигание дуги. Для успешного отключения цепи необходимо, чтобы пробивное напряжение промежутка увеличивалось возможно быстрее. Для этого выключатели снабжают гасительными устройствами, обеспечивающими эффективную деионизацию дугового столба.

Приведённое описание условий гашения дуги и отключения цепи переменного тока, представленное как своеобразное «соревнование» процесса восстановления электрической прочности промежутка и процесса восстановления напряжения на контактах выключателя, весьма приближённо. Так представляли себе процесс отключения до изобретения катодного осциллографа, позволившего позднее более детально изучить процессы в дуговом промежутке и в электрической цепи. Существенно важным в приведенном описании является то, что отключение цепи происходит через дугу, которая угасает вблизи момента естественного прихода тока к нулю, независимо от свойств выключателя. Функция последнего заключается не столько в том, чтобы «погасить» дугу, а скорее в том, чтобы предотвратить повторное её зажигание путём быстрой деионизации дугового промежутка. При этом используется исключительное свойство газового промежутка – быстро (в течение нескольких микросекунд) превращаться из проводника в диэлектрик.

Горение дуги связано с выделением значительной энергии. Происходит оплавление контактов, давление в гасительных камерах повышается, возникают механические напряжения в стенках камеры и в баке. «Тяжесть» процесса отключения в значительной мере определяется выделяющейся энергией и разрушительным действием дуги. Для уменьшения последнего стремятся по возможности сокращать время горения дуги.

Наряду с вредными последствиями дуги следует отметить её полезную функцию, заключающуюся в том, что она синхронизирует момент разрыва цепи с моментом естественного прихода тока к нулю – независимо от момента размыкания контактов выключателя. В связи с этим отсутствуют опасные перенапряжения, которые неизбежно имели бы место (если бы дуга не возникала) вследствие внезапного обрыва тока при размыкании контактов.

Для понимания работы выключателей переменного тока важно существенно изучить характеристики дугового разряда.

1.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Электрической дугой, точнее, дуговым разрядом называют самостоятельный разряд в газе, т.е. разряд, протекающий без внешнего ионизатора, характеризующийся высокой температурой столба дуги, большой плотностью тока и относительно небольшим падением напряжения у катода. Ниже рассмотрена только дуга высокого давления, т.е. дуговой разряд при атмосферном и более высоком давлении. Вакуумные выключатели являются исключением и рассмотрены особо.

Различают следующие области дугового разряда, а именно: 1) область катодного падения напряжения; 2) область у анода; 3) столб дуги.

Область катодного падения напряжения представляет собой тонкий слой газа у поверхности катода. Падение напряжения в этом слое составляет 10...20 В, а напряжённость электрического поля достигает $10^5 \dots 10^6$ В/см. Энергия, подводимая из сети к этой области, используется на выделение электронов с поверхности катода. Механизм освобождения электронов может быть двояким, а именно: а) термоэлектронная эмиссия при тугоплавких электродах (например, уголь, вольфрам), температура которых может достигнуть необходимого значения 6000 К и выше, или б) автоэлектронная эмиссия, т.е. вырывание электронов из катода под действием сильного электрического поля при «холодном» катоде. Освобождающиеся электроны движутся через дуговой столб к аноду. В зоне анода образуется отрицательный объёмный заряд вследствие недостатка положительных ионов. Падение напряжения в этой зоне составляет несколько вольт. Оно зависит от материала и температуры анода.

Процессы в дуговом столбе вызывают наибольший интерес при изучении выключателей, поскольку для гашения дуги используют различные виды воздействия именно на дуговой столб. Последний представляет собой плазму, т.е. ионизированный газ с очень высокой температурой (до 20 000 К) и одинаковым содержанием электронов и положительных ионов в единице объёма. Электроны и ионы участвуют в тепловом хаотическом движении нейтральных молекул и атомов, но имеют также направленное движение в электрическом поле вдоль оси дуги, определяемое знаком заряда частиц. Этому движению препятствует нейтральный газ. Происходят частые соударения электронов и ионов с нейтральными частицами. Поскольку длина свободного пробега электронов при высоком давлении мала, потеря энергии при их упругих столкновениях с молекулами и атомами, приходящаяся на каждое столкновение, мала и недостаточна для ионизации частиц. Однако число столкновений, претерпеваемых электронами, весьма велико. В результате энергия электронов передаётся нейтральному газу в виде тепла.

Особенность дугового разряда при высоком давлении газа заключается в том, что дополнительная энергия, которую приобретают электроны и ионы в своём направленном движении вдоль оси дугового столба, очень мала по сравнению с тепловой энергией газа, так как градиент напряжения и длина свободного пробега малы. Поэтому средняя энергия «электронного газа» не может сколько-нибудь заметно превысить среднюю энергию нейтрального газа. Следовательно, ионы, электроны, а также нейтральные атомы и молекулы находятся в тепловом равновесии. В этом заключается основное отличие дугового разряда при высоком давлении от разряда при низком давлении. В последнем случае температура нейтрального газа не превышает нескольких сотен градусов, в то время как температура электронного газа достигает десятков тысяч градусов.

Поскольку при высоком давлении газа атомы и молекулы подавляющим образом преобладают над электронами и имеют почти ту же высокую температуру, большая часть возбуждённых и ионизированных атомов и молекул получается при соударениях между нейтральными частицами, а не при столкновениях с электронами. Таким образом, электроны ионизируют не непосредственно при соударениях с нейтральными частицами (как это происходит в вакууме), а косвенно, повышая температуру газа в дуговом столбе. Такой механизм ионизации называют термической ионизацией. При этом удельная ионизация дугового столба полностью определяется температурой и при изменении одной из этих величин неизбежно меняется и другая. Источником энергии, необходимой для термической ионизации, является электрическое поле.

В дуговом столбе имеются потери энергии, которые в установившемся состоянии уравниваются энергией, получаемой из сети. Основная часть энергии уносится из дугового столба возбуждёнными и ионизированными атомами и молекулами. Вследствие разности концентраций заряженных частиц в дуговом столбе и окружающем пространстве, а также разности температур ионы диффундируют к поверхности дугового столба, где происходит их нейтрализация. Эти потери должны восполняться образованием новых ионов и электронов, т.е. ионизацией газа, связанной с затратой энергии. В установившемся состоянии градиент напряжения в столбе дуги всегда таков, что имеющая место ионизация компенсирует потери электронов через рекомбинацию. Градиент напряжения зависит от свойств газа, состояния, в котором он находится (спокойное, турбулентное), а также от давления и тока. При повышении давления газа градиент напряжения увеличивается вследствие уменьшения свободного пробега электронов. С увеличением тока градиент напряжения уменьшается, что объясняется увеличением площади сечения и температуры дугового столба. Дуговой столб стремится принять такое сечение, чтобы в рассматриваемых условиях потери энергии были минимальны.

Вольт-амперные характеристики дуги. Зависимость напряжения дуги от тока при очень медленном изменении последнего представляет собой статическую характеристику дуги (рис. 1.4). В установившемся состоянии каждой точке характеристики соответствуют некоторое сечение и температура дугового столба. При изменении тока дуговой столб должен изменить своё сечение и температуру применительно к новым условиям. Эти процессы требуют времени, и поэтому новое установившееся состояние наступает не сразу, а с некоторым запаздыванием. Это явление называют гистерезисом.

Допустим, что ток внезапно уменьшился от значения i_1 (точка 1) до значения i_2 . В первый момент дуга сохранит своё сечение и температуру, а градиент уменьшится (точка 2'). Подводимая мощность будет меньше необходимой для проведения тока i_2 . После этого сечение и температура дугового столба начнут уменьшаться, а градиент напряжения увеличиваться, пока не наступит новое установившееся состояние в точке 2, лежащей на статической характеристике. При внезапном увеличении тока от значения i_1 до значения i_3 градиент напряжения увеличится (точка 3'). Подводимая к дуге мощность будет больше необходимой для проведения тока i_3 . После этого сечение и температура столба начнут увеличиваться, а градиент напряжения уменьшаться, пока не наступит новое установившееся состояние в точке 3, лежащей на статической характеристике.

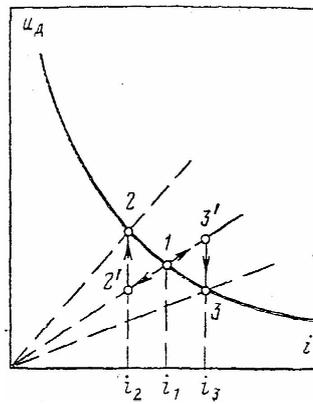


Рис. 1.4. Примерный вид статической характеристики дуги

При плавном изменении тока с некоторой скоростью напряжение не успевает следовать за изменением тока в соответствии со статической характеристикой. При увеличении тока напряжение превышает значения, определяемые статической характеристикой, а при уменьшении тока напряжение меньше этих значений. Кривые $u_d = f(i)$ при изменении тока с некоторой скоростью представляют собой динамические характеристики дуги (рис. 1.5, сплошные линии). Положение этих характеристик по отношению к статической характеристике (см. пунктирную кривую) зависит от скорости изменения тока: чем медленнее происходит изменение тока, тем ближе расположена динамическая характеристика к статической. В рассматриваемых условиях дугового разряда может быть только одна статическая характеристика. Число динамических характеристик неограниченно.

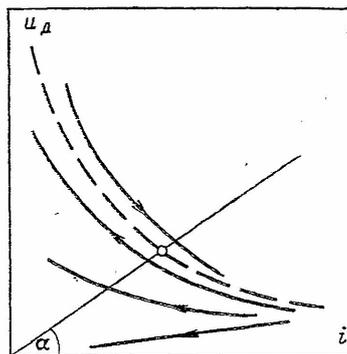


Рис. 1.5. Примерный вид динамических характеристик дуги

При анализе электрических цепей принято оперировать сопротивлениями. Поэтому говорят и о сопротивлении дуги, понимая под этим отношение напряжения у электродов к току. Сопротивление дуги непостоянно. Оно зависит от тока и многих других факторов. В установившемся состоянии сопротивление дуги может быть определено с помощью статической характеристики как тангенс угла наклона секущей, проведённой из начала координат в рассматриваемую точку характеристики (рис. 1.5). По мере увеличения тока сопротивление дуги уменьшается.

При переменном токе самостоятельный дуговой разряд чередуется с несамостоятельным разрядом. Соответствующие динамические характеристики дуги приведены на рис. 1.6, а.

Пунктирными линиями показаны статические характеристики. Дуга зажигается в точках 1 и 3, а угасает в точках 2 и 4. В течение четверти периода, когда ток увеличивается, кривая напряжения лежит выше статической характеристики вследствие отставания тепловых процессов от изменения тока. Скорость образования ионов превышает скорость их исчезновения. Следующую четверть периода, когда ток уменьшается, кривая напряжения лежит ниже статической характеристики. Скорость образования ионов меньше скорости их исчезновения. Разряд частично поддерживается энергией, полученной ранее. Области 2-3 и 4-1 соответствуют несамостоятельному разряду, при котором с увеличением тока напряжение увеличивается.

Изменение напряжения дуги во времени показано на рис. 1.6, б. Участки кривой 2–3 и 4–5 соответствуют процессу восстановления напряжения на полюсе выключателя. Этот процесс определяется не только параметрами цепи, но также остаточной проводимостью промежутка.

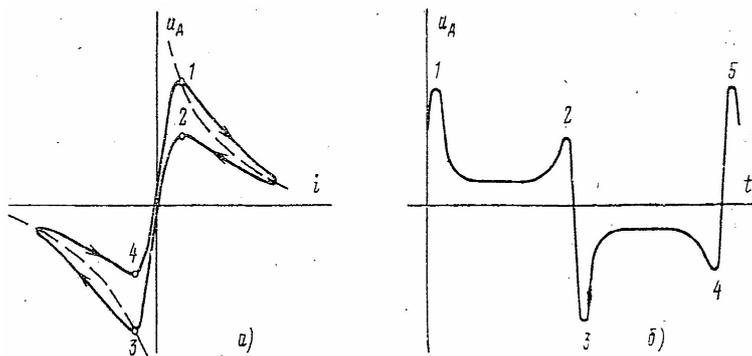


Рис. 1.6. Напряжение дуги при переменном токе:

a – напряжение дуги как функция тока; *б* – напряжение дуги как функция времени

Динамика тепловых (энергетических) процессов в дуговом столбе при изменении тока может быть охарактеризована отношением $\tau = Q/P$, получившим название постоянной времени дугового столба. Здесь Q – теплосодержание дугового столба, Вт·с; P – теплоотдача в окружающую среду, Вт. Обе величины отнесены к единице длины дугового столба. Постоянная времени дуги изменяется в широких пределах в зависимости от условий. В масляных и воздушных выключателях постоянная времени дуги составляет всего 1...2 мкс. Отсюда можно заключить о скорости процесса деионизации и о времени, необходимом для превращения дугового промежутка выключателя из проводника в диэлектрик.

Процессы в дуговом промежутке и в электрической цепи вблизи момента погасания дуги. Исследования процесса отключения с помощью катодного осциллографа позволили уточнить и лучше понять описанный в пункте 1.4 в общих чертах процесс отключения.

Существенное влияние на значение тока и скорость его изменения в самом конце полупериода, а также на процесс угасания дуги оказывают ёмкость и сопротивление, включённые параллельно дуговому промежутку (см. рис. 1.7).

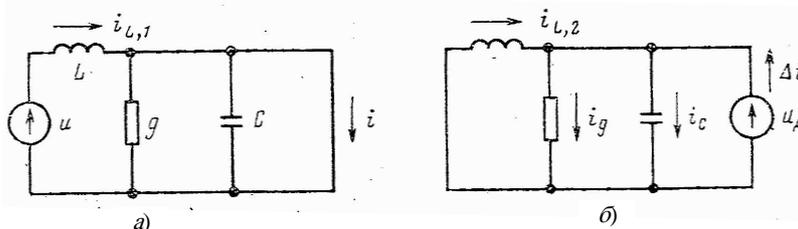


Рис. 1.7. Схемы, поясняющие применение метода наложения к явлению вытеснения тока из дугового промежутка в параллельные ветви

При подходе тока к нулю напряжение на дуговом промежутке увеличивается в соответствии с вольт-амперной характеристикой. При этом значительная часть тока i , проходившего через выключатель до размыкания контактов, вытесняется из дугового промежутка в параллельные ветви C и g . Ток i_L в индуктивности также уменьшается против первоначального i . Ток i_b в дуговом промежутке выключателя после размыкания контактов может быть определён методом наложения, если известно напряжение дуги как функция времени. Он может быть представлен состоящим из двух составляющих, а именно тока $i = I_m \sin \omega t$, вызванного напряжением источника энергии при замкнутом дуговом промежутке (рис. 1.7, а), и тока Δi , вызванного напряжением дуги с обратным знаком $-u_d(t)$, введённым в цепь при замкнутом источнике энергии (рис. 1.7, б):

$$i_b = i - \Delta i = I_m \sin \omega t - \frac{1}{L} \int u_d dt - C \frac{du_d}{dt} - u_d g. \quad (1.2)$$

Здесь сумма первых двух членов представляет ток i_L в индуктивности, третий член – ток i_C в ёмкости и четвёртый член – ток i_g , обусловленный проводимостью.

Ниже в качестве примеров рассмотрены осциллограммы токов и напряжений вблизи момента погасания дуги, построенные в соответствии с выражением (1.2). При этом для простоты исключена ветвь с проводимостью g . В качестве первого примера (рис. 1.2) выбран случай отключения относительно небольшого тока. Как видно из рисунка, ток $i = I_m \sin \omega t$ при подходе к нулю изменяется линейно; $(di/dt)_{t=0} = I_m 2\pi f$. Скорость снижения тока определяется только его амплитудой и частотой. Ток i_b в дуговом промежутке выключателя меньше тока i , так как часть тока вытесняется в параллельные ветви.

Он приходит к нулю несколько раньше тока i (точка 1). Скорость снижения тока в дуговом промежутке в последние несколько микросекунд значительно меньше скорости изменения тока i . Эти последние микросекунды (слева от точки 1) представляют собой весьма малый интервал времени. Однако он в несколько раз превышает постоянную времени дугового столба и поэтому заметно влияет на состояние дугового промежутка в момент, когда ток приходит к нулю, и на процесс восстановления электрической прочности (пробивного напряжения) промежутка. В рассмотренном примере дуга угасает легко, так как производная di_b/dt и, следовательно, удельная ионизация промежутка в точке 1 малы. Электрическая прочность промежутка быстро увеличивается. Процесс восстановления напряжения начинается в точке 1. Напряжение достигает максимума в точке 2 через половину периода частоты свободных колебаний.

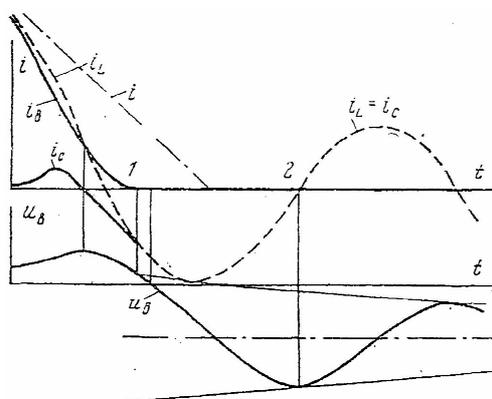


Рис. 1.8. Осциллограммы, поясняющие процесс отключения относительно небольшого тока короткого замыкания

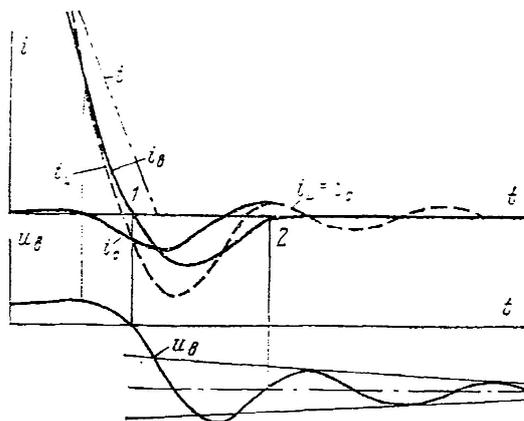


Рис. 1.9. Осциллограммы, поясняющие процесс отключения большого тока короткого замыкания (после погасания дуги появляется небольшой ток остаточной проводимости)

Осциллограммы на рис 1.9 поясняют процесс отключения большого тока, спадающего к нулю значительно быстрее, чем в предыдущем примере. Когда ток в дуговом промежутке приходит к нулю (точка 1) и дуга угасает, температура и, следовательно, ионизация промежутка не успевают снизиться до некоторого критического значения, зависящего от свойств газа и давления, вследствие чего промежуток не теряет своей проводимости. Восстанавливающееся напряжение вызывает небольшой ток в обратном направлении, сопровождающийся выделением энергии. Это задерживает деионизацию или даже способствует её увеличению и новому зажиганию дуги. Произойдёт это или нет – зависит от подводимой энергии, равной интегралу произведения тока и напряжения на рассматриваемом промежутке времени. Если эта энергия меньше потерь, вызванных теплопроводностью и конвекцией, ток остаточной проводимости быстро затухнет (точка 2) и процесс отключения закончится успешно. В противном случае произойдёт новое зажигание дуги, и ток в цепи восстановится ещё на половину периода. Такое зажигание (если оно произойдёт) имеет чисто термический характер. Искровой пробой здесь невозможен, поскольку промежуток не потерял своей проводимости и не приобрёл электрической прочности. Таким образом, процесс гашения дуги правильнее рассматривать не как «соревнование напряжений» (мгновенных значений пробивного напряжения промежутка и восстанавливающегося напряжения на полюсах), а как «соревнование энергий» (подведённой к промежутку из сети и потерянной), являющихся интегральными функциями времени.

Из изложенного могут быть сделаны следующие выводы. Процесс гашения дуги в выключателе переменного тока является процессом деионизации дугового промежутка, который протекает весьма быстро, но не мгновенно. Наиболее существенная часть этого процесса начинается раньше момента естественного прихода 50-периодного тока к нулю и заканчивается в течение нескольких десятков микросекунд после этого момента. В зависимости от отключаемого тока и эффективности гасительного устройства выключателя промежуток между контактами может потерять свою проводимость после погасания дуги или сохранить часть своей проводимости. В последнем случае восстанавливающееся напряжение вызывает небольшой ток в обратном направлении. При эффективной деионизации этот ток быстро затухнет и процесс отключения заканчивается. При неблагоприятных условиях ток достаточной проводимости увеличивается, и дуга образуется вновь. Основными факторами, определяющими процесс деионизации промежутка, являются отключаемый ток, скорость восстанавливающегося напряжения и свойства гасительного устройства выключателя.

1.6. ДУГОГАСИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ГАЗОВОГО ДУТЬЯ

Для облегчения и ускорения гашения дуги переменного тока необходимо, чтобы скорость восстановления электрической прочности дугового промежутка после естественного прохождения тока через нуль была возможно больше.

В отключающих аппаратах, предназначенных для отключения электрических цепей под током (выключатели, плавкие предохранители и т.д.), такая скорость достигается с помощью дугогасительных устройств (ДУ), искусственно усиливающих деионизацию дугового промежутка.

Одним из способов гашения дуги, применяемых в ДУ, является гашение дуги с помощью газового дутья.

ДУ газового дутья могут быть выполнены с автодутьем (газогенерирующие) и с принудительным внешним дутьём (импульсные). В первых газы, необходимые для создания газового дутья, образуются за счёт энергии самой дуги. Разрыв цепи осуществляется в газогенерирующей среде.

Газогенерирующей средой обычно является минеральное масло или какие-либо твёрдые газогенерирующие материалы – органическое стекло, фибра и другие, из которых выполняются детали, соприкасающиеся с дугой.

Под действием высокой температуры дуги, возникшей на разрыве, газогенерирующая среда выделяет газы, которые и создают поток, воздействующий на дугу. Чем больше отключаемый ток, тем больше энергия дуги, интенсивнее газообразование и воздействие среды на дугу.

Таким образом, интенсивность газового автодутья зависит от величины отключаемого тока.

ДУ этого типа нашли применение в масляных и автогазовых выключателях, трубчатых плавких предохранителях и т.д.

В ДУ с принудительным внешним дутьем энергия, необходимая для образования газового дутья, обеспечивается внешним источником. Дуга подвергается воздействию струи сжатого газа, подаваемого извне в межконтактный промежуток, и поэтому интенсивность воздействия газовой струи (дутья) на дугу не зависит от значения отключаемого тока.

ДУ с внешним дутьем широко применяют в воздушных выключателях, где для гашения дуги используется струя сжатого воздуха.

Рассмотрим кратко механизм газового дутья. При больших скоростях газа, воздействующего на дугу, имеет место беспорядочное вихреобразное (турбулентное) движение частиц газа, турбулентность газовой среды повышает эффективность гашения дуги. Если в ламинарном газовом потоке структура дуги однородна при одинаковой и очень высокой плотности носителей заряда по сечению столба дуги, то в турбулентном газовом потоке дуговой столб размывается, расщепляется на ряд проводящих каналов и нитей, концентрация носителей заряда по сечению дугового столба становится различной. Последнее объясняется тем, что частицы газа турбулентного потока, обладающие большими скоростями, направленными в толщу дугового столба, расталкивают ионизированные частицы и перемешиваются с ними.

В момент прохождения тока через нуль, когда интенсивность ионизации резко падает, концентрация ионов в дуговом промежутке быстро выравнивается, что ведёт к усилению рекомбинации ионов, и, следовательно, к увеличению скорости деионизации. В результате электрическая прочность межконтактного промежутка быстро возрастает, а структура его становится однородной, но при значительно меньшей плотности носителей заряда.

Одним из способов дальнейшего увеличения номинальных напряжений, отключаемых выключателями, и допустимых токов короткого замыкания является применение новых дугогасящих газов ДУ. Наилучшие результаты были получены с электротехническим газом – элегазом (SF_6).

2. ЭЛЕГАЗ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1.1. Свойства элегаза как дугогасящей среды

Выключатели высокого напряжения РУ предназначены для включения и отключения электрических цепей в самых различных условиях, а именно: в нормальных режимах, когда ток относительно мал и отстаёт или опережает по фазе напряжение сети; при коротком замыкании, когда ток исчисляется десятками и даже сотнями тысяч ампер, а сдвиг по фазе между напряжением и током близок к 90° . Параметры восстанавливающегося напряжения могут быть самыми различными.

Дальнейшее повышение номинального напряжения и номинального тока в воздушных выключателях наталкивается на большие трудности (давление воздуха в ДУ достигает 4 МПа, что требует больших затрат на создание механически прочной и работоспособной конструкции выключателя).

Решение задачи может быть получено путём использования вместо воздуха газа, который обладал бы более высокой электрической прочностью и отключающей способностью.

Таким газом является шестифтористая сера SF_6 – элегаз (электротехнический газ).

По сравнению с воздухом этот газ обладает следующими преимуществами [3]:

1) электрическая прочность в 2,5 раза выше, чем у воздуха (при давлении 0,2 МПа электрическая прочность элегаза приближается к прочности трансформаторного масла);

2) высокая удельная объемная теплоёмкость (почти в 4 раза выше, чем у воздуха) позволяет увеличить нагрузку токоведущих частей и уменьшить массу меди в выключателе;

3) номинальный ток отключения камеры продольного дутья с элегазом в 5 раз выше, чем с воздухом;

4) малая напряжённость электрического поля в столбе дуги (благодаря этому резко сокращается эффект термодинамической закупорки сопла, что позволяет увеличить расстояние между контактами, повысить напряжение на каждом контакте промежутке и допустимую скорость восстановления напряжения);

5) элегаз является инертным газом, не вступающим в реакцию с кислородом и водородом, слабо разлагается дугой. Элегаз нетоксичен, хотя некоторые продукты разложения опасны.

Недостатком элегаза является высокая температура сжижения. Так, например, при давлении 1,31 МПа переход элегаза из газообразного состояния в жидкое происходит при температуре 0 °С. Это заставляет использовать его либо с подогревающим устройством, либо при низком давлении. При давлении 0,35 МПа температура сжижения равна –40 °С. Для электрических аппаратов применяется газ с высокой степенью очистки от примесей, что усложняет и удорожает его получение.

2.1.2. Краткая история использования элегаза

Синтез гексафторида серы впервые был произведен в Париже в 1900 г. учёными Муассаном и Лебо [4].

Фтор, полученный электролизом, вступал во взаимодействие с серой, и в результате экзотермической реакции получался достаточно устойчивый газ.

Со временем были определены физические и химические свойства газа, опубликованные Придо (1960), Шлумбом и Гемблом (1930), Клеммом и Хенкелем (1932 – 1935), Естом и Клауссоном (1933).

В их работах особое внимание уделялось химическим и диэлектрическим свойствам газа.

Первое исследование для целей промышленного применения было произведено компанией General Electric в 1937 году. Результаты этого исследования показали, что газ можно использовать в качестве изоляционной среды в электроэнергетике.

В 1939 году Томсон-Хьюстон запатентовал принцип применения газа SF_6 для изоляции кабелей и конденсаторов.

После Второй мировой войны различные публикации и способы применения стали быстро появляться один за другим:

➤ 1947 – работа по использованию элегаза для изоляции трансформаторов;

➤ 1948 – развитие промышленного производства SF_6 в США;

➤ 1960 – организация серийного производства SF_6 для строительства электростанций в США и Европе, совпадающая с появлением первых элегазовых выключателей и коммутационных аппаратов высокого и сверхвысокого напряжения;

➤ 1966 – первая подстанция с элегазовой изоляцией введена в эксплуатацию в районе Парижа и т.д.

В последнее время газ SF_6 принят для использования в коммутационной аппаратуре среднего напряжения, контакторах и автоматических выключателях, охватывая все потребности распределения электроэнергии.

2.1.3. Производство элегаза

Единственный используемый в настоящее время промышленный процесс производства SF_6 использует синтез гексафторида серы, при котором фтор, полученный при электролизе, взаимодействует с серой согласно экзотермической реакции, выраженной формулой



В течение этой реакции формируется некоторое количество фторидов серы, например SF_4 , SF_2 , S_2F_2 , S_2F_{10} , а также примесей из-за присутствия влажности, воздуха и угольных анодов, используемых для электролиза фтора. Эти побочные продукты удаляются ручными способами очистки (см. рис. 2.1).

Цепь очистки необходима для получения газа высокой степени чистоты. Качество газа SF_6 для поставки определяется Руководством Международной электротехнической комиссии МЭК 376, в котором определены допустимые концентрации примесей.

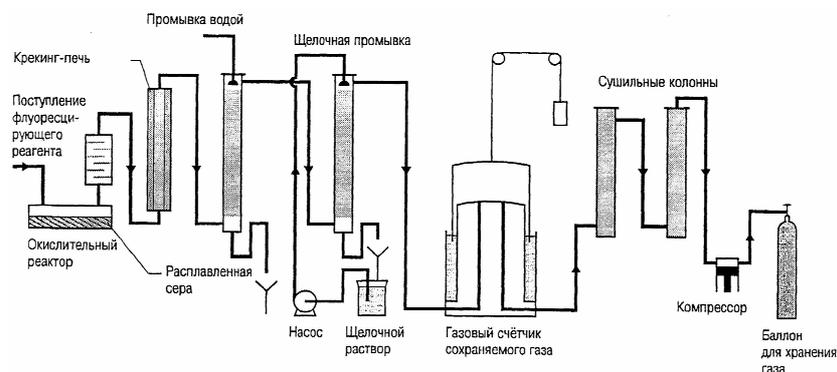


Рис. 2.1. Процесс производства SF_6 путём непосредственного соединения
2.1.4. Другие виды применения элегаза

Уникальные свойства SF_6 привели к его использованию в разных отраслях науки и промышленности, например:

- медицинская сфера: электрическая изоляция в медицинском оборудовании (в рентгеновских установках) или в хирургии;
- электрическая изоляция в научном оборудовании (электронные микроскопы, ускорители частиц);
- акустическая изоляция в оконных стеклопакетах;
- газ для отслеживания потока воздуха в вентиляционных системах (например, в шахтах) или в верхних слоях атмосферы;
- газ для обнаружения утечки в герметичных системах;
- создание специальной атмосферы при металлургической обработке алюминия и магния или для военных целей.

2.2. ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕГАЗА

2.2.1. Физические свойства элегаза

SF_6 – один из самых тяжёлых известных газов (см. табл. 2.1).

2.1. Основные физические свойства SF_6 при атмосферном давлении и температуре 25°C

Плотность	6,14 кг/м ³
Теплопроводность	0,0136 Вт/м·К
Критическая точка:	
• температура	45,55 °C
• плотность	730 кг/м ³
• давление	3,78 МПа
Скорость распространения звука	136 м/с
Показатель преломления	1,000783
Теплота образования	-1221,66 кДж
Удельная теплоёмкость	96,6 Дж/моль·К

Его плотность при 20 °С и 0,1 МПа (т.е. при атмосферном давлении) равна 6,139 кг/м³, что почти в пять раз выше, чем у воздуха. Его молекулярная масса составляет 146,06. Он является бесцветным и не имеет запаха. SF₆ может находиться в жидком состоянии только при повышенном давлении. Элегаз до температуры, приблизительно равной 1200 К, ведёт себя как идеальный газ.

Объёмная удельная теплоёмкость SF₆ в 3,7 раза больше, чем у воздуха. Это имеет важные последствия для уменьшения эффекта нагрева в электрическом оборудовании.

Теплопроводность SF₆ ниже, чем у воздуха, но его полная теплоотдача, в особенности если учитывается конвекция, очень хорошая, как у водорода и гелия, и выше, чем у воздуха. При высоких температурах кривая теплопроводности SF₆ (см. рис. 2.2) демонстрирует одно исключительное качество этого газа, которое позволяет использовать его для гашения дуги путём теплопередачи.

Пик теплопроводности соответствует температуре распада молекулы SF₆ при 2100...2500 К. В процессе распада поглощается значительное количество теплоты, испускаемой при преобразовании молекул на периферии дуги, ускоряя теплообмен между горячими и более холодными областями.

Превосходные диэлектрические свойства SF₆ происходят вследствие электроотрицательного типа его молекулы. Газ имеет явную тенденцию к захвату свободных электронов, образуя малоподвижные тяжёлые ионы, вследствие чего развитие электронных лавин становится очень трудным.

Диэлектрическая прочность SF₆ приблизительно в 2,5 раза выше, чем у воздуха при тех же условиях.

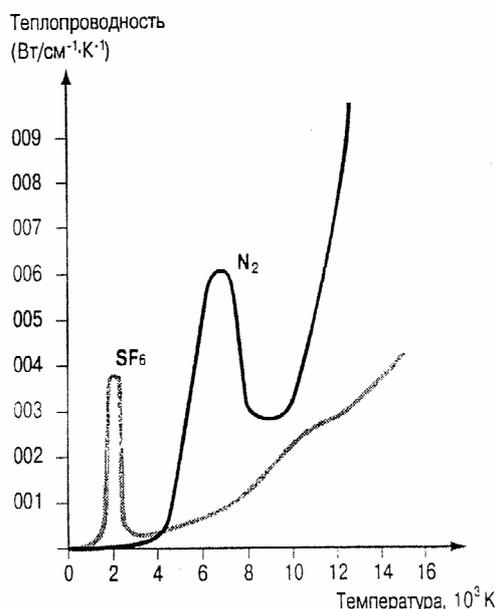


Рис. 2.2. Теплопроводность SF₆ и азота

Преимущество SF₆ как диэлектрика по сравнению с азотом хорошо заметно на рис. 2.3.

Для неоднородных цепей (см. рис. 2.4) номинальное напряжение пробоя получается при давлении приблизительно равном 0,2 МПа.

Вследствие низкой температуры распада и высокой энергии распада SF_6 является идеальным газом

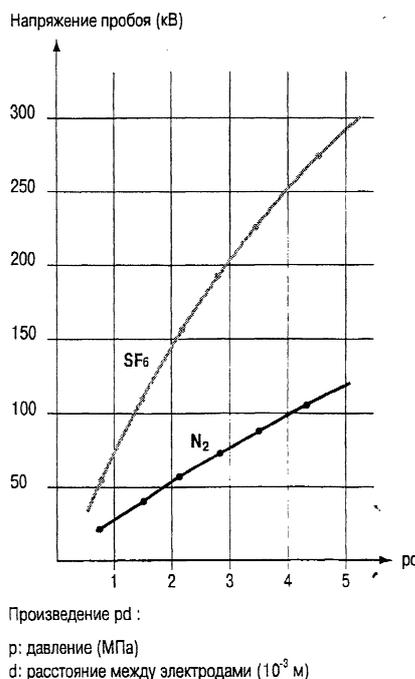


Рис. 2.3. Напряжение пробоя как функция произведения pd между двумя сферами диаметром 50 мм

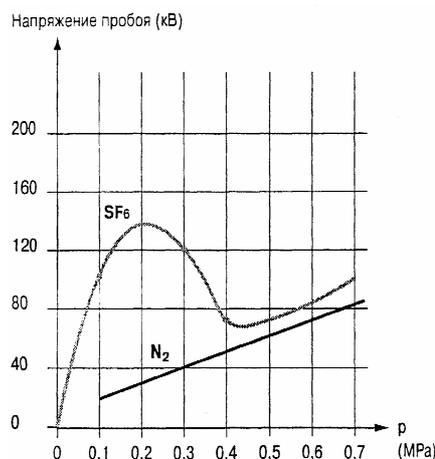


Рис. 2.4. Напряжение пробоя как функция давления для неоднородного электрического поля

для гашения дуги.

Когда электрическая дуга охлаждается в SF_6 , она остаётся проводящей до относительно низкой температуры, таким образом, минимизируя прерывание тока перед переходом через ноль, и тем самым, избегая высоких перенапряжений.

Скорость звука в SF_6 в три раза меньше скорости звука в воздухе, вследствие чего SF_6 является хорошим акустическим изолятором.

2.2.2. Химические свойства элегаза

Гексафторид серы полностью удовлетворяет требованиям к валентности серы. Шесть связей являются ковалентными, что объясняет исключительную стабильность этого соединения.

SF_6 можно нагреть без его распада до $500\text{ }^\circ\text{C}$ в отсутствии каталитических металлов. SF_6 не воспламеняется. Водород, хлор и кислород не оказывают никакого воздействия на этот газ. SF_6 не растворяется в воде. Кислоты не оказывают никакого воздействия на этот газ.

В чистом состоянии SF_6 нетоксичен, что регулярно подтверждается на новом газе перед его поставкой. Для проверки в атмосферу, состоящую на 80 % из SF_6 и на 20 % из кислорода, помещают мышью – биологическое исследование, разрешённое Международной электротехнической комиссией МЭК 376.

В электрической дуге температура может достигать 15000 K и выше, и малая часть SF_6 при этом распадается. Продукты распада формируются при следующих условиях:

- электрическая дуга, образующаяся при расхождении контактов, обычно состоящих из сплавов на основе вольфрама, меди и никеля, содержащих остаточные количества кислорода и водорода;
- такие примеси в SF_6 , как воздух, CF_4 и водяной пар;
- изолирующие компоненты, включающие пластмассы на основе углерода, водорода и диоксида кремния;
- другие металлические или неметаллические материалы, из которых произведено оборудование.

Вышесказанное объясняет, почему твёрдые и газообразные продукты распада содержат (помимо фтора и серы) такие элементы как углерод, кремний, кислород, водород, вольфрам, медь и т.д.

Основные газообразные побочные продукты, идентифицированные в лабораториях, исследующих данный вопрос, объединяющих хроматографию газовой фазы с масс-спектрометрией, следующие:

- фтористоводородная кислота – HF ;
- диоксид углерода – CO_2 ;

- диоксид серы – SO_2 ;
- тетрафторид углерода – CF_4 ;
- тетрафторид кремния – SiF_4 ;
- фторид тионила – SOF_2 ;
- фторид двуокиси серы – SO_2F_2 ;
- дисерный декафторид – S_2F_{10} ;
- тетрафторид серы – SF_4 .

Некоторые из этих побочных продуктов могут быть токсичными, но большинство из них очень легко адсорбируется такими материалами, как активированный оксид алюминия или молекулярные сетки. Некоторые побочные продукты образуются в чрезвычайно малых количествах (S_2F_{10}).

Если адсорбент (молекулярная сетка или активированный оксид алюминия) присутствует в оборудовании в достаточном количестве, то уровень коррозии из-за продуктов распада элегаза (фтористоводородной кислоты, в частности) является очень невысоким, а то и вообще незначительным.

Причина этого в том, что адсорбенты действуют настолько быстро, и эффективно, что коррозионные газы не успевают реагировать с другими присутствующими материалами.

Рисунок 2.5 с помощью хроматограммы показывает эффективность применения адсорбента в виде молекулярной сетки при анализе газа, взятого с опытного контакта без использования адсорбента (рис. 2.5, а) и с использованием молекулярной сетки (рис. 2.5, б) взятого с такого же контакта, подвергнутого таким же электрическим воздействиям.

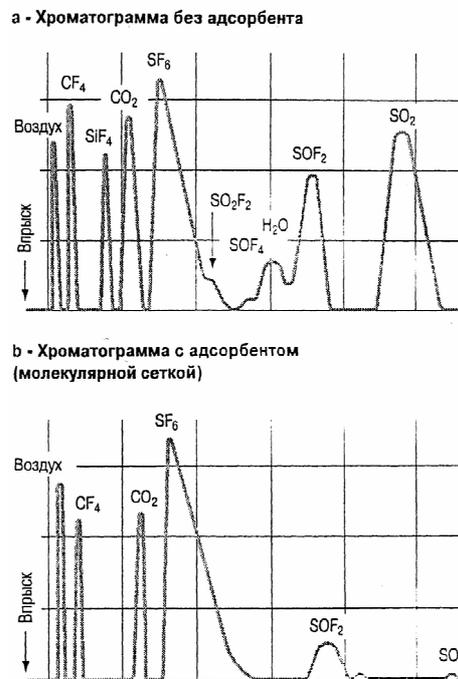


Рис. 2.5. Анализ газов, взятых из оборудования

Таблица 2.2 позволяет сравнить количества газообразных продуктов распада для этих случаев. Эффективность применения адсорбентов очевидна.

Чистый SF_6 нетоксичен и биологически нейтрален. Испытания, проведенные на животных, показали, что при наличии газа SF_6 в концентрации до 80 и 20 % кислорода неблагоприятные эффекты отсутствуют.

Несмотря на то, что вдыхаемый воздух может содержать высокую концентрацию SF_6 , на здоровье это практически не влияет.

2.2. Результаты анализа SF₆ в выключателях с использованием молекулярной сетки и без неё

Газ	Без адсорбента, %	С адсорбентом (молекулярной сеткой) (%)
Воздух	0,17	0,03
CF ₄	2,83	2,80
SiF ₄	2,88	0,25
CO ₂	0,24	–
SF ₆	остаток	остаток
SO ₂ F ₂	0,12	–
SOF ₂	3,95	небольшое количество
H ₂ O + HF	0,20	0,05
SO ₂	2,90	небольшое количество

Максимальная концентрация газа в производственных помещениях, где рабочие находятся до восьми часов в день пять раз в неделю, не должна превышать 6000 мг/м³. Данное предельное пороговое значение (*TLV*) обычно используется для безопасных газов, обычно не присутствующих в атмосфере.

Чистый SF₆ не оказывает какого-либо вредного воздействия на окружающую среду, мутагенного или канцерогенного влияния на здоровье. Поэтому при работе с новым SF₆ достаточно принять процедуры, гарантирующие, что указанная максимальная концентрация не превышена.

Вследствие производственного процесса, серийно выпускаемый SF₆ содержит некоторое количество примесей, разрешённые уровни которых установлены в стандарте Международной электротехнической комиссией МЭК 376.

Уровни риска здоровью человека, оказываемого используемым SF₆, зависит от ряда факторов:

- степени распада SF₆ и типов присутствующих продуктов распада;
- растворения используемого SF₆ в окружающей среде;
- времени, в течение которого человек находится в среде, содержащий использованный SF₆.

Потенциально токсичным газам присваивается величина, известная как *TLV*, которая выражает их концентрацию в воздухе. *TLV* – средневзвешенная во времени концентрация, безвредная для здоровья при нахождении в ней в течение 8 часов в день и 40 часов в неделю.

Несмотря на то, что используемый SF₆ содержит многокомпонентную смесь химических веществ, как было показано выше, один конкретный элемент доминирует по определению токсичности. Это газообразный продукт распада фторид тионила SOF₂.

Доминирование этого компонента следует из его высокой нормы выработки (образованный объём в литрах на энергию дуги в килоджоулях) по сравнению с нормами выработки других продуктов распада в сочетании с его уровнем токсичности.

TLV для SOF₂ составляет 9,6 мг/м³. SOF₂ может далее реагировать с водой, приводя к образованию диоксида серы SO₂ и фтористоводородной кислоты HF. Их воздействие подобно воздействию SOF₂ вследствие сходной концентрации и значений *TLV*.

Продукты распада – фторид тионила SOF₂ и серный фторид SO₂F₂ – являются самыми широко распространёнными продуктами распада в результате дуги в SF₆, при этом последний продукт считается наиболее ядовитым.

2.3. ОБЗОР ЭЛЕГАЗОВОГО КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2.3.1. Принципы работы и конструкции элегазовых выключателей

В элегазе при атмосферном давлении может быть погашена дуга с током в 100 раз превышающим ток, отключаемый в воздухе при тех же условиях. Исключительная способность элегаза гасить дугу объясняется сильным сродством его с электронами. Молекулы газа улавливают электроны дугового столба и образуют относительно неподвижные отрицательные ионы. Потеря электронов делает дугу неустойчивой, и она легко гаснет. В струе элегаза, т.е. при газовом дутье, поглощение электронов из дугового столба происходит еще более интенсивно.

Возможны следующие исполнения ДУ с элегазом:

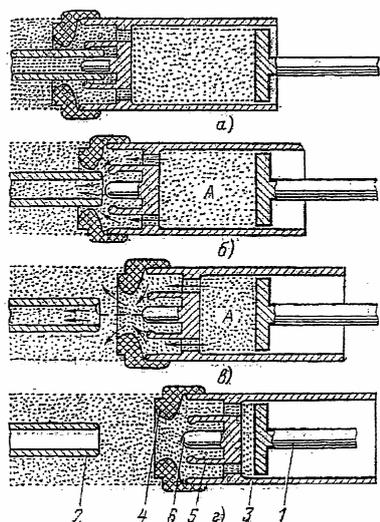


Рис. 2.6. Схема автопневматического ДУ элегазового выключателя:
а – положение «включено»; *б* – начальная фаза процесса отключения;
в – конечная фаза процесса отключения; *г* – положение «отключено»

б) с автопневматическим дутьем (необходимый для дутья перепад давления создается за счёт энергии привода);

7) с охлаждением дуги элегазом при её движении, вызванном взаимодействием тока с магнитным полем;

8) с гашением дуги за счёт перетекания газа из резервуара с высоким давлением (выключатели с двойным давлением).

В настоящее время широко применяется первый способ.

В элегазовых выключателях ДУ помещено в герметизированный заземленный бак с проходными изоляторами и встроенными изоляторами тока. Бак заполнен элегазом при давлении 0,2...0,6 МПа. При использовании ДУ с автопневматическим дутьём газ SF₆ в процессе отключения сжимается поршневым устройством и направляется в зону дуги. Таким образом, элегазовый выключатель представляет собой замкнутую систему (без выброса газа наружу). Он во многом схож с баковым масляным выключателем, однако в нём отсутствуют горючие материалы и масса его значительно меньше массы масляного выключателя.

Принципиальная схема ДУ конструкции ВЭИ приведена на рис. 2.6 [2].

Поршень *1* и полый контакт *2* неподвижны. Цилиндр *3* с соплом *4* из фторопласта и розеточным контактом *5* перемещаются по горизонтальной оси с помощью пневматического привода (последний на рисунке не показан). Рисунок 2.6, *а* соответствует положению «включено», контакты *2* и *5* замкнуты. В процессе отключения (рис. 2.6, *б*) цилиндр *3* перемещается приводом вправо. При этом газ в полости *А* сжимается, контакты размыкаются, и между ними образуется дуга. При выходе вспомогательного электрода *6* из внутренней полости контакта *2* газ начинает вытекать через эту полость.

Если отключаемый ток мал (порядка нескольких десятков ампер), поток газа через внутреннюю полость контакта *2* достаточен для гашения дуги при относительно небольшой её длине в течение приблизительно

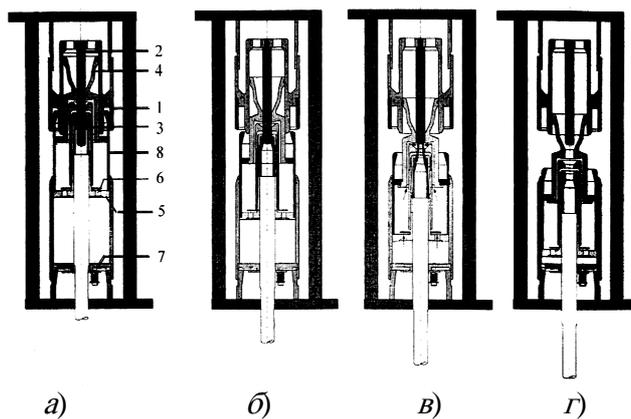
10 мс. При отключении тока короткого замыкания (рис. 2.6, *в*) гашение дуги происходит при выходе контакта *2* из сопла *4*, когда вследствие увеличивающегося давления газа в полости *А* создаётся сильный поток газа сквозь столб дуги. При включении цилиндр с соплом и розеточным контактом перемещается влево.

Исследования показали, что более эффективным является ДУ аналогичной конструкции, но с двусторонним дутьём. Последний вариант конструкции реализован в силовом выключателе ЗАР1FG для номинального напряжения 110 кВ производства АО «Сименс» [5].

Рассмотрим кратко процесс дугогашения в указанном выключателе (рис. 2.7).

В процессе отключения сначала размыкается главный контакт (рис. 2.7, *б*), состоящий из контактных пальцев *1* и цилиндра *8*. Дугогасящие контакты, состоящие из неподвижного и подвижного контак-

та (2/3) находятся в замкнутом положении, благодаря чему ток, подлежащий коммутации, пока не прерывается.



Символ	Значение	Символ	Значение
1	контактный палец	5	поршень
2	неподвижный контакт	6	обратный клапан
3	подвижный дугогасительный контакт	7	группа клапанов
4	сопло	8	цилиндр

Рис. 2.7. Схематическое представление процесса отключения:
а – коммутационное положение «ВКЛ»; *б* – отключение – главный контакт разомкнут; *в* – отключение – главный контакт замкнут; *г* – коммутационное положение «ВЫКЛ»

Затем размыкаются дугогасительные контакты (рис. 2.7, *в*), возникает электрическая дуга. Одновременно цилиндр 8 начинает движение вниз и сжимает находящийся между поршнем 5 и группой клапанов 7 дугогасительный газ. При этом элегаз через обратный клапан 6, а также через зазор между подвижным контактом 3 и дугогасительным соплом протекает в направлении, противоположном движению контактного цилиндра и гасит электрическую дугу.

При большом токе короткого замыкания нагревается дугогасящий элегаз вокруг штыря 2 вследствие энергии электрической дуги и направляется под высоким давлением в нагревающий цилиндр 8. На участке перехода тока через нуль газ течёт из нагревающего цилиндра обратно и гасит электрическую дугу. Обратный клапан 6 в нагревающем цилиндре 8 препятствует в этом процессе тому, чтобы в компрессорную камеру проникло высокое давление между поршнями 5 и группой клапанов 7.

2.3.2. Коммутационное оборудование среднего и высокого напряжения

Как было отмечено ранее, производители коммутационного оборудования используют уникальные диэлектрические свойства элегаза при проектировании оборудования.

Главное назначение SF₆ – применение в коммутационном оборудовании среднего и высокого напряжения.

В области высокого напряжения SF₆ скоро станет во всем мире единственной технологией, используемой для КРУЭ.

Старые технологии с применением масла или сжатого воздуха исчезают вследствие многочисленных преимуществ SF₆.

В области среднего напряжения, где необходимо компактное коммутационное оборудование, SF₆ является единственным решением.

Однако для отдельных компонентов технология SF₆ делит рынок с воздушными выключателями нагрузки – разъединителями, но доля рынка технологий с использованием воздуха быстро уменьшается

в пользу SF₆ и вакуумных выключателей. Вакуумные и элегазовые выключатели являются современными решениями и будут продолжать развиваться вследствие снижающегося влияния технологий с применением масла.

Чтобы полностью охватить возможные варианты применения элегаза, необходимо упомянуть трансформаторы с элегазовой изоляцией, главным образом популярные в Японии, и газовые изолированные кабели высокого напряжения, для которых используется технология, очень похожая на технологию для КРУЭ высокого напряжения.

2.3.3. Потребление элегаза и количество коммутационной аппаратуры

Во всем мире потребление SF₆ разделено между коммутационным оборудованием и неэлектрическими приборами: МЭК оценивает полное ежегодное потребление в 5000...8000 т, разделённых на две более или менее равные части между этими двумя способами применения.

Чтобы понять относительную пропорцию SF₆ в области среднего и высокого напряжения, полезно оценить мировой парк установленного элегазового оборудования и количество оборудования, ежегодно вводимого в эксплуатацию (табл. 2.3).

Из таблицы хорошо видно, что применение SF₆ является преобладающим в оборудовании высокого напряжения: 90 % от общего объёма элегазового коммутационного оборудования предназначено для высокого напряжения и только 10 % – для среднего напряжения.

2.3. Объём рынков элегазового оборудования среднего и высокого напряжения

	SF ₆ масса на единицу	Полное установленное количество		Ежегодный дополнительный прирост выключателей	
		количество	масса SF ₆ , т	количество	масса SF ₆ , т
<i>Коммутационное оборудование СН</i>					
RM6/выключатели нагрузки-разъединителей	0,6	3 000 000	1850	240000 RM6 + 70000 выключателей	1408
КРУЭ	6	50 000	300	7000	42
Выключатели	0,3	500 000	150	40000	17
Всего	–	–	2000...2500	–	200
<i>Коммутационное оборудование ВН</i>					
КРУЭ	500	20 000	10 000	3000	1500
Выключатели открытого типа	50	100 000	5000	8000	400
Газоизолированные кабели		30 000 м	1000	3000 м	100
Всего	–	–	20 000	–	2000

В коммутационном оборудовании среднего напряжения потребление SF₆ касается главным образом выключателей нагрузки – разъединителей и КРУЭ; часть, относящаяся к выключателям среднего напряжения, пренебрежимо мала.

2.3.4. Опыт EDF: 20 лет применения элегаза в РУ среднего напряжения

«Электриситэ де Франс» (*EDF*) — вероятно, единственная компания, работающая с электрическими выключателями, имеющая 30-летний опыт работы с элегазовыми выключателями и выключателями нагрузки – разъединителями среднего напряжения, с парком оборудования, установленным компанией *Merlin Gerin*, включающем в себя более 20 000 выключателей и 200 000 выключателей нагрузки (модульного типа) на 1995 г.

EDF недавно выполнила полную проверку части самой старой аппаратуры с наибольшим количеством операций: испытания на короткое замыкание, диэлектрические испытания, испытания на нагрев, измерения герметичности и механической прочности, измерения контактного износа и газовый анализ. Цель проверки состояла в оценке вероятного оставшегося срока службы оборудования.

Измерения контактного износа показали максимальное значение, равное 25 %.

Газовый анализ использовался для оценки потенциальной токсичности в двух различных случаях: при обычной утечке и аварийном внезапном выбросе вследствие повреждения. Проверка показала:

➤ в случае обычной утечки концентрация побочных продуктов в коммутационном оборудовании чрезвычайно низкая (примерно в 10 000 раз ниже *TLV*);

➤ во втором случае, который происходит исключительно редко, концентрация побочных продуктов остаётся намного ниже любого опасного уровня.

Одним из главных выводов проверки является то, что в реальных производственных условиях предполагаемый срок службы элегазового оборудования составляет не менее 30 лет.

Элегазовое коммутационное оборудование полностью отвечает требованиям потребителей в плане компактности, надёжности, сокращения времени обслуживания, безопасности персонала, срока службы. Снижение механической энергии (что приводит к более высокой надёжности) для отключения выключателя может быть достигнуто применением новых способов гашения дуги, например, вращение и дутьё дуги. Давление при заполнении будет снижаться, способствуя оптимальной безопасности персонала.

Что касается обслуживания, можно предвидеть диагностические возможности, позволяющие контролировать в режиме реального времени состояние оборудования и представлять информацию пользователю о необходимости обслуживания.

Что касается герметичности, вероятное развитие коммутационного оборудования высокого напряжения можно ожидать при более низкой интенсивности утечки, например, 0,1...0,5 % в год. Ведутся работы по повторному использованию SF_6 , включая определение чистоты SF_6 , используемого в силовом оборудовании. Таким образом, рассматривается применение SF_6 в закрытом цикле, что поможет минимизировать его выброс в атмосферу.

Следует отметить основные достоинства и недостатки элегазовых выключателей:

9) высокая износостойкость при коммутации номинальных токов и номинальных токов отключения. Срок службы современных элегазовых выключателей без проведения ремонта составляет 10...20 лет и более (в этом промежутке проводятся только профилактические испытания и инструментальный контроль);

10) резкое снижение эксплуатационных затрат по сравнению с маломасляными выключателями. Обслуживание элегазовых выключателей сводится к смазке механизма и привода, проверке износа контактов по меткам или путем замеров 1 раз в 5 лет или через 5 – 10 тысяч циклов;

11) полная взрыво- и пожаробезопасность и возможность работы в агрессивных средах (ограничение только по материалам, применяемым в конструкции привода);

12) широкий диапазон температур окружающей среды, в которой возможна работа элегазового выключателя (выключатели специального исполнения могут работать при температурах ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ без устройств подогрева);

13) чистота, удобство обслуживания, обусловленные отсутствием выброса масла, газов при отключении токов короткого замыкания;

14) отсутствие загрязнения окружающей среды;

15) быстрое гашение дуги в элегазе;

16) высокая химическая стабильность элегаза.

Недостатки элегазовых выключателей определить практически невозможно, единственное отрицательное свойство – возможность отравления людей обслуживающего персонала самим элегазом при ус-

ловии попадания в легкие достаточного количества этого газа. Хотя сам по себе элегаз инертен, но его отравляющее действие связано с тем, что, попадая в легкие, он заполняет их и не вытесняется воздухом (масса элегаза больше массы воздуха). Данное опасение на сегодня не актуально, так как количество газа в единице оборудования очень мало.

2.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ОБРАЩЕНИЕ С ЭЛЕГАЗОМ В КОММУТАЦИОННОМ ОБОРУДОВАНИИ

2.4.1. Заполнение новым элегазом

Новый газ SF₆ поставляется в баллонах в жидком виде. Давление SF₆ составляет примерно 22 атмосферы по манометру. Новый газ должен соответствовать стандарту Международной электротехнической комиссии МЭК 376, который определяет пределы концентраций примесей.

С новым газом можно обращаться на открытом воздухе без каких-либо специальных средств защиты. При работе в закрытом помещении с новым газом SF₆ необходимо учитывать следующее:

17) предельное пороговое значение *TLV* для нового газа SF₆ равняется 6000 мг/м³, что означает, что рабочие могут находиться в среде с концентрацией газа до этого уровня в течение восьми часов в день, хоть раз в неделю. *TLV* не является показателем потенциальной токсичности, скорее это значение, присваиваемое газам, которых нет в атмосфере при нормальных условиях;

18) температура выше 500 °С или наличие некоторых металлов при температуре выше 200 °С вызывают распад SF₆. При пороговых температурах этот распад может протекать очень медленно. Поэтому не рекомендуется курить, использовать открытый огонь, электросварку (кроме как в нейтральной атмосфере) или другие источники тепла, которые могут вызывать такие значения температуры в местах, где в атмосфере может присутствовать газ SF₆;

19) необходимо соблюдать обычные меры предосторожности при работе с баллонами со сжатым воздухом. Например, внезапный выпуск сжатого газа создаёт низкие температуры, которые могут вызвать быстрое замораживание. Обслуживающий персонал, работающий с таким оборудованием, должен использовать теплоизолирующие перчатки;

20) если оборудование необходимо заполнить новым газом SF₆, необходимо следовать инструкциям изготовителя в следующем порядке:

- убедиться в надлежащем качестве газа SF₆ в оборудовании;
- устранить любой риск создания чрезмерного давления в заполненном корпусе.

Кроме того, необходимо избегать утечки газа SF₆ в атмосферу во время заполнения оборудования.

2.4.2. Обслуживание элегазового оборудования

Герметичное оборудование среднего напряжения не требует обслуживания частей, находящихся внутри элегазовых выключателей.

Однако для некоторых конструкций КРУЭ среднего напряжения может потребоваться обслуживание, а для большинства выключателей среднего напряжения обслуживание должно осуществляться на периодической основе.

Расширение распределительного щита КРУЭ как среднего, так и высокого напряжения может потребовать удаления SF₆. Для предоставления информации по безопасным методам работы в данных условиях существует много местных строительных норм и правил, а также рекомендации производителя.

Остановимся лишь на общих руководящих принципах:

21) при удалении газа SF₆, который может содержать продукты распада, необходимо соблюдать осторожность. Газ не следует выпускать внутри помещения, его необходимо собрать в резервуар для хранения. Необходимо соблюдать осторожность, чтобы не вдохнуть газ SF₆, выпускаемый из оборудования. Если это невозможно, необходимо использовать респиратор. Респиратор должен быть оснащён фильтром, который удаляет газы;

22) корпуса необходимо откачать, чтобы удалить как можно больше остаточного газа SF₆. В некоторых случаях рекомендуется продуть корпус сухим воздухом или азотом перед его вскрытием;

23) в любом случае, обслуживающий персонал должен знать о присутствии остаточного газа SF₆ при первом открытии корпуса и использовать респираторы (вентиляция рабочей зоны должна быть надлежащей, чтобы быстро удалить любой газ, выпущенный из корпуса в рабочую зону);

24) металлические порошки фторида более химически активны во влажной среде, поэтому они должны быть в сухом состоянии до и во время их удаления (мелкие пылинки могут оставаться в воздухе в течение долгого времени, в таком случае необходимо пользоваться респираторами с сублимированными фильтрами; особое внимание необходимо уделить защите глаз);

25) компоненты, металлические порошки фторида и адсорбенты, извлечённые из рабочего оборудования, необходимо упаковать в герметичные контейнеры для их последующей нейтрализации.

2.4.3. Окончание срока службы элегазового оборудования

Для элегазового оборудования, снятого с эксплуатации, может потребоваться нейтрализация продуктов распада, оставшихся после удаления газа SF₆. Для защиты окружающей среды SF₆ необходимо удалить и не выпускать в атмосферу. Необходимость нейтрализации зависит от уровня распада; ожидаемые уровни распада приведены в табл. 2.4.

2.4. Ожидаемые уровни распада SF₆ для различных типов оборудования

Применение	Ожидаемая степень распада SF ₆
Выключатель нагрузки – разъединитель среднего напряжения (КРУЭ и РМБ)	<ul style="list-style-type: none">➤ от 0 до нескольких десятых процента➤ видимые отложения пыли отсутствуют
Выключатели среднего и высокого напряжения	среднее: <ul style="list-style-type: none">➤ до нескольких процентов➤ небольшие порошковые отложения
Любой корпус, в котором произошло аномальное образование дуги	высокое: <ul style="list-style-type: none">➤ может превысить 10 %➤ порошковые отложения, от средних до значительных

Остановимся на общем описании процедуры нейтрализации.

Перед утилизацией оборудования SF₆ необходимо извлечь для повторного использования. Оборудование затем необходимо обработать в соответствии с нормами для ожидаемого уровня распада. После обработки оборудование можно утилизировать как обычные отходы (с соблюдением инструкций), либо подвергнуть восстановлению, чтобы извлечь металлы. Растворы, используемые в процессе нейтрализации, можно утилизировать как обычные отходы.

При малом распаде специальных действий не потребуется.

При среднем и высоком распаде внутренние поверхности газовых корпусов необходимо нейтрализовать с помощью раствора гашёной извести (гидроксид кальция) – 1 кг извести на 100 л воды. Обрабатываемый корпус необходимо, по возможности, заполнить раствором извести на 8 ч, а затем опорожнить корпус. Если корпус впоследствии необходимо снова использовать, его следует сначала промыть чистой водой.

Большие корпуса, которые сложно заполнить, можно очистить с помощью пылесоса, оборудованного фильтрами для нейтрализации различных веществ в отдельности. Внутренние поверхности необходимо затем промыть раствором извести, который следует оставить на месте в течение, по крайней мере, одного часа, а затем промыть чистой водой.

2.4.4. Нештатные ситуации

Рассмотрим возможные штатные ситуации, возникающие, правда, очень редко, которые могут привести к неконтролируемому выпуску газа SF₆, и оценки при этом риска для обслуживающего персонала. К ним относятся следующие:

- штатная утечка газа вследствие разгерметизации корпуса, в котором содержится газ SF₆;

➤ внутреннее короткое замыкание – следствие неконтролируемого образования дуги в корпусе, в котором содержится газ SF₆;

➤ внешнее возгорание, приводящее в нештатной утечке.

Проанализируем указанные нештатные ситуации.

Нештатная утечка. Метод оценки риска схож с методом, который относится к обычной утечке. Пусть утечка всего газа SF₆ в одном из выключателей произошла внезапно, помещение подстанции герметичное, а вентиляция не работает. В этом случае концентрация продукта распада SOF₂ достигла бы 54,0 мг/м³, т.е. приблизительно в 6 раз больше предельного порогового значения *TLV*. Однако на практике выключатели снабжены датчиками снижения давления, которые срабатывают при падении давления до 80 % от величины нормального давления заполнения. Тогда только 20 % газа SF₆ попадает в объём подстанции, вследствие чего концентрация SOF₂ становится равной 10,8 мг/м³. Следовательно, *TLV* для SOF₂ (9,6 мг/м³) может быть превышено, но незначительно. При этих обстоятельствах воздействие в течение короткого времени представляет незначительный риск. Острый неприятный запах SOF₂ можно почувствовать при концентрации приблизительно 6 мг/м³, и это означает, что большинство людей немедленно почувствует присутствие газа при концентрациях, приближающихся к *TLV*. Однако для того, чтобы определить наличие газа, воздух вдыхать не рекомендуется.

Внутреннее короткое замыкание может произойти, если дуга неправильно образовалась между главными контактами коммутационного устройства или между главным контактом и заземлением. Такие замыкания происходят очень редко.

Неправильное образование дуги приводит к быстрому увеличению давления, что может привести к выбросу горячих газов и других продуктов распада. Существуют три возможные причины возникновения таких замыканий:

26) внутреннее короткое замыкание, которое не приводит к нештатному выбросу газа SF₆. Это может произойти, если энергия, обусловленная коротким замыканием, недостаточна для того, чтобы вызвать возгорание или срабатывание предохранительного клапана (устройства разгрузки давления);

27) внутреннее короткое замыкание, при котором энергия дуги приводит к расплавлению стенки (обычно металлической, образующей один электрод дуги) или её испарению, в результате чего в ней образуется отверстие. Этот тип замыкания относится главным образом к КРУЭ высокого напряжения;

28) внутреннее короткое замыкание, при котором повышение давления в корпусе достаточно для срабатывания устройства разгрузки давления. Этот процесс управляется перепускным клапаном или происходит разрушение специально ослабленной области корпуса, что приводит к направленному выбросу горячего газа.

Рассмотрим риск для обслуживающего персонала при замыканиях типа 2 и 3. Риск, связанный с использованием SF₆, оценивается на основании количества выпускаемого в атмосферу газа SOF₂. Кроме того, будем учитывать вредное воздействие других ядовитых паров, не связанных с использованием элегаза. Такие пары могут образовываться при внутреннем коротком замыкании в оборудовании любого типа и вносить основной вклад в токсичность атмосферы.

При этом делаются следующие предположения:

➤ для оборудования среднего напряжения, содержащего небольшой объём SF₆, и предполагается, что большая часть газа выпускается из корпуса за 50 мс. Данное предположение основано на измерениях давления, сделанных во время испытаний на внутреннее короткое замыкание. Количество образованного SOF₂ рассчитывается за период 50 мс;

➤ для оборудования высокого напряжения будет использоваться период образования SOF₂, равный 100 мс, так как длительность короткого замыкания в системах высокого напряжения обычно ограничивается приблизительно 100 мс;

➤ предполагается, что помещение подстанции изолировано от внешней окружающей среды;

➤ воздействие адсорбентов, вероятно, будет незначительным в пределах интересующего периода времени;

➤ весь SOF₂, образованный при коротком замыкании, выпускается в помещение (см. табл. 2.5 и 2.6).

2.5. Внутреннее короткое замыкание внутри помещения подстанции КРУЭ высокого напряжения (110...150 кВ)

<i>A</i>	Объём помещения (м ³)	700
<i>B</i>	Объём корпуса выключателя (м ³)	31,5
<i>C</i>	Напряжение дуги (В)	1,000
<i>D</i>	Длительность дуги (с)	0,1
<i>E</i>	Энергия дуги (2 дуги, фаза-фаза) (кДж)	6,300
<i>F</i>	Норма выработки SOF ₂ (Al электроды) (л/кДж)	10 × 15 ⁻³
<i>G</i>	Количество SOF ₂ , образованного в выключателе (л)	94,5
<i>H</i>	Концентрация SOF ₂ , в коммутационном зале (ppmv)	135

2.6. Внутреннее короткое замыкание внутри помещения подстанции среднего напряжения (10 кВ)

<i>A</i>	Объём помещения (м ³)	120
<i>B</i>	Объём корпуса выключателя (м ³)	31,5
<i>C</i>	Напряжение дуги (В)	1,000
<i>D</i>	Длительность дуги (с)	0,5
<i>E</i>	Энергия дуги (2 дуги, фаза-фаза) (кДж)	1,575
<i>F</i>	Норма выработки SOF ₂ (Cu электроды) (л/кДж)	3,7 × 10 ⁻³
<i>G</i>	Количество SOF ₂ , образованного в выключателе (л)	5,83
<i>H</i>	Концентрация SOF ₂ , в коммутационном зале (ppmv)	48,6

Результаты показывают, что в пределах помещения могут быть образованы существенные концентрации SOF₂. Подробные токсикологические данные для SOF₂, к сожалению, недоступны, но известно, что большие млекопитающие (кролики) могут выдерживать его воздействие в течение одного часа при концентрациях до 3000 мг/м³ (стандарт МЭК 1834 – 1995).

Другие потенциально ядовитые вещества также образуются при внутреннем коротком замыкании, включая пары металлов и пластмассы элементов выключателя. Эти неизбежные продукты, которые не связаны с использованием SF₆, могут доминировать, если рассматривать полную токсичность атмосферы.

Это относится к любому типу коммутационного оборудования, в том числе и к элегазовому (стандарт МЭК 1634-1995).

Например, при коротком замыкании ошиновки испарятся только 10 г меди в атмосферу используемого в примере помещения, концентрация (пренебрегая эффектами окисления) будет равна (масса меди/объём помещения) 83 мг/м³. TLV для паров меди составляет 0,2 мг/м³. Это означает, что концентрация паров меди может достигнуть значения в 400 раз превышающего пороговое значение TLV.

Аналогично, полное испарение только 32 г поливинилхлорида (эквивалент изоляции 1,2 м стандартного провода сечением 1 мм²) может привести к концентрации винилхлорида в атмосфере, превышающей TLV в 100 раз (2,6 мг/м³).

Таким образом, можно сделать вывод, что при любом внутреннем коротком замыкании коррозионные и/или токсичные пары образуются вне зависимости от того, присутствует газ SF₆ или нет. В случаях, когда эти пары попадают в атмосферу помещения подстанции, продукты, не связанные с газом SF₆, будут наверняка иметь доминирующий вклад в общую токсичность. Это дополнительно говорит в пользу того, что использование газа SF₆ в коммутационном оборудовании не приводит к существенному увеличению риска, связанного с образованием внутреннего короткого замыкания.

Внешнее возгорание. Возгорание на открытом воздухе редко создаёт проблемы вследствие относительного отсутствия огнеопасного материала рядом с коммутационным оборудованием. Для оборудования внутри помещения, особенно для подстанций среднего напряжения, существует большой риск возгорания рядом с коммутационным оборудованием.

Исследования показали, что температура возгорания редко превышает 800 °С, а температура рядом с корпусами элегазового оборудования, защищённого металлической наружной обшивкой, наверняка будет намного ниже этого значения.

Очень маловероятно, чтобы выброс SF₆ был вызван возгоранием. Если возгорание всё же произошло, средние температуры, вероятно, будут слишком низкими (так как SF₆ будет быстро рассеян посредством конвекции в области с меньшими температурами), чтобы привести к существенному распаду, для которого требуется температура не менее 500 °С. SF₆ не воспламеняется и будет гасить возгорание.

Рабочие, участвующие в борьбе с пожаром, должны использовать соответствующее снаряжение для защиты от паров горячей пластмассы.

2.4.5. Элегаз и окружающая среда

Вещества, загрязняющие атмосферу, образующиеся в результате деятельности человека, делятся на две категории в соответствии с воздействием, оказываемым ими:

- истощение стратосферного озона (дыры в озоновом слое);
- глобальное потепление (парниковый эффект).

Элегаз незначительно влияет на истощение стратосферного озона, так как не содержит хлор, являющийся главным реагентом в катализе озона, ни на парниковый эффект, поскольку количества его, присутствующие в атмосфере, являются незначительными (МЭЖ 1634 (1995)).

Применение элегаза SF₆ в коммутационном оборудовании для всех условий эксплуатации дало преимущества, выраженные в производительности, размере, массе, общих затратах и надёжности. Стоимость покупки и эксплуатации, в которую входят затраты на обслуживание, могут быть значительно ниже затрат для коммутационного оборудования старого типа.

Многолетний опыт эксплуатации показывает, что SF₆ не представляет ни обслуживающему персоналу, ни окружающей среде какой-либо опасности при соблюдении элементарных правил обращения и эксплуатации элегазового оборудования.

3. ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящее время элегазовые выключатели используются главным образом в устройствах 110...220 кВ. В качестве дугогасительной, теплоотводящей и изолирующей среды в них применяется элегаз (электротехнический газ). Выбор элегаза (шестифтористая сера SF₆) не случаен. Чистый газообразный элегаз химически не активен, безвреден, не горит и не поддерживает горения, обладает повышенной теплопроводящей способностью, удачно сочетает в себе изоляционные и дугогасящие свойства, легкодоступен и сравнительно недорог. Электрическая прочность элегаза в 2,5 раза превышает прочность воздуха. Его электрические характеристики обладают высокой стабильностью. При нормальной эксплуатации элегаз не действует на материалы, применяемые в аппаратостроении; он не «старееет» и не требует ухода, как например, масло.

Учитывая перечисленные свойства элегаза, в выключателях применяют простые конструкции дугогасительных устройств при небольшом числе разрывов и малой длительности горения дуги.

Благодаря более высокой плотности теплопередающая способность элегаза также оказывается намного лучшей по сравнению с воздухом.

Высокие электрическая прочность и теплопередающие свойства элегаза определяют и его прекрасную дугогасительную способность, что позволяет отключать в элегазе мощности в 70 – 100 раз боль-

шие, чем в воздухе. Этот газ не токсичен, химически нейтрален к конструкционным материалам, пожаробезопасен, имеет относительно низкую температуру сжижения.

Первые комплектно-распределительные устройства с элегазовой изоляцией появились на мировом рынке в середине 60-х годов XX века.

За прошедшие десятилетия число КРУЭ, установленных в различных странах, резко возросло несмотря на то, что при рабочем напряжении до 380 В стоимость этих устройств все еще в 1,2 – 1,5 раза превышает затраты на изготовление традиционных конструкций.

ВЭИ совместно с Ровенским заводом высоковольтной аппаратуры создали элегазовый выключатель на напряжение 10 кВ [6].

В 1996 году ВЭИ совместно с АО «Мосэнерго» разработали элегазовый выключатель 10 кВ усовершенствованной конструкции (рис. 3.1), его изготовление осуществили на опытном заводе ВЭИ.

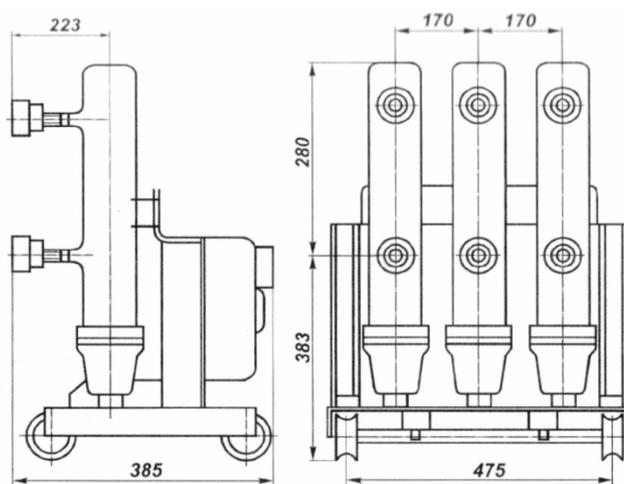


Рис. 3.1. Выключатель элегазовый 10 кВ, установленный на тележке выключателя SCS 4-12/20 (Германия) в ячейке SCJM-1-12/16

Выключатель элегазовый ВЭГ-10-20-630 предназначен для установки в ячейку КРУ с применением используемого в ней пружинного привода. Выключатель – горшкового типа, трёхфазный на напряжение 10 кВ с током отключения 20 кА и номинальным током 630 А.

Преимущества выключателя:

- увеличение коммутационного и механического ресурса (при токе 20 кА коммутационная износостойкость 40 операций «О» или 20 «О» и 20 «В», при номинальном токе 630 А – 1000 операций; механический ресурс – 3000 циклов ВО);
- снижение эксплуатационных затрат;
- уменьшение удельной материалоемкости.

При давлении 0,2 МПа электрическая прочность элегаза приближается к прочности трансформаторного масла. Недостатком элегаза является высокая температура сжижения. При давлении 1,5 МПа температура сжижения газа составляет всего 6 °С. Чтобы избежать сжижения газа, специальная схема автоматики и нагреватель обеспечивают необходимую постоянную температуру газа.

Наиболее эффективно элегаз используется в том случае, когда струя газа с большой скоростью омывает горящую дугу.

Охлаждение дуги потоком газа можно получить в дугогасительном устройстве с автопневматическим дутьём и дутьём, создающимся при переходе газа из бака с высоким давлением (1,5...2 МПа) в бак с низким давлением (0,2 МПа) – система с двойным давлением.

Выключатели со сжатым элегазом выполняются обычно с небольшим избыточным давлением 0,2...0,4 МПа. Наиболее широко применяются конструкции с автопневматическим или магнитным дутьём.

Схема дугогасительного устройства с магнитным дутьём приведена на рис. 3.2, а. Устройство размещается в изоляционном цилиндре 1, наполненном элегазом (SF_6). На дугу, возникающую между расходящимися контактами 2 и 3, действует радиальное магнитное поле, создаваемое постоянными машинами 4 (или последовательной катушкой). Дуга быстро перемещается по окружности, усиленно охлаж-

дается и гаснет. Такие устройства применяются в выключателях нагрузки. Схема дугогасительного устройства с автопневматическим продольным дутьём приведена на

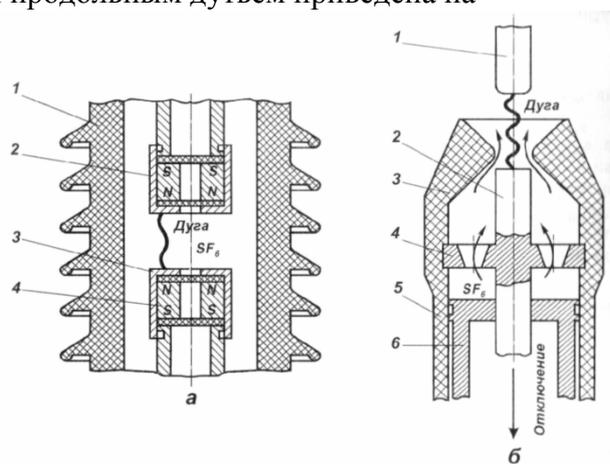


Рис. 3.2. Примеры дугогасительных устройств элегазовых выключателей:
а – дугогасительное устройство с магнитным дутьём; *1* – изоляционный цилиндр;
2 и *3* – контакты; *4* – постоянный магнит, создающий радиальное магнитное поле;
б – то же с автопневматическим дутьём; *1* – неподвижный контакт;
2 – подвижный контакт; *3* – изоляционное сопло; *4* – перегородка;
5 – изоляционный цилиндр; *6* – поршень

рис. 3.2, *б*. Подвижный контакт *2* вместе с изоляционным соплом *3*, перегородкой *4* и цилиндром *5*, отходя от неподвижного контакта *1*, надвигается на поршень *6*. Элегаз через отверстия в перегородке и через сопло омывает дугу с большой скоростью и гасит её.

Внедрение элегазовых выключателей в мире приведено в табл. 3.1 и на рис. 3.3.

3.1. Внедрение элегазовых выключателей в странах мира

Страна, фирма	Наибольшее рабочее напряжение, кВ	Номинальный ток отключения, кА	Номинальный ток, А
Россия, ВЭИ	12	50	3150
	24	100	1600
	40,5	31,5	2500
США, «Westinghouse»	12	50	3150
		31,5	3150
Япония, «Toshiba»	12	50	3150
	24	25	2000
	36	25	2000
	13,8	100	3000
Япония, «Mitsubishi Electric»	15/12	37/50	3000
	25,8	31,5	2000
	38	31,5	2000
Германия, «Siemens»	15	63	4000
	24	25	2000
	36	31,5	2500

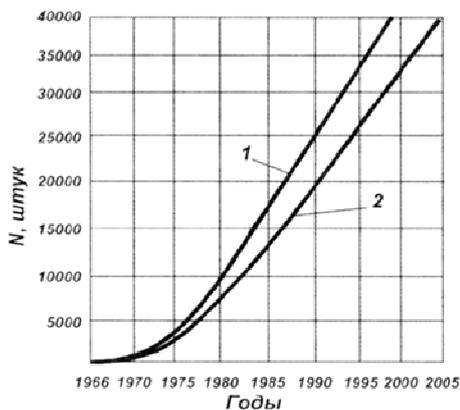


Рис. 3.3. Число отдельно стоящих выключателей (1) и распределительных устройств (2) с элегазовой изоляцией, установленных в различных странах мира

Полюс элегазового выключателя представляет собой герметичный заземлённый металлический резервуар, в котором размещено дугогасительное устройство. Резервуар заполнен сжатым элегазом (в выключателях серии ЯЭ на напряжение 110 кВ номинальное давление элегаза 0,6 МПа). Конструктивная схема одного разрыва автоматического дугогасительного устройства элегазового выключателя приведена на рис. 3.4. Во включённом положении (рис. 3.4, а) ламели главного подвижного контакта 3 плотно охватывают неподвижный трубчатый контакт 1, создавая цепь электрическому току. В процессе отключения выключателя (рис. 3.4, б) подвижная система, состоящая из цилиндра 4, подвижного контакта 3 и фторопластового сопла 2, опускается вниз, при этом элегаз, находящийся в полости А неподвижного цилиндра 5, сжимается, и давление в этой полости повышается. Сжатый газ направляется в зону дуги и гасит её по выходе контакта 1 из сопла 2. Таким образом, элегазовый выключатель работает без выброса газа наружу; гашение дуги происходит быстро (20...25 мс) с выделением лишь незначительного количества энергии, генерируемой дугой.

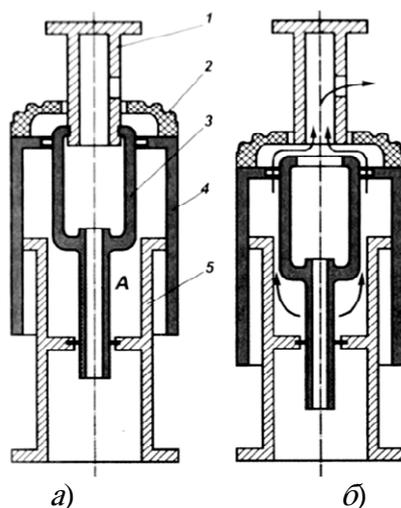


Рис. 3.4. Автопневматическое дугогасительное устройство элегазового выключателя 1 КВ:

а — в положении «включено»; б — в процессе отключения (подвижные части зачернены, неподвижные заштрихованы)

Электрическая дуга частично разлагает элегаз. Основная масса продуктов разложения рекомбинирует (восстанавливается), оставшаяся часть поглощается фильтрами-поглотителями, встроенными в резервуары выключателей. Продукты разложения, не поглощенные фильтрами, взаимодействуют с влагой, кислородом и парами металла и в небольших количествах выпадают в выключателях в виде тонкого слоя порошка. Сухой порошок — хороший диэлектрик.

Подвижные части дугогасительного устройства выключателя перемещаются изоляционной тягой, связанной с пневматическим приводом, шток которого входит в резервуар. Дугогасительное устройство крепится к стенкам резервуара с помощью эпоксидных опорных изоляторов специальной конструкции.

Нельзя выполнять операции под напряжением аппаратами, находящимися в объёмах с пониженным давлением элегаза. Пребывание в помещении РУ персонала в этом случае возможно только при включённой приточно-вытяжной вентиляции и применении индивидуальных средств защиты.

Заметим, что КРУЭ практически не требуют технического обслуживания. Изоляция в них не теряет своих свойств из-за атмосферных загрязнений, что исключает необходимость периодической очистки изоляции. Такие элементы, как сборные шины, измерительные трансформаторы, вообще не требуют ремонта. Интервалы между планово-предупредительными ремонтами коммутационных аппаратов, определяемые механической прочностью подвижных систем и свойствами деталей, подверженных старению, устанавливаются от 5 до 10 лет.

Контроль осуществляют при помощи манометров и проверяют при осмотрах оборудования.

В случае утечки элегаза пополнение секции сухим элегазом осуществляется с помощью передвижной установки из баллонов с элегазом, которые через редуктор и влагопоглощающий фильтр подключаются через вентиль к секции.

В аварийной ситуации при возникновении дуги и чрезмерном повышении давления внутри оболочки разрывается специальная защитная мембрана, давление в секции сбрасывается, и тем самым предотвращается разрушение оболочки. В остальных секциях КРУЭ давление сохраняется нормальным.

Элементы оборудования, оболочки которых повреждены, должны выводиться из работы в соответствии с инструкциями.

На предприятии-изготовителе выключатель заполняют элегазом до номинального избыточного давления 0,45 МПа, затем проводят приёмо-сдаточные испытания выключателя с приводом. Заказчику выключатель и привод поставляют в отдельной упаковке.

При создании нового элегазового выключателя большое внимание уделяется конструкции его дугогасительного устройства. После проведения теоретического анализа существующих конструкций дугогасительных устройств и длительных коммутационных исследований работы выключателя было разработано дугогасительное устройство, в основе которого лежал принцип вращения электрической дуги под воздействием электромагнитного поля. При отключении выключателя его подвижный контакт замыкается с неподвижным. По мере перемещения подвижного контакта электрическая дуга перебрасывается на проводящий цилиндрический корпус дугогасящей катушки и горит между внутренней поверхностью корпуса катушки и дугостойким наконечником подвижного контакта. Ток при этом протекает по виткам катушки, создавая электромагнитное поле, под влиянием которого электрическая дуга начинает вращаться. Интенсивность воздействия на дугу электромагнитного поля, а следовательно, и скорость её перемещения в элегазе зависят от величины отключаемого тока. Такой способ гашения электрической дуги отличается от существующих «мягким» воздействием на неё дугогасящих факторов, что позволяет отключать без перенапряжений как нагрузочные токи (во всем диапазоне), так и токи короткого замыкания.

Полос ячейки КРУЭ 110 кВ со схемой электрических соединений приведен на рис. 3.5.

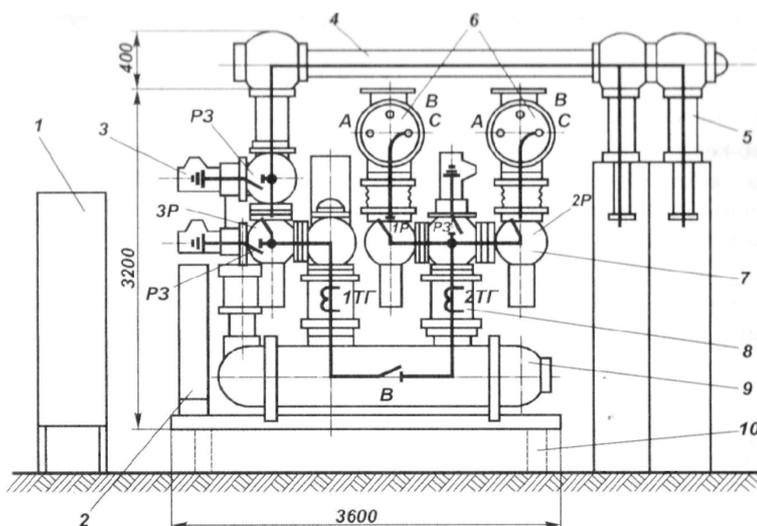


Рис. 3.5. Полос ячейки КРУЭ 110 кВ со схемой электрических соединений:

1 – распределительный шкаф; 2 – полюсный шкаф; 3 – разъединитель заземляющий (РЗ); 4 – элегазовый токопровод; 5 – кабельный ввод; 6 – сборные шины; 7 – разъединители (1Р, 2Р – шинные, 3Р – линейные); 8 – трансформатор тока; 9 – элегазовый выключатель с одним разрывом; 10 – фундамент ячейки

Комплектуют КРУЭ из стационарных электрических элементов (выключателей, разъединителей, заземлителей, трансформаторов тока и напряжения, сборных шин), помещённых в герметизированные заземлённые металлические оболочки, заполненные элегазом под давлением. Оболочки отдельных элементов соединяют между собой при помощи фланцев с уплотнениями из синтетического каучука, этиленпропилена и других материалов. Внутренние объёмы оболочек некоторых элементов сообщаются между собой. В целом КРУЭ секционированы по газу. Каждая секция имеет свою контрольно-измерительную аппаратуру. Значение давления элегаза в КРУЭ выбирают с учётом создания необходимой электрической прочности. Так, для аппаратов напряжением 110 кВ при температуре 20 °С необходимый уровень электрической прочности в наиболее слабых местах обеспечивается при абсолютном давлении 0,25 МПа. В секциях выключателей элегаз обычно находится под большим давлением, чем в других секциях. В эксплуатации секции заполняют элегазом под давлением до 110 % от номинального. Утечки газа составляют менее 5 % в год. Давление в секциях контролируют по показаниям манометров или плотномеров при значительных колебаниях температуры окружающей среды.

Ошибочные операции в КРУЭ, как правило, исключены благодаря применению электрических и механических блокировок.

Положение коммутационных аппаратов проверяют по указателям положения, механически связанным с подвижными системами аппаратов. Предусмотрены также сигнализация лампами и возможность наблюдения за положением подвижных контактов через смотровые окна.

Обслуживание КРУЭ сводится главным образом к контролю давления в секциях и пополнению их элегазом. Герметизация КРУЭ полностью исключает необходимость периодических чисток изоляции.

Перед демонтажем элементов для ремонта элегаз из секций удаляют при помощи специальных передвижных установок. Ранее отмечалось, что хотя элегаз не токсичен, однако при вскрытии элегазовых аппаратов внутренние объёмы их предварительно следует проветрить. При наличии на деталях и стенках оболочек налёта в виде белого или сероватого порошка – химических продуктов, образующихся в результате горения в элегазе дуги, его удаляют.

В КРУ следует поддерживать микроклимат с относительной влажностью воздуха 60...70 %. Для этого шкафы утепляют минераловатными плитами и оборудуют электроподогревателями, которые должны автоматически включаться, когда относительная влажность превышает 65...70 %.

Положение элегазовых выключателей определяется по механическому указателю положения. При обслуживании элегазовых установок персоналу следует помнить, что элегаз в пять раз тяжелее воздуха и при утечках скапливается на уровне пола и в других местах (подвалах, траншеях, кабельных каналах). Обслуживающий персонал, находясь в таких местах, может почувствовать недостаток кислорода и удушье. Безопасный уровень концентрации чистого (не загрязнённого продуктами разложения) элегаза в помещении – не более 0,1 % (5000 мг/м³), а при кратковременном пребывании обслуживающего персонала – до 1 %. В среде с большой концентрацией элегаза человек может внезапно потерять сознание без каких-либо тревожных симптомов. Чтобы избежать этого, необходимо обеспечить доступ свежего воздуха.

Проведение работ (в том числе и операционных переключений) в помещениях РУ, где обнаружена утечка элегаза, возможно только при включенной приточно-вытяжной вентиляции и применении средств индивидуальной защиты. Это объясняется тем, что выбросы элегаза в атмосферу в случае прожигания резервуаров выключателя, разрывов предохранительных мембран и в других подобных ситуациях могут быть загрязнены продуктами разложения. В продуктах разложения элегаза электрической дугой содержатся активные высокотоксичные фториды и сернистые соединения.

Наличие продуктов разложения можно обнаружить по неприятному едкому запаху. Эти химические соединения в газообразном и твёрдом состояниях чрезвычайно опасны для человека.

3.2. ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ 35 кВ ФИРМЫ «ЭЛТЕК», (Екатеринбург)

Элегазовые выключатели применяют в РУ 35. Гашение дуги в них происходит в среде элегаза, обладающего высокими дугогасительными свойствами. В этих выключателях применяется электромагнитное дутьё, вращающее дугу. Их контактная система помещается внутри фарфорового корпуса, герметически закрытого и заполненного элегазом.

Разработаны конструкции элегазовых выключателей ВНЭ на напряжение 35 и 110 кВ, номинальные токи до 1250 А и токи отключения 31,5 кА.

Достоинствами элегазовых выключателей являются пожаро- и взрывобезопасность и быстрота действия.

Элегазовый выключатель типа ВГБ-35 (рис. 3.6). В настоящее время в научно-производственном объединении «Уралэлектротяжмаш» производятся новые элегазовые выключатели наружной установки ВГБ-35. Эти выключатели предназначены для широкого применения в различных энергетических установках взамен морально устаревших масляных баковых выключателей С-35М-630-10 и ВТ-35.

Выключатель представляет собой комплексный аппарат, состоящий из собственно выключателя, привода и встроенных трансформаторов тока.

В металлическом заземлённом баке 1 на изоляционных дисках размещены дугогасительные устройства всех трёх полюсов выключателя с неподвижными контактами. Последние токоведущими шинами связаны с нижними выводами 3 проходных изоляторов, токоведущие стержни которых являются одновременно первичным витком встроенных трансформаторов тока 2.

Подвижные контакты выключателя закреплены на поворотной изоляционной траверсе, насаженной на вал выключателя.

Трансформатор тока, расположенный в защитном колпаке, представляет собой блок, состоящий из измерительного и защитного трансформаторов и клеммного ряда, на который выведены все отводы от вторичных обмоток. Каждый трансформатор тока рассчитан на первичный номинальный ток 50...600 А.

В коробке механизма 4 размещены вал, отключающие пружины, демпферы и промежуточный рычаг, предназначенный для связи механизма с приводом.

В полости между нижней частью бака и опорной плитой расположено подогревательное устройство 9, предназначенное для выключателей (исполнение УХЛ1), работающих в суровых климатических условиях (при температуре воздуха ниже -45°C).

На боковой стенке бака крепится сигнализатор давления элегаза 7, снабжённый устройством компенсации температуры, позволяющим автоматически приводить показания сигнализатора к температуре $+20^{\circ}\text{C}$. Сигнализатор имеет шкалу со стрелкой и две пары нормально замкнутых контактов, дающих возможность не только осуществлять визуальный контроль за давлением элегаза в баке, но и подавать

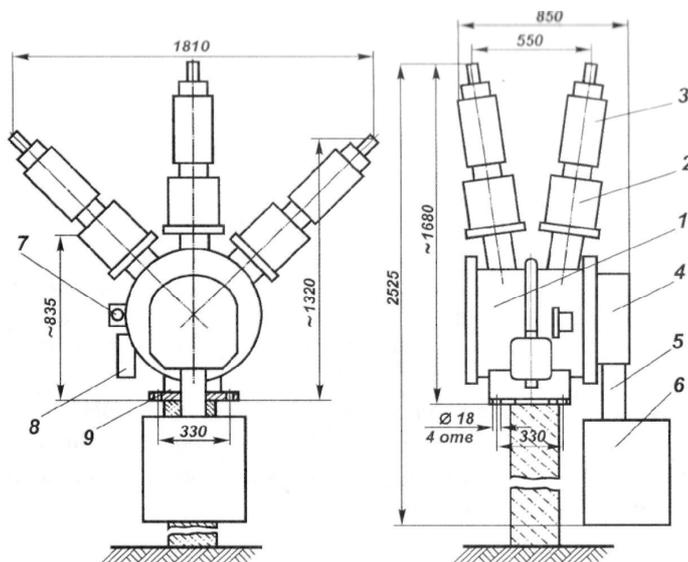


Рис. 3.6. Выключатель ВГБ-35:

1 – бак; 2 – трансформаторы тока; 3 – вводы; 4 – вал выключателя;
5 – переходная труба; 6 – шкаф с приводом; 7 – сигнализатор давления элегаза; 8 – клеммная коробка; 9 – подогревательное устройство

предупредительный сигнал при снижении давления до 0,33 МПа, а при давлении ниже 0,3 МПа – автоматически отключать выключатель.

На клеммную коробку 8 выведены провода от сигнализатора давления, подогревательного устройства и от каждого трансформатора тока по два провода.

К нижней части коробки механизма 4 подвешен шкаф с приводом б, расположенный на переходной трубе 5. На днище шкафа установлены две кабельные муфты, предназначенные для подвода цепей управления и сигнализации привода.

Основные технические характеристики выключателя ВГБ-35:

Номинальное напряжение, кВ.....	35
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	40,5
Номинальный ток, А	630
Номинальный ток отключения, кА.....	12,5
Ток термической стойкости (3 с), кА	12,5
Сквозной ток короткого замыкания (наибольшее значение), кА.....	35
Собственное время, с:	
отключения.....	0,04
включения	0,1
Полное время отключения, с.....	0,07
Ёмкостный ток одиночной конденсаторной батареи, отключаемый без повторных пробоев, А.....	60-600
Номинальное избыточное давление элегаза (давление заполнения) при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, МПа	0,45
Минимальное рабочее избыточное давление элегаза при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, МПа	0,3
Периодичность подпитки элегазом, лет.....	15
Срок службы до среднего ремонта, лет	15
Механический ресурс (число операций «включить-отключить»)	5000
Коммутационный ресурс (число операций отключения):	
при номинальном токе $I_{\text{ном}}$	2000
при 60...100 % $I_{\text{мах откл}}$	33
Ток, потребляемый электромагнитным приводом выключателя, А:	
при включении.....	50
при отключении	2,5
Масса, кг:	
выключателя.....	800
элегаза	4

Выключатели комплектуют электромагнитным приводом постоянного тока. Для того чтобы обеспечить питание включающего электромагнита от источника переменного тока, в шкаф с приводом установлен однофазный двухполупериодный выпрямитель.

Комплектуют выключатель приводом на оперативном переменном токе. Разработаны два конструктивных варианта такого привода: пружинный и модифицированный электромагнитный привод с тремя отключающими элементами на переменном токе (аналогичными реле пружинного привода ПП-67) и отключающим электромагнитом, питание которого осуществляется как от источника постоянного тока, так и от источника переменного тока через установленный на приводе выпрямитель. Электромагнитный привод снабжён пружинным устройством, предназначенным для первого оперативного включения выключателя при полном отсутствии электропитания вторичных цепей. Такая конструкция привода сочетает простоту и надёжность электромагнитного привода с автономностью пружинного.

На предприятии-изготовителе выключатель заполняют элегазом до номинального избыточного давления 0,45 МПа, затем проводят приёмо-сдаточные испытания выключателя с приводом. Заказчику выключатель и привод поставляют в отдельной упаковке.

Быстрое перемещение основания электрической дуги по поверхности электродов, а также отсутствие изоляционных сопел, применяемых в других конструкциях дугогасительных устройств, существенно увеличивают коммутационный ресурс выключателя.

Рациональная конструкция выключателя позволяет вдвое снизить затраты энергии на его включение (по сравнению с масляными выключателями напряжением 35 и 10 кВ), что повышает надёжность и облегчает работу привода.

Элегазовые выключатели ВГБ-35 по сравнению с другими типами выключателей имеют следующие преимущества:

➤ высокую заводскую готовность, обеспечивающую их простой и быстрый монтаж (выключатели отгружают с завода-изготовителя полностью отрегулированными и заполненными элегазом под рабочим давлением, в результате при пуске в эксплуатацию они не требуют проведения газотехнологических работ);

➤ небольшую массу и малые габариты (отсутствие динамических нагрузок на фундамент выключателя при коммутации токов КЗ позволяет применять для его установки легкие каркасы (КТП) и фундаменты (одна опора));

➤ большие механический и коммутационный ресурсы, обеспечивающие работу выключателя практически без ремонта в течение всего срока его эксплуатации;

➤ способность отключать ёмкостные токи без повторных электрических пробоев;

➤ высокую надёжность (при снижении избыточного давления элегаза до нуля выключатель выдерживает полуторакратное напряжение промышленной частоты и может отключить нагрузочный ток);

➤ взрыво- и пожаробезопасность;

➤ экологическую чистоту при эксплуатации.

В зависимости от климатических условий (от районов Крайнего Севера до районов с тропическим климатом) выключатели имеют различные исполнения (УХЛ1, У1, Т1).

Первая опытно-промышленная партия выключателей ВГБ-35 была изготовлена в 1991 г. Эксплуатация этих выключателей осуществляется в суровых условиях Западной Сибири и Урала.

Промышленный выпуск новых элегазовых выключателей начат с 1992 г.

Выключатель элегазовый типа ВГБХ-35Х-12,5/630 Х1 (рис. 3.7).

Разработчик и изготовитель – фирма «Элтек» («Уралэлектротяжмаш»), г. Екатеринбург.

Предназначен для эксплуатации в электрических сетях переменного тока частоты 50 и 60 Гц с номинальным напряжением 35 кВ, применяется на электрических станциях и подстанциях.

Условия эксплуатации:

➤ высота над уровнем моря до 1000 м; верхнее рабочее и эффективное значения температуры окружающего воздуха для исполнения У1 и ХЛ1 равны 40 °С, для исполнения Т1 – 45 °С;

➤ нижнее рабочее значение температуры окружающего воздуха для исполнения У1 – -45°С, ХЛ1 – -60°С, Т1 – -10 °С;

➤ окружающая среда невзрывоопасная;

➤ выключатель нормально работает в условиях гололеда при толщине корки льда до 20 мм и при ветре со скоростью до 15 м/с, а при отсутствии гололеда – при ветре со скоростью до 40 м/с.

Выключатель состоит из металлического заземлённого бака, на котором установлены шесть вводов. Каждый ввод снабжён двумя встроенными трансформаторами тока, из которых один – измерительный, другой – для релейной защиты.

Внутри бака расположены подвижные и неподвижные контакты, а так же дугогасительные устройства, основанные на принципе гашения дуги путем ее вращения в магнитном поле.

Выключатели могут управляться различными приводами: электромагнитным постоянного тока, пружинным на оперативном переменном токе со встроенными реле прямого действия и моторно-пружинным. Имеют устройство автоматического контроля давления элегаза, снабжённое электрическими контактами для сигнализации и блокировки цепей управления. Могут быть использованы для отключения ёмкостных токов конденсаторных батарей 60...600 А. Аппараты, предназначенные для работы в холодном климате (при температуре ниже -45°С), обеспечены подогревом. При установке выключателей в районах с умеренным климатом подогрев элегаза не требуется. Элегазовые выключатели имеют следующие преимущества: высокие коммутационный и механический ресурсы; высокую заводскую готовность (поставляются отрегулированными и заполненными элегазом на 15 лет эксплуатации); минимум обслуживания; отсутствие загрязнения окружающей среды; низкие эксплуатационные затраты; пожаро- и взрывобезопасность.

Технические характеристики выключателя ВГБХ-35Х-12,5/630 Х1:

Номинальное напряжение, кВ.....	35	
Номинальный ток, А.....	630	
Номинальный ток отключения, кА.....	12,5	
Ток, кА:		
термической стойкости.....	12,5	электродинамической стойкости 35
Ресурс по коммутационной стойкости:		
при токах в диапазоне более 60 до 100 %		
номинального тока отключения,		
число циклов «О».....	33	при номинальном токе,
число циклов «О».....	2000	
Ресурс по механической износостойкости, число циклов «ВО»	5000	
Габаритные размеры, мм:		
длина.....	850	
высота.....	1680	
.....	(2490 с приводом)	
ширина.....	1810	
Масса, кг.....	720	

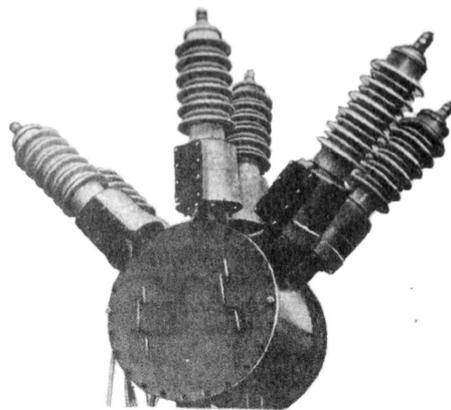


Рис. 3.7. Выключатель типа ВГБХ-35Х-12. 5/630 Х1 (внешний вид)

**Структура условного обозначения выключателя
ВГБХ-35Х12, 5/630 Х1**



3.3. ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ТИПА ВФ (ФИРМА «АВВ», ШВЕЦИЯ)

Выключатели с элегазом лучше всего соответствуют высоким и разнообразным требованиям, предъявляемым в настоящее время к выключателям для напряжения 7,2...38 кВ, так как они отличаются:

- высокой надёжностью;
- возможностью применения на всех местах сетей;
- большим сроком службы;
- минимальными требованиями к обслуживанию, контролю и ревизии;
- простой манипуляцией в результате небольшой массы.

Выключатели этого нового типового ряда обладают отличными качествами и целым рядом преимуществ, гарантирующих высокий уровень их потребительской стоимости:

- изоляционная и гасящая среда элегаза (SF_6) является негорючей и нетоксичной;
- с помощью фронтально установленного манометра можно в любое время проводить контроль избыточного давления газа SF_6 ;
- замкнутая гасящая система имеет отдельный токопроводящий путь для номинального тока и тока выключения;
- надёжное выключение в целом диапазоне токов;
- гашение вращающейся дуги гарантирует минимальное обгорание контактов, высокое значение токов выключения и длинные интервалы без ревизий;
- надёжное выключение тоже низких токов без отрыва тока вне его нулевого значения и без образования перенапряжения;
- выключатели оправдали себя на всех местах сетей, наружных и кабельных, к которым предъявляются высокие требования;
- низкие требования относительно энергии привода, так как при гашении используется собственная энергия дуги;
- лёгкий аккумуляторный привод обладает аккумулированной энергией для последовательности «О-С-О» («выкл. – включ. – выкл.»);
- если для последующего выключения энергия ещё не аккумулирована, включение автоматически заблокировано;
- механическая блокировка привода от откачки;
- ручное или моторное аккумулирование энергии привода.

Выключатели типового ряда ВФ соответствуют требованиям Международного стандарта IEC 56, стандарта CSN 35 4220 «Выключатели высокого напряжения и сверхвысокого напряжения», а также стандартов VDE ANSI.

Выключатели ВФ предназначены для внутренней обыкновенной среды согласно IEC 56-4 и CSN 35 4220 (от -10 до $+35^\circ C$).

Геометрические размеры выключателя типа ВФ представлены на рис. 3.8, основные технические данные – в табл. 3.2.

Выключатели типового ряда ВФ представляют собой трехполюсные силовые выключатели с изоляционной и гасящей средой элегаза.

Они отличаются столбовой конструкцией с фронтально установленным приводом. Эта концепция позволяет использовать их в распределительных шкафах и в закрытых распределительных устройствах с камерами.

Полюсные блоки устанавливаются на общем основном корпусе, в котором установлен механизм для передачи энергии от привода на контактные стержни.

Пространство всех трех полюсных блоков соединено основным корпусом и наполняется с помощью одного впускного клапана.

Конструкция верхней головки полюса одинакова для выключателей до 25 кВ и 31,5 кА. Для номинального тока до 1250 А она представляет собой эпоксидную отливку с токопроводящим залитым элементом, для номинального тока до 2500 А она изготовлена из алюминиевой отливки с охлаждающими

ребрами и дополнительным охладителем. У выключателей 38 кВ и выключателей 12 кВ для 40 кА верхним выводом является полая алюминиевая отливка.

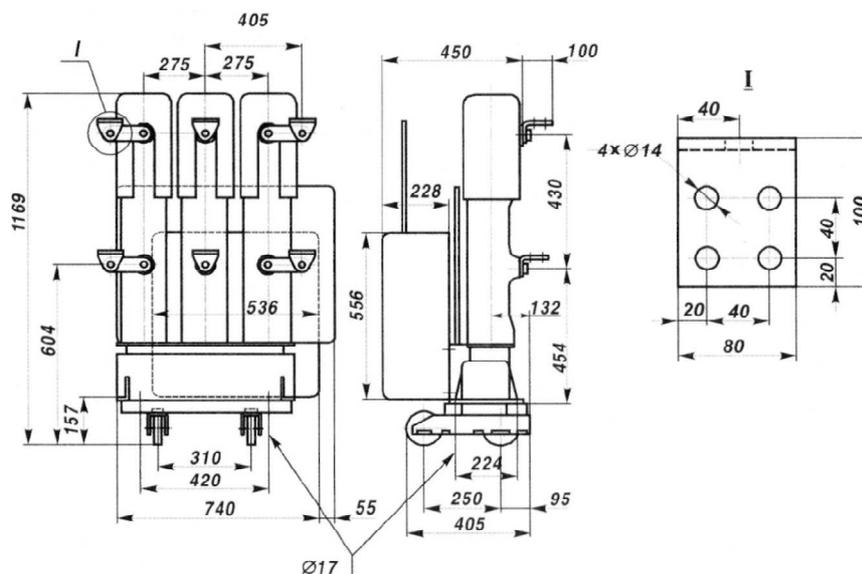


Рис. 3.8. Геометрические размеры выключателя типа ВФ-12-38 кВ

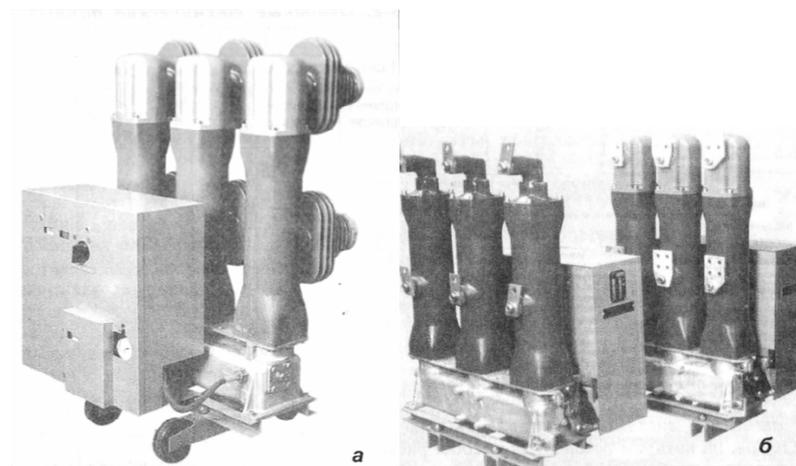


Рис. 3.9. Выключатель типа ВФ-12-38 кВ фирмы «АВВ»
(номинальный ток 800...2500 А, ток термической стойкости 16...40 кА):

а – вид сбоку из коридора управления; *б* – вид спереди

3.2. Основные технические данные выключателей типа ВФ

Тип ВФ	Напряжение, кВ		Номинальный ток, кА				
	номинальное	испытательное	А	малой продолжительности 3 с	выключения	ударный	включения
12.08.16	12	35/75	800	20	16	63	63
12.12.16	12	35/75	1250	20	16	63	63
12.08.31	12	35/75	800	31,5	31,5*	80	80
12.12.31	12	35/75	1250	31,5	31,5*	80	80
12.25.31	12	35/75	2500	31,5	31,5*	80	80
12.12.40	12	35/75	1250	43,5	40**	110	110
12.20.40	12	35/75	2000	43,5	40**	110	110
25.08.16	25	55/125	800	16	16	50	50
25.12.16	25	55/125	1250	16	16	50	50

25.08.25	25	55/125	800	25	25	80	80
25.12.25	25	55/125	1250	25	25	80	80
25.25.25	25	55/125	2500	25	25	80	80
38.08.16	38	80/180	800	20	16	50	50
38.12.16	38	80/180	1250	20	16	50	50
38.16.16	38	80/180	1600	20	16	50	50

Примечания:

Номинальная частота – 50/60 Гц;

Полное время включения – 50 мс;

Полное время отключения 75 мс;

* в цикле О-О, 3 с СО – 3 мин – СО 25 кА;

** при номинальном напряжении 7,2 кВ 43,5 кА;

Номинальное давление газа 0,6 МПа / 20°С.

Выключатели для закрытых распределительных устройств с камерами оснащены передвижным шасси, токопроводящими выводами являются присоединительные петушки. В распределительных шкафах основное исполнение выключателя установлено на передвижном шасси с фронтальной панелью, и токопроводящие выводы оснащены выдвижными контактами.

Выключатель оснащён аккумуляторным пружинным приводом, прикрепленным к основному корпусу и соединенным с помощью регулируемой тяги с общим валом полюсных блоков. В раме привода встроен комплект приводного механизма, в том числе принадлежности, в число которых входят элементы управления, вспомогательный выключатель, электромикродвигатель для аккумуляции энергии пружин, показатели состояния выключателя и состояния пружин и счётчики включения. Привод имеет одну систему концентрических пружин сжатия, предназначенных для включения и выключения. Энергия аккумулируется в пружинах с помощью электромикродвигателя или вручную – с помощью ручки – примерно 45 оборотов для полного аккумуляирования. Полностью сжатые пружины обладают энергией для коммутационной последовательности О-С-О (выключ.-включ.-выключ.). В случае последовательности С-О (включ.-выключ.) дальнейшее включение заблокировано, если не произошло дополнительное аккумуляирование энергии пружин для возможности непосредственного выключения. Конструкция привода позволяет механическую блокировку от нежелательного повторного выключения и включения при постоянной команде «включение».

3.4. ЭЛЕГАЗОВЫЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ ТИПА НВ

Второй тип магнитной системы представлен выключателем типа НВ фирмы «Merlin Gevin», на котором остановимся особо (рис. 3.10), так как он использован в конструкции ВЭИ.

В нем, как уже выше упоминалось, используется комбинированный принцип гашения дуги. При размыкании подвижного контакта *б* с пальцами неподвижного контакта *З* между ними образуется дуга, которая быстро переходит с пальцев на дугоприемное кольцо *4*.

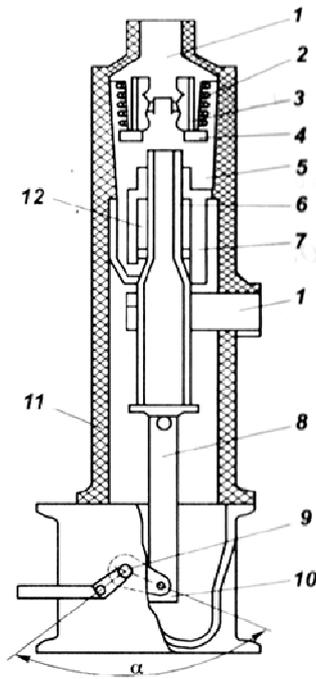


Рис. 3.10. Принципиальное устройство полюса выключателя типа НВ:

1 – токопроводы; 2 – катушка «магнитного дутья»; 3 – пальцы неподвижного контакта; 4 – дугоприёмный электрод; 5 – область автогенерации давления; 6 – подвижный контакт; 7 – поршень; 8 – изоляционная тяга; 9 – вал; 10 – приводной рычаг; 11 – корпус полюса; 12 – цилиндр автокомпрессионного устройства

При этом в цепь включается катушка 2, которая с одной стороны присоединена к дугоприемному электроду 4, а с другой – к верхнему токоподводу 1. Ток, протекающий по катушке, создаёт магнитное поле, под действием которого дуга начинает вращаться; её опорные точки скользят по поверхности электрода 7 и торса контакта б.

Энергия, выделяемая в дуге, разогревает элегаз в объёме 5, давление элегаза растёт и образуется поток элегаза через контакт б в нижнюю полость полюса. Этот поток обдувает дугу и гасит её в один из переходов через нуль. Отключению небольших токов, при которых магнитное поле мало и энергия, выделяемая в дуге недостаточна для автогенерирования необходимого потока, способствует автокомпрессионный поток, который создаётся при движении поршня 7 в цилиндре сжатия 12 (поршень 7 жёстко связан с подвижным контактом б). Так как поршень 7 служит лишь для создания небольшого поддува при отключении малых токов, его использование не вызывает значительных нагрузок на привод. Такая конструкция обладает рядом преимуществ. Расположение дугогасительных контактов вне катушки магнитного дутья позволяет выполнить их больших размеров, увеличивается ход системы, появляется возможность осуществить аксиальное дутьё.

Всё это приводит к увеличению номинального рабочего напряжения и отключающей способности, что позволяет использовать данную конструкцию как прототип выключателя на 10 кВ с током отключения до 20 кА. Некоторым недостатком таких конструкций является то, что распределение индукции магнитного поля менее организовано, дуга вращается в полях рассеяния.

Передача движения от привода к дугогасительному устройству в конструкции прототипа осуществляется изоляционной тягой. Поступательное движение тяги обеспечивается поворотом вала 9 на определённый угол. Как показала практика конструирования автокомпрессионных выключателей с аналогичным вводом движения, уплотнение при вращательном движении более надёжно, чем при поступательном; все это позволяет получить малые утечки газа и использовать общий вал для управления всеми полюсами выключателя. Корпус дугогасительного устройства выключателя при серийном производстве целесообразно изготавливать из литевой смолы. Увеличение номинального тока достигается применением радиаторов на вводах и усилением втычных контактов.

3.5. ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ФИРМЫ «SIEMENS» (Германия)

Выключатели нагрузки элегазовые до 24 кВ (рис. 3.11 – 3.13) входят в состав КРУ.

Основные технические характеристики КРУ фирмы «Siemens»:

Номинальное напряжение, кВ..... 6; 10
 Номинальное рабочее напряжение, кВ 7,2; 12
 Номинальная сила тока:
 главных цепей, А 630; 800; 1000; 1600

сборных шин, А 1600; 2000 3150
отключения выключателя, кА 8; 12,5; 20; 31,5
VD4; VF:16; 31,5; 40; 50
термической стойкости, кА 8; 12,5; 20; 31,5
VD4; VF:16; 31,5; 40; 50

Время протекания тока
термической стойкости, с:
для главных цепей 3
для заземляющих
разъединителей 1

Номинальная сила тока
электродинамической стойкости, кА ... 20,4; 32; 51; 81
VD4; VF:80; 110; 125

Номинальное напряжение
вспомогательных цепей
(постоянный/переменный ток), В 24; 48; 60; 110; 220/110;
220

Уровень изоляции..... нормальная
Вид изоляции воздушная
Наличие изоляции токоведущих частей неизолированные шины
Наличие выдвигаемых элементов
в шкафах с выдвигаемыми элементами;
без выдвигаемых элементов

Вид линейных высоковольтных
подсоединений..... кабельные; шинные

Условия обслуживания двухстороннее

Степень защиты шкафа..... IP20

Вид управления местное; дистанционное

Наличие дверей в отсеке выдвижного
элемента шкафа с дверьми; без дверей

Вид основных шкафов в зависимости
от встраиваемой аппаратуры
и присоединения..... с выключателем
высокого напряжения; с разъемными контактами главной цепи;
с трансформаторами с. н.; с трансформаторами напряжения; с
шинными вводами; с кабельными выводами; с предохранителя-
ми; со статическими конденсаторами; с разрядниками: со вспо-
могательным оборудованием и аппаратурой; комбинированные;
с аппаратурой частичного замыкания нейтрали в сети б...
10 кВ; с R–С цепями; с низковольтной аппаратурой

Тип встроенного выключателя:

маломасляный с пружинным
приводом ВК-10
маломасляный с электромагнитным
приводом ВКЭ-10
вакуумный с электромагнитным
приводом ВВЭ-10; ВВ/TEL-10 вакуумный с пружинным приводом
VD4 (идет
подготовка к производству КРУ с этим выключателем)
элегазовый с пружинным приводом VF

При использовании для защиты трансформаторного присоединения высоковольтных предохра-
нителей других изготовителей следует обращать внимание на следующее.

Размещение предохранителей внутри камер приводит к тому, что их длительно допустимый в экс-
плуатации рабочий ток должен быть меньше номинального тока. Допустимая мощность потерь на каж-
дый предохранитель, если через него протекает рабочий ток при температуре окружающей среды 40 °С,
не должна превышать $P_{\text{доп}}$ Вт и определяется из расчётной формулы:

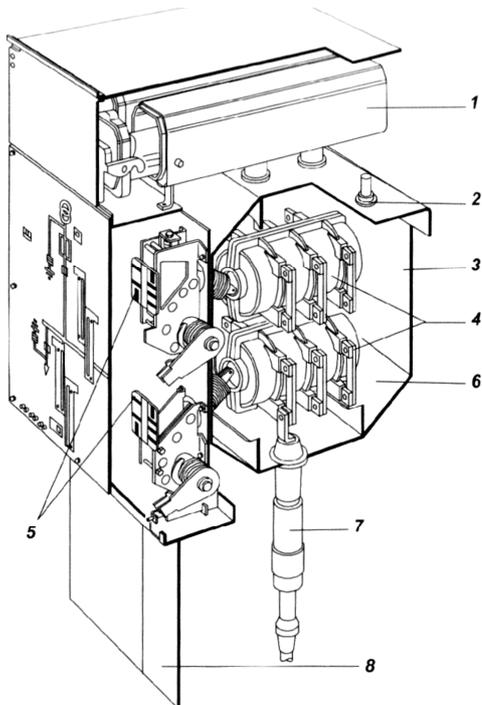
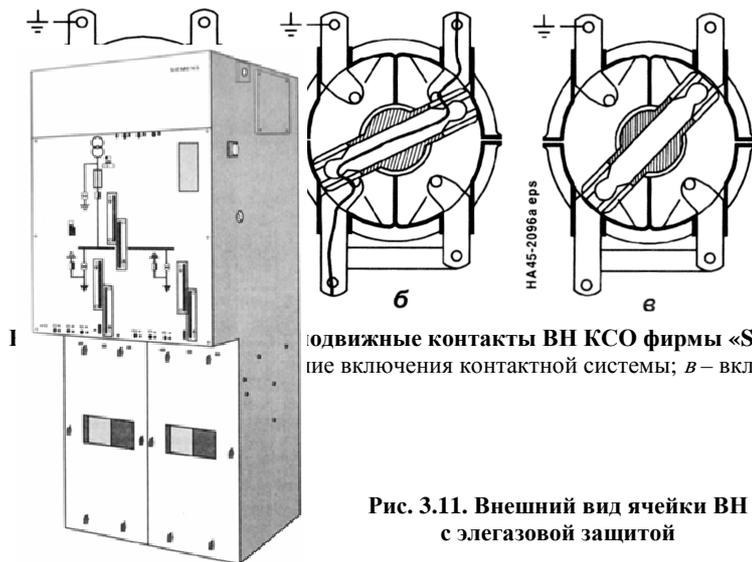


Рис. 3.12. Разрез камеры КРУ фирмы «Siemens» (8DJ10):
 1 – предохранители; 2 – штекер;
 3 – кожух герметической камеры;
 4 – неподвижные контакты ВН;
 5 – внешняя панель КРУ;
 6 – газ SF_6 ; 7 – кабель;
 8 – передняя панель



Подвижные контакты ВН КСО фирмы «Siemens»:
 а – передняя панель; б – включено; в – выключено

Рис. 3.11. Внешний вид ячейки ВН с элегазовой защитой

$$P_y = P_N \left(\frac{I_b}{I_N} \right)^2 \leq P_{\text{доп}}, \quad (3.1)$$

где P_N – мощность потерь в предохранителе при I_N ; P_y – мощность потерь в предохранителе; I_N – номинальный ток предохранителя; I_b – рабочий ток предохранителя.

Номинальные токи высоковольтных предохранителей типа 3GD1 фирмы «Siemens» приведены в табл. 3.3.

Указатели и элементы управления ячейки 8DJ20 приведены на рис. 3.14 и 3.15, данные шильдов распределительного устройства – в табл. 3.3.

3.3. Номинальные токи высоковольтных предохранителей 3GD1 («Siemens»)

Трансформатор		Температура окружающей среды, °С			
		40		800	
S_N кВ·А	U_K %	Номинальный ток, А			
		минимальный	максимальный	минимальный	максимальный
<i>Номинальное напряжение 6/7,2 кВ</i>					
400	4	100	100	250	100
	6	63	100	200	100
500	4	100	100	250	160
	6	100	100	200	160
630	4	100	160	315	160
	6	100	160	250	160
800	6	160	160	250	200
1000	6	160	200	315	250
1250	6	315	250	315	315
1600	6	250	315	315	315 (126)
<i>Номинальное напряжение 10/12 кВ</i>					
400	4	53	63	100	63
	6	40	63	100	63
500	4	63	63	100	100
	6	63	63	100	100
630	4	63	100	100	100
	6	63	100	100	100
800	6	100	100	100	100
1000	6	100	100(55)	100 (55)	100 (40)
1250	6	100 (67)	100 (55)	100 (55)	100 (40)
1600	6	по запросу			
<i>Номинальное напряжение 15/17,5 кВ (предохранители для 24 кВ)</i>					
400	4	40	25	63	40
	6	25	25	40	40
500	4	40	40	63	40
	6	40	40	63	40
630	4	40	63	63	63
	6	40	63	63	63
800		63	63	63	63 (25)
1000		63	63 (35)	63 (35)	63 (25)
1250		63 (44)	63 (35)	63 (35)	63 (25)
1600		по запросу			

Продолжение табл. 3.3

Трансформатор		Температура окружающей среды, °С			
		40		800	
S_N кВ·А	U_K %	Номинальный ток, А			
		минимальный	максимальный	минимальный	максимальный
<i>Номинальное напряжение 24 кВ</i>					
400	4	100	100	250	100
	6	63	100	200	100
500	4	100	100	250	160

	6	100	100	200	160
630	4	100	160	315	160
	6	100	160	250	160
800	6	160	160	250	200
1000	6	160	200	315	250
1250	6	315	250	315	315
1600	6	250	315	315	315 (126)

Сегодня по всему миру во всех климатических зонах только фирмой «Siemens» установлено более 5000 распределительных ячеек в 700 распределительных устройствах классов напряжений 72,5...550 кВ. Их общая продолжительность эксплуатации в сумме составляет более 50 000 лет (рис. 3.16 и 3.17, табл. 3.5).

Новое семейство изделий. В 1988 году были представлены первые экземпляры нового семейства элегазовых распределительных устройств

- 8DP3 для рабочих напряжений 170...300 кВ;
- 8DQ1 для рабочих напряжений 362...550 кВ.

В настоящее время эта серия дополняется новой серией

- 8DN9 для рабочих напряжений 72,5...145 кВ.

Впрочем, это самое маленькое распределительное устройство, которое когда-либо было выпущено для рабочих напряжений до 145 кВ.

Одной из особенностей этой конструкции КРУЭ является высокая гибкость, за счёт оправдавшей себя модульной системы. В зависимости от эксплуатационного и функционально-технического назначения, оборудование размещено в корпусах отдельно или функционально скомбинировано.

Соответствующие варианты исполнения удовлетворяют различным техническим требованиям к мощным КРУЭ, особенно для такой широко распространённой области применения, как 170 и 300 кВ.

Малым количеством типов модулей можно реализовать все виды обычно используемых схем распределительных устройств.

Вплоть до рабочего напряжения 245 кВ используется модуль силового выключателя с одной дугогасительной камерой и со встроенным трансформатором тока.

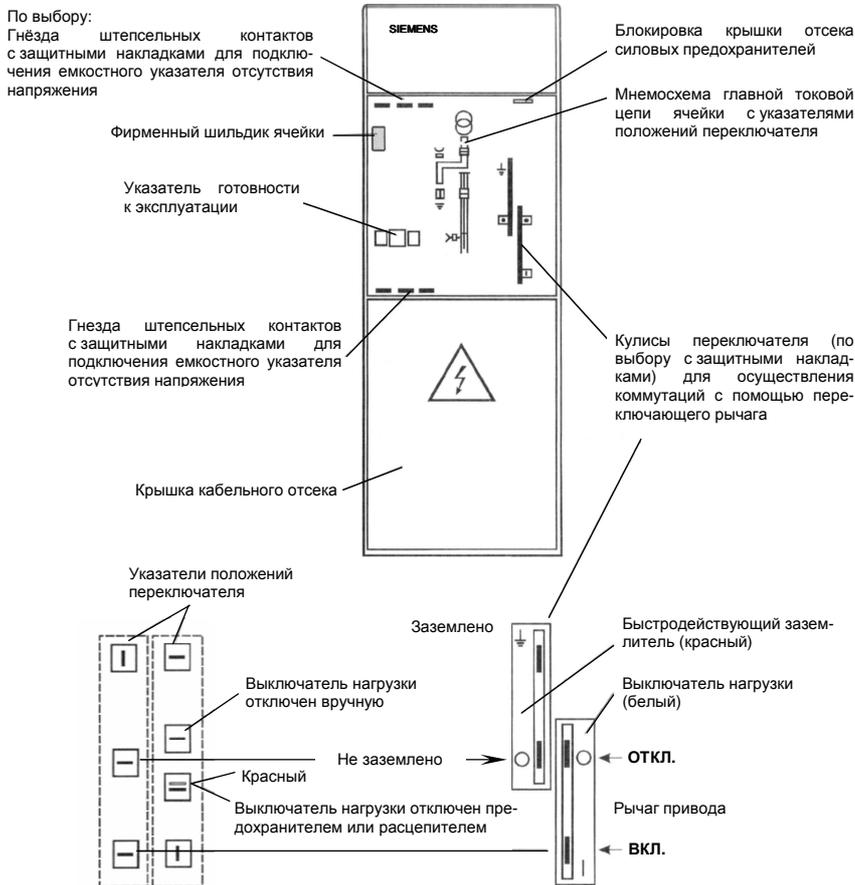


Рис. 3.14. Указатели и элементы управления ячейки 8DJ20

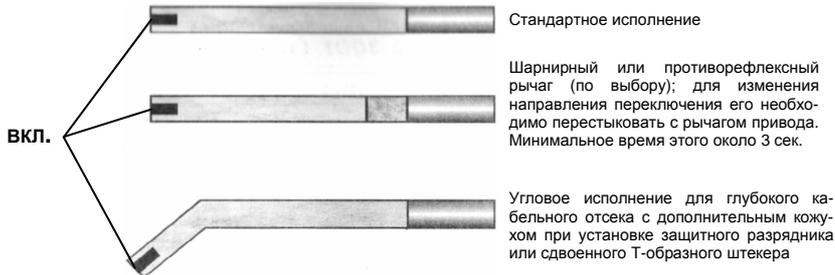
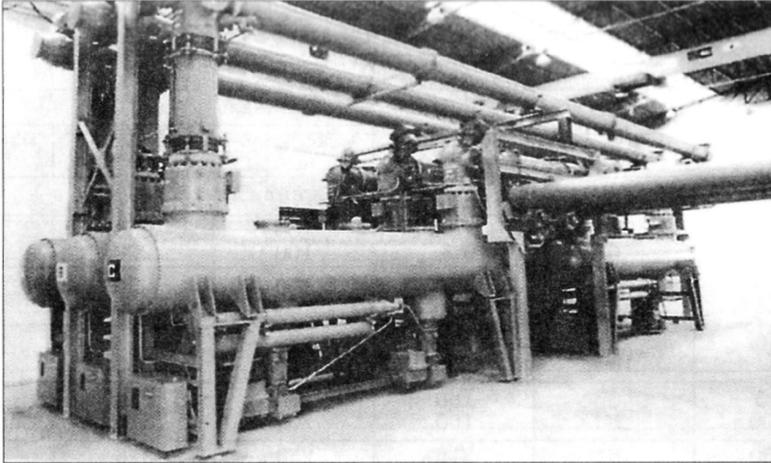


Рис. 3.15. Переключающие рычаги трехпозиционного переключателя

3.4. Данные фирменных шильдов распредустройства, расположенных сверху: внутри отсека привода; снизу: на лицевой панели ячейки (примеры)

Номинальное напряжение, кВ	7,2	12	15	17,5	24
Уровень изоляции	2	2	ANSI	2	2
Номинальное выдерживаемое переменное напряжение, кВ	20	28	36	38	50
Номинальное выдерживаемое импульсное напряжение, кВ	60	75	95	95	125
Номинальный ток , А	200	200	200	200	200
Номинальный включаемый ток КЗ, кА	25	25	25	25	25
Номинальный кратковременно выдерживаемый ток, 1 с, кА	10	10	10	10	10
Температура окружающей среды **, °С	мин.	-50		макс.	+80

* соотношение с высоковольтными предохранителями
** температура воздуха в помещении подстанции (предельные значения)



а)

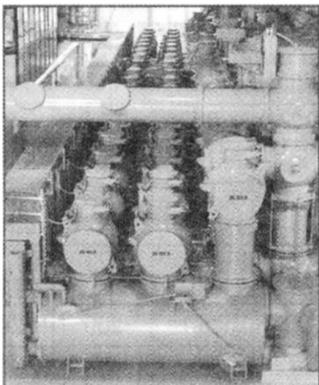
Рис. 3.16. Элегазовые распределительные устройства:

а – распределительное устройство 8DQ1 на рабочее напряжение 550 кВ и высокую мощность отключения;

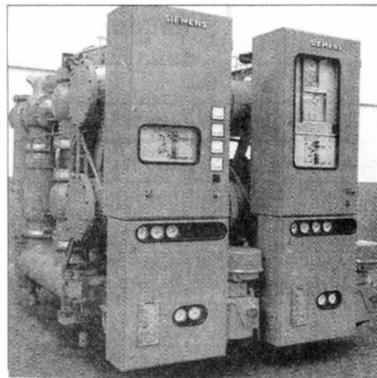
б – распределительное устройство 8DN8 на рабочее напряжение 145 кВ;

в – распределительное устройство 8DN9 на рабочее напряжение 123 кВ;

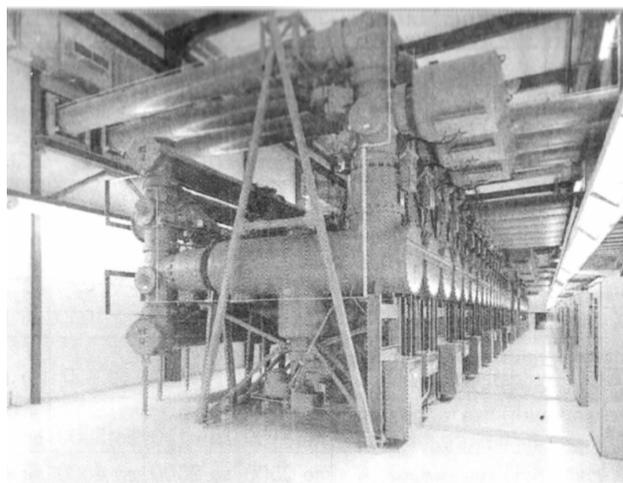
г – распределительное устройство 8DQ1 на рабочее напряжение 420 кВ



б)



в)



г)

Рис. 3.16. Продолжение

Напряжения выше 245 кВ, а также большие коммутационные мощности требуют две дугогасительные камеры на каждый полюс силового выключателя. Поэтому возможна поставка модуля силового выключателя двух исполнений. Площадь оснований для установки КРУЭ должна быть как можно меньше. Поэтому с модулями силовых выключателей с двумя дугогасительными камерами применяются отдельные модули трансформаторов тока. Тоководы этих типов КРУЭ герметизированы пофазно. Для сборных шин (рис 3.18) в зависимости от технической необходимости и требований имеются два варианта исполнения:

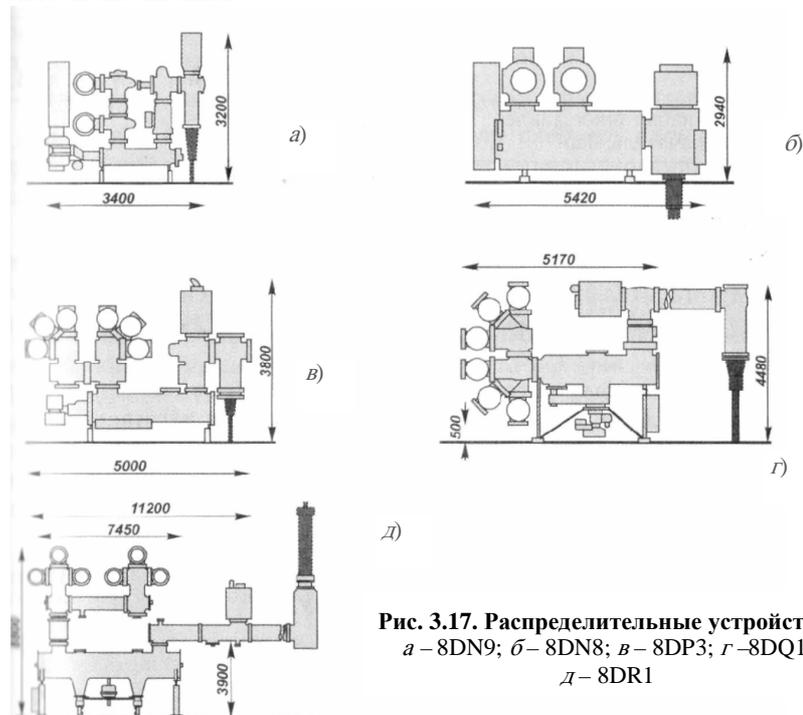


Рис. 3.17. Распределительные устройства:
а – 8DN9; *б* – 8DN8; *в* – 8DP3; *г* – 8DQ1;
д – 8DR1

3.5. Распределительные устройства

Характеристики	Тип распределительных устройств				
	8DN9	8DN8	8DP3	8DQ1	8DR1
Ширина ячейки, мм	1200	1400	2200	3600	1500
Номинальное напряжение, кВ	до 145	до 170	до 300	до 550	до 800
Номинальное выдерживаемое переменное напряжение (одноминутное), кВ	до 275	до 325	до 460	до 740	до 950
Номинальное выдерживаемое напряжение грозового импульса, кВ	до 650	до 750	до 1050	до 1550	до 2100
Номинальное выдерживаемое напряжение коммутационного импульса, кВ	–	–	до 850	до 1250	до 1550
Номинальный (рабочий) ток сборных шин, А	до 3150	до 3150	до 5000	до 6300	до 8000
Номинальный (рабочий) ток вводов, А	до 2500	до 2500	до 4000	до 4000	до 5000

глубина	1525	1525	1525	1525	1525	1525
---------	------	------	------	------	------	------

Примечание: Сп.2 – по спецификации; ANSI – по стандарту Американского национального института стандартизации.

Элегазовые выключатели 72,5–800 кВ. Заключённые в металлическую оболочку, силовые выключатели КРУЭ (рис. 3.23) напряжением 72,5...800 кВ имеют два главных модуля, общих с оправдавшими себя силовыми выключателями наружной установки:

- дугогасительная камера с соплами и дутьевыми поршнями для дугогасительной среды;
- электрогидравлическая система привода.

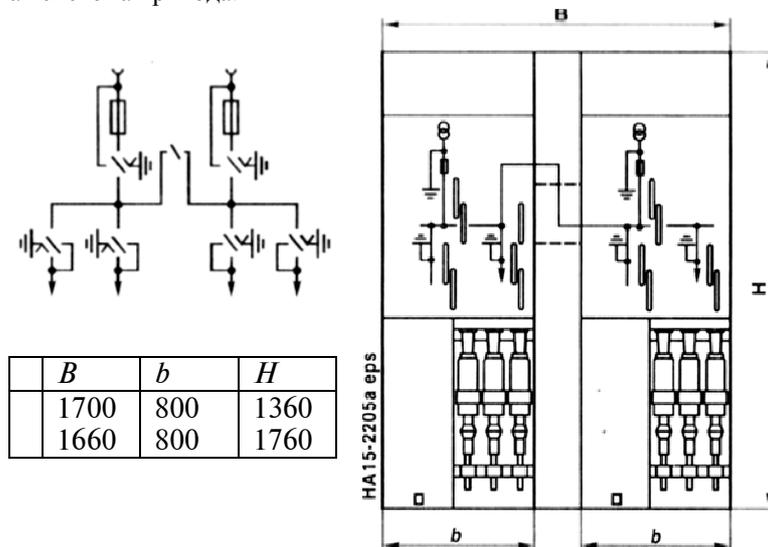


Рис. 3.19. Один из вариантов комплекта элегазовых ВН для двухлучевых отечественных РУ ТП 6...10 кВ

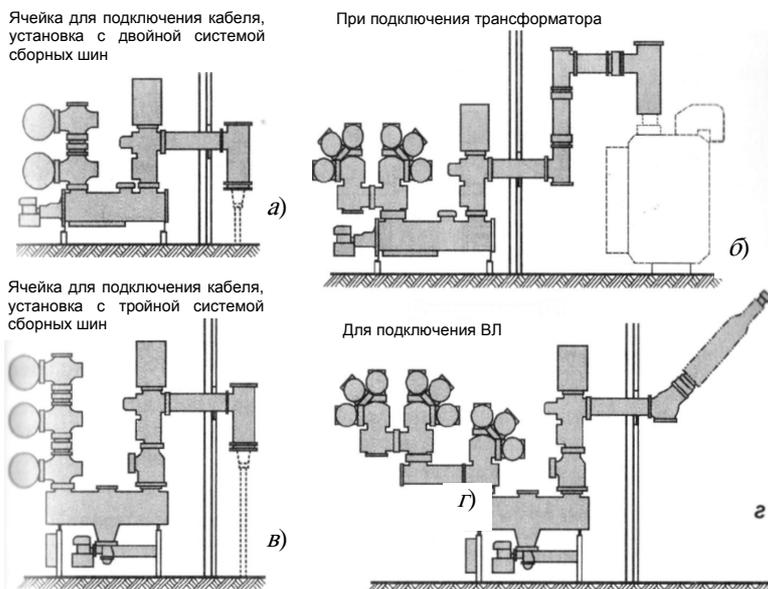


Рис. 3.20. Примеры подключения оборудования в РУ

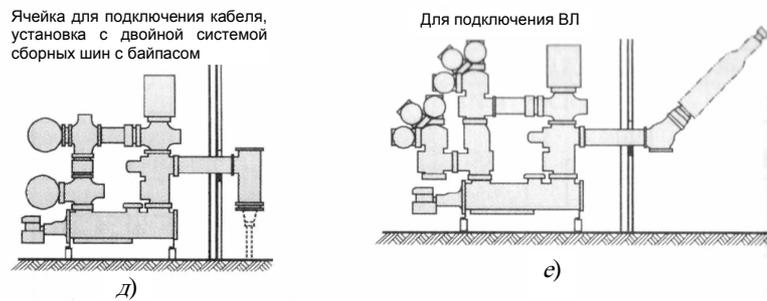


Рис. 3.20. Окончание

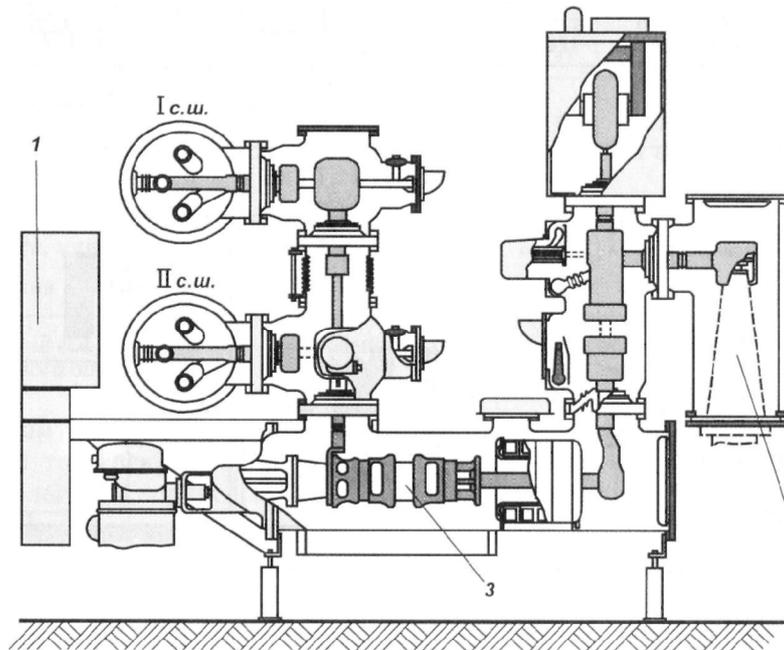


Рис. 3.21. Выключатель с кабельным вводом:

1 – шкаф управления; 2 – кабельный ввод; 3 – дугогасительная камера;
 I с. ш. – первая система шин; II с. ш. – вторая система шин

Конструкция модуля силового выключателя зависит в значительной степени от того, сколько дугогасительных камер должно быть использовано на один полюс.

В 95 % всех случаев применения трансформатор тока устанавливается в пределах ячейки, на отходящей стороне выключателя.

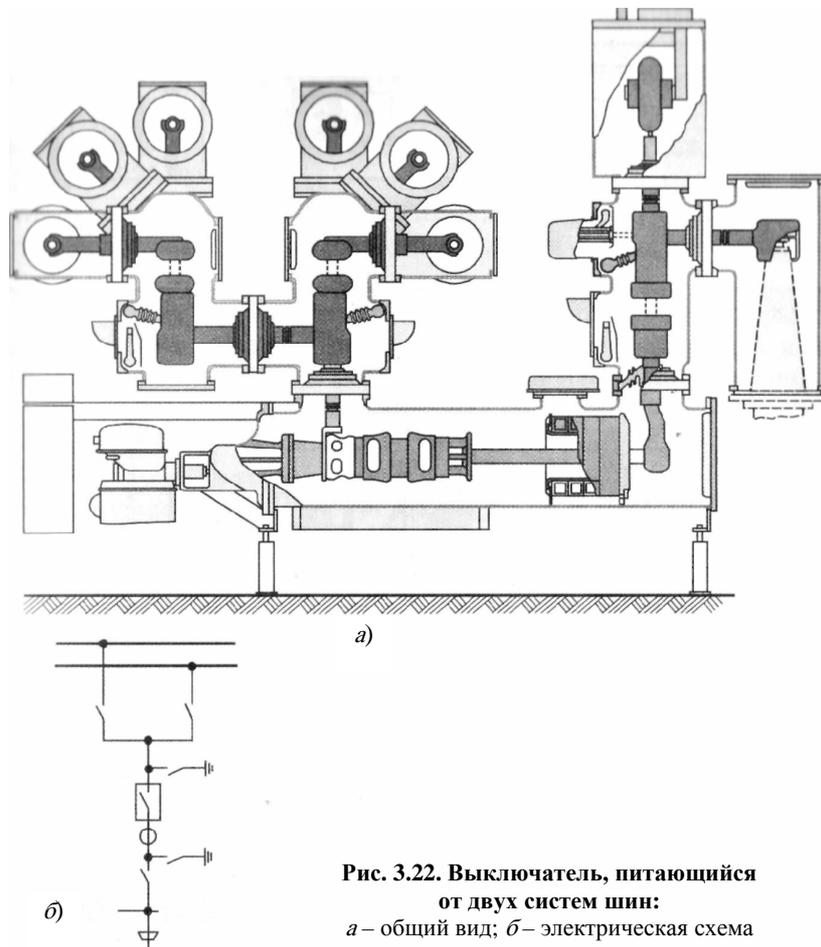


Рис. 3.22. Выключатель, питающийся от двух систем шин:
a – общий вид; *б* – электрическая схема

Обычно, высоковольтная часть силового выключателя и трансформатор тока заключены в один корпус. При этом находящийся под давлением элегаз в корпусе выполняет роль высоковольтной изоляции.

Для высших напряжений и/или больших мощностей силовой выключатель выполняется с двумя дугогасительными камерами на один полюс. При таком исполнении модуля, трансформатор тока не встроен в корпус, чтобы сохранить его габариты, по возможности, как можно меньшими. Таким образом, это не сказывается на габаритах ячейки.

Независимо от того, одна или две последовательно включённых дугогасительных камер установлено в выключателе, всегда используется одна и та же конструкция дугогасительной камеры.

Электрогидравлическая система привода силового выключателя, во всех этих случаях исполнения, расположена снаружи модуля на потенциале земли.

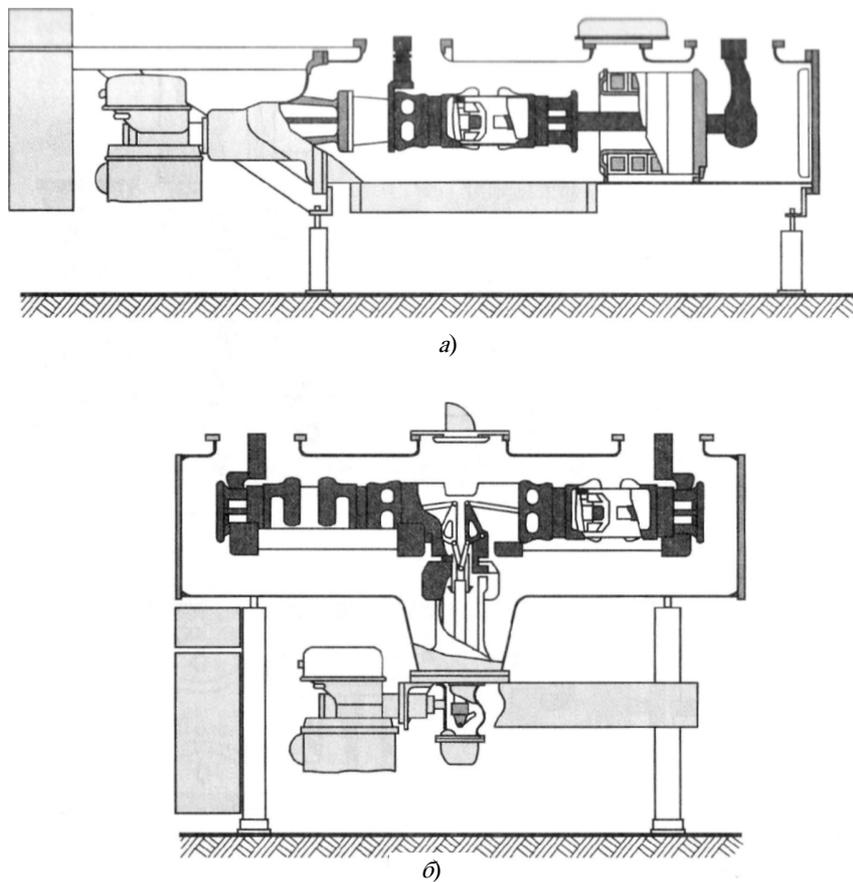


Рис. 3.23. Модуль силового выключателя (однополюсный):
a – с одной дугогасительной камерой и с трансформатором тока
в общем газовом объеме, представлен частично в разрезе;
б — с двумя дугогасительными камерами в общем газовом объеме,
представлен частично в разрезе

Все необходимые для управления и контроля силового выключателя элементы находятся в шкафу управления выключателем. При этом каждый полюсный модуль силового выключателя имеет один общий шкаф управления.

Выше шкафа управления расположен шкаф контроля давления элегаза, который объединяет элементы контроля элегаза всей ячейки. Элементы контроля элегаза силового выключателя находятся в шкафу управления выключателя.

Необходимые для газоплотной заделки модуля силового выключателя конусные литые проходные изоляторы относятся к модулям установки, которые присоединяются к силовому выключателю.

Модуль подключения трансформатора.

➤ Изготовитель трансформатора поставляет изоляторы вместе с трансформаторами с соответственными первичными подключениями, а также газоплотные модули подключения.

➤ Изготовитель КРУЭ обеспечивает поставку и монтаж корпуса модуля КРУЭ, первичную связь с КРУЭ, включая экранирующий кожух и необходимый элегаз для заполнения модуля.

Этот вид прямого подключения трансформатора предполагает, что фундаменты КРУЭ и трансформатора имеют одинаковую осадку. В идеальном случае оба фундамента жёстко связаны между собой.

Температурные расширения выравниваются за счёт компенсаторов, которые можно встроить между КРУЭ и модулем подключения трансформатора (рис. 3.24, *a*).

Модуль подключения воздушной линии (рис. 3.24, *б*) даёт возможность перехода от КРУЭ высокого напряжения к воздушной линии электропередачи.

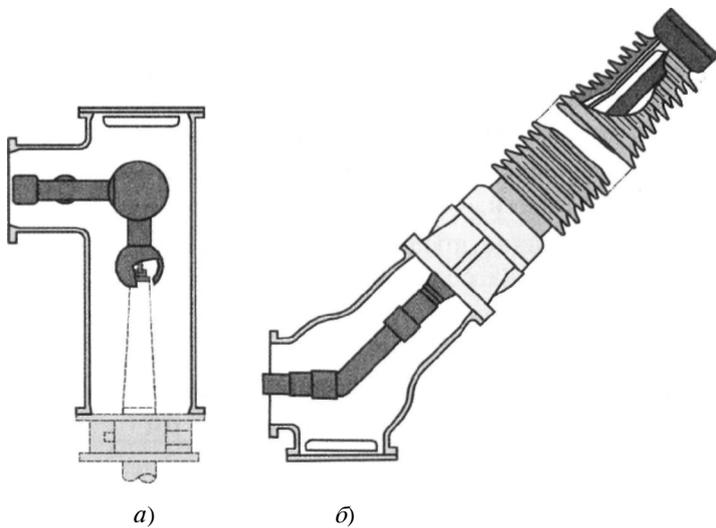


Рис. 3.24. Подключение модулей:

а – компенсаторов; *б* – воздушной линии

Для этого используются проходные фарфоровые изоляторы для высокого напряжения, которые соответствуют уровню напряжения и имеют необходимое число юбок, т.е. обеспечивают изоляционное расстояние и длину пути утечки для воздушной изоляции. Фарфоровые проходные изоляторы подключаются к КРУЭ через соответствующий угловой модуль.

Разброс точек подключения трёх фаз на необходимое расстояние для изоляции проводников достигается за счёт соответственно развернутого расположения однополюсно герметизированных модулей подключения ВЛ.

В противоположность подключения к модулям кабеля и трансформаторов, изготовитель КРУЭ поставляет комплекты модули подключения ВЛ.

Модули подключения ВЛ приспособлены для:

- подсоединения ячеек ВЛ высокого напряжения;
- подключения к силовым трансформаторам или реакторам с фарфоровыми изоляторами;
- подключения концевых кабельных муфт наружной установки.

Специфические особенности оборудования:

- применение алюминиевых кожухов, обеспечивающих защиту от прикосновения;
 - безопасный доступ к приводу и вторичным компонентам трансформаторов, размещенным вне защитного кожуха;
 - трансформатор тока и напряжения с высокими диэлектрическими и термическими характеристиками;
 - использование элегаза только в качестве изолирующей среды;
 - дозаправка элегазом производится не ранее, чем через 10 лет без прерывания работы;
 - внутри защитного кожуха размещены лишь простейшие элементы привода, не требующие технического обслуживания;
 - вакуумные силовые выключатели установлены стационарно;
 - металлический кожух на каждом полюсе препятствует появлению междуфазных КЗ;
 - благодаря использованию кожухов на каждом полюсе возможно применение кольцевых трансформаторов тока;
 - измерение напряжения производится с помощью емкостных делителей напряжения или индуктивных трансформаторов напряжения;
 - сокращение числа функциональных элементов за счёт использования трёхпозиционных выключателей;
 - устойчивое заземление с использованием вакуумных силовых выключателей;
 - возможно использование кабельных штекерных присоединений и шинных соединений с защитой от прикосновения;
 - возможно присоединение обычных кабельных концевиков и шин с воздушной изоляцией;
 - возможно применение продольного разделения сборных шин и проведение измерений на сборной шине без дополнительных устройств;
 - модульный принцип конструкции обеспечивается за счет применения стандартных резервуаров;
 - одинаковые размеры шкафов для напряжения 7,2...36/40,5 кВ;
 - ширина одного шкафа составляет всего 600 мм;
 - замену сборной шины можно проводить без перерывов в работе;
 - поперечное соединение сборной шины только в одном шкафу.
- Система привода.* Надежная электрогидравлическая система, оправдавшей себя конструкции, удовлетворяет всем требованиям, которые предъявляются сегодня к современным силовым выключателям высокого напряжения:
- одна комплектная система;
 - высокая надёжность и отсутствие необходимости в обслуживании;
 - никакого шума;
 - настройка на любую стандартную последовательность коммутации;
 - оптимальная механика передвижения в силовом выключателе;
 - пуск и демпфирование без дополнительных гидравлических устройств.
 - самоконтроль.

КРУЭ типа 8DP3 обслуживают различные уровни напряжения, и, как правило, возникают разнообразные дополнительные требования к контролю ячейки и специальные необходимые по эксплуатационным условиям пожелания исполнения.

Модуль одной фазы выключателя 72,5...800 кВ приведен на рис. 3.25. Отдельно стоящий местный шкаф управления (рис. 3.26) почти всегда имеет достаточно места для выполнения этих дополнительных требований.

В исключительных случаях местный шкаф управления, в уменьшенных размерах, может быть встроен в лицевую сторону ячейки. Это даёт то преимущество, что вся обвязка может быть выполнена на заводе-изготовителе. Ячейка, таким образом, может быть поставлена полностью готовой к подключению. Но это ещё и означает, что из-за ограниченной площади, могут быть расположены только обязательно необходимые элементы для управления и контроля, а от всех специальных пожеланий придется отказаться.

Дугогасительная камера (рис. 3.27). Применяемые в выключателях дугогасительные камеры давно оправдали себя на практике и одновременно находятся на современном уровне технологии.

При разработке конструкции дугогасительной камеры были учтены как результаты многолетнего опыта эксплуатации, так и результаты новейших исследований физики плазмы. Она была уже много раз использо-

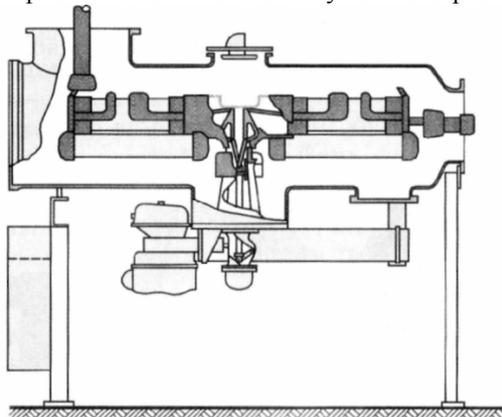


Рис. 3.25. Модуль одной фазы выключателя 72,5...800 кВ

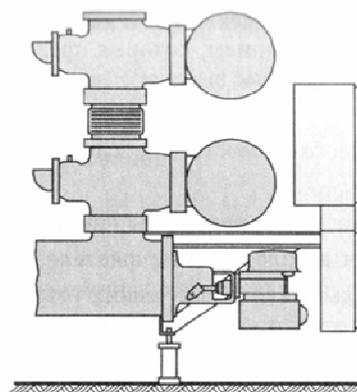


Рис. 3.26. Привод совмещён с выключателем

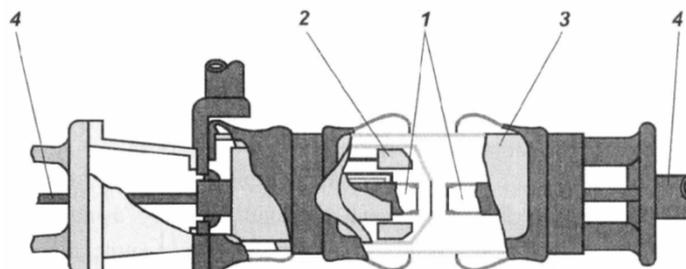


Рис. 3.27. Дугогасительная камера выключателя:

1 – контактные трубы; 2 – дутьевой поршень; 3 – дутьевой цилиндр;
4 – токопроводы

вана в традиционных силовых выключателях наружной установки, а также в КРУЭ на напряжение 72,5...800 кВ.

Для этих новых типов КРУЭ и новой серии силовых выключателей была оптимизирована основа технической концепции дутьевых поршневых выключателей. Нынешняя высокомоощная контактная система с расположенными друг против друга графитными гасительными соплами, осталась при этом неизменной. Но новые результаты исследовательской работы сделали возможным значительно снизить расходы энергии на коммутации.

Дугогасительная камера в основном состоит из:

- двух неподвижных токоведущих контактных труб с гасительными соплами, расположенных друг против друга;

- подвижной трубчатой перемычки, кольцеобразно расположенными внутри, подпружиненными пальцеобразными контактами;
- неподвижно закрепленного дутьевого поршня;
- подвижного дутьевого цилиндра.

Все это устройство заключено в корпус из изоляционного материала (в КРУЭ), или из фарфора (в силовых выключателях наружной установки). Снаружи к корпусу подключены токопроводы, обеспечивающие электрическую связь с соседними модулями. Подвижные части дугогасительной камеры приводятся в движение штангой от электрогидравлической приводной системы силового выключателя.

Наружные токопроводы, обе контактные трубы и пальцеобразные контакты в трубчатой перемычке образуют токовую цепь внутри силового выключателя. Установленные в трубчатой перемычке пружины при этом прочно прижимают пальцеобразные контакты к трубе, так что обеспечивается надёжный контакт.

Во время процесса отключения – за счёт движения дутьевого цилиндра относительно неподвижного дутьевого поршня – происходит сжатие газа в дутьевом цилиндре. Дутьевой цилиндр охватывает при этом гасительное устройство как камера сжатия. Дуга, которая горит при размыкании между гасительными соплами и коммутационными контактами, за счёт потока газа и за счёт собственных электродинамических сил направляется в гасительные сопла и гасится.

За счёт сниженного расхода энергии на коммутации и дальнейшей разработки дугогасительной камеры, появилась возможность сконструировать гидропривод еще более компактным:

- применяемое до сих пор двухступенчатое управление с упреждением было заменено одноступенчатым управлением с упреждением;
- отпала необходимость в целом ряде внешних соединительных труб;
- стало возможным уменьшить объём маслобака.

Это означает меньше компонентов, меньше мест уплотнений и значительный плюс к надежности эксплуатации.

Привод работает под давлением масла, которое постоянно действует на меньшую поверхность дифференциального поршня. Через гидравлические клапаны с электроприводом заполняется большая поверхность поршня маслом под давлением, либо без давления, что определяет направление движения.

Система управления. Блок управления силового выключателя и блок контроля давления элегаза ячейки во всех видах исполнения КРУЭ 8DP3 высокого напряжения встроены с лицевой стороны. Необходимый местный шкаф управления в большинстве случаев расположен свободно стоящим напротив лицевой стороны ячейки.

Местный шкаф управления содержит все необходимые устройства для управления и контроля ячейки. В основном осуществляя следующие функции:

- активирование всех коммутационных аппаратов ячейки на уровне ячейки и дистанционно по цифровым каналам с главного щита управления (выполнимы только допустимые переключения);
- оптические сообщения через световые диоды или сигнальные табло;
- показания величины тока и напряжения; возможно ещё и показание величины мощности;
- защита всех вторичных цепей.

Одним из основных элементов в местном шкафу управления является электронный прибор защиты от неправильных переключений, в котором наряду с элементами активирования, находятся все электрические блокировки ячейки. Эта блокировка надежна от ошибок, т.е. при правильном активировании недопустимые переключения исключены.

Один на все РУ центральный блок защиты от неправильных переключений перенимает при этом на себя задачи блокировки, выходящие за пределы функции ячейки, и контрольные функции системы.

Через прибор защиты от неправильных переключений могут активироваться все коммутационные аппараты ячейки с места, со щита управления или с дистанционного центра управления.

Подключения ячеек выключателей к оборудованию приведены на рис. 3.28 – 3.30.

КРУЭ сборных шин приведена на рис. 3.31.

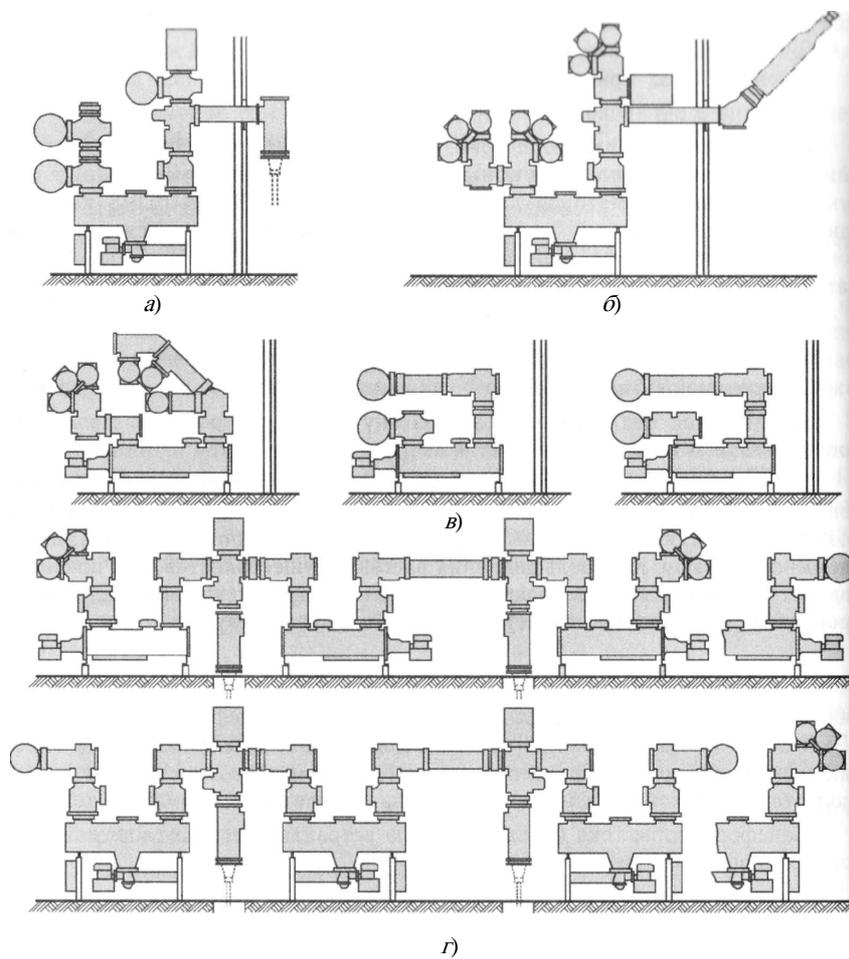


Рис. 3.28. Камеры ячеек:

a – ячейка для подключения кабеля, установка с двойной системой сборных шин с обходной шиной; *б* – для подключения ВЛ; *в* – секционная ячейка, установка с двойной системой сборных шин (различие исполнения: вид изолирования сборных шин, с/без заземлителя сборных шин); *г* – ячейка выполнена по полуторной схеме, или с кольцевой схемой шин. (различие исполнения: вид изолирования сборных шин, вид исполнения силового выключателя)

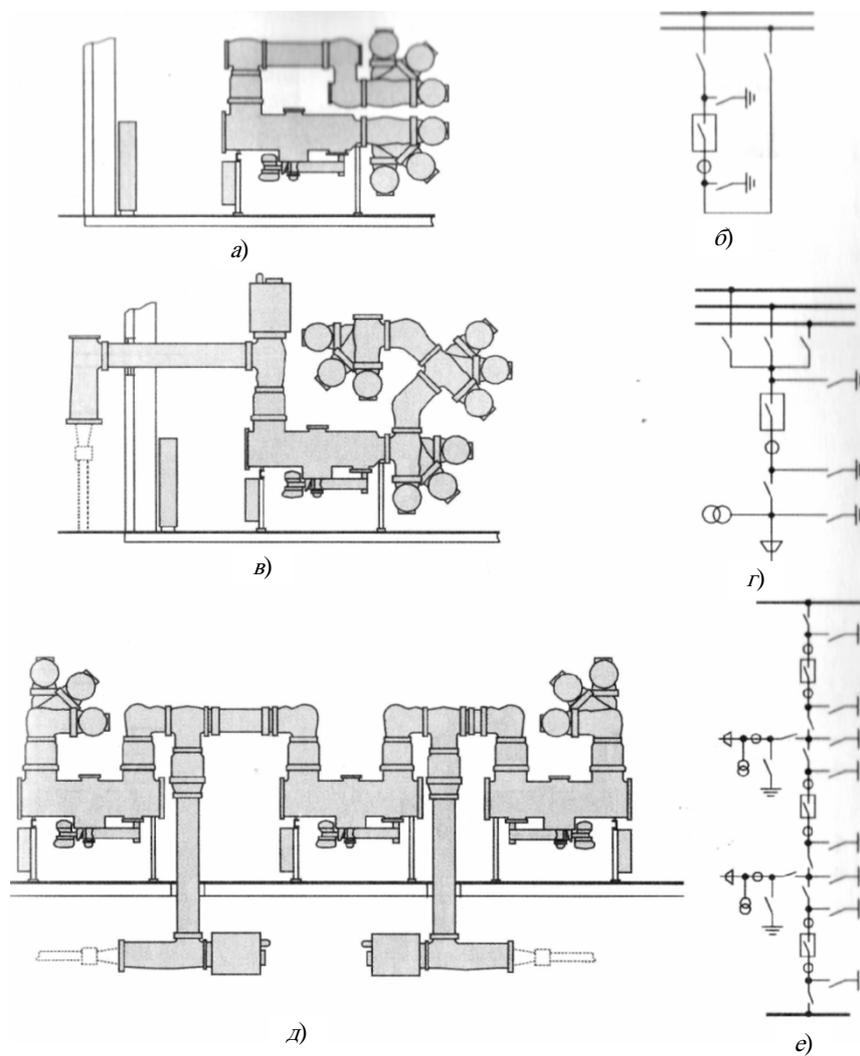


Рис. 3.29. Варианты ячеек (а, в, д) и их схемы (б, г, е):

а – секционная ячейка, установка с двойной системой сборных шин; *в* – ячейка для подключения кабеля, установка с тройной системой сборных шин; *д* – ячейка для подключения кабеля выполнена по полуторной схеме, или с кольцевой схемой шин

Модуль трансформатора (рис. 3.32). В КРУЭ высокого напряжения по физико-техническим причинам предпочитают использование индуктивных трансформаторов напряжения. В наших КРУЭ 8DP3 каждый однофазный индуктивный трансформатор напряжения находится в отдельном корпусе и образует свой собственный газоплотный модуль.

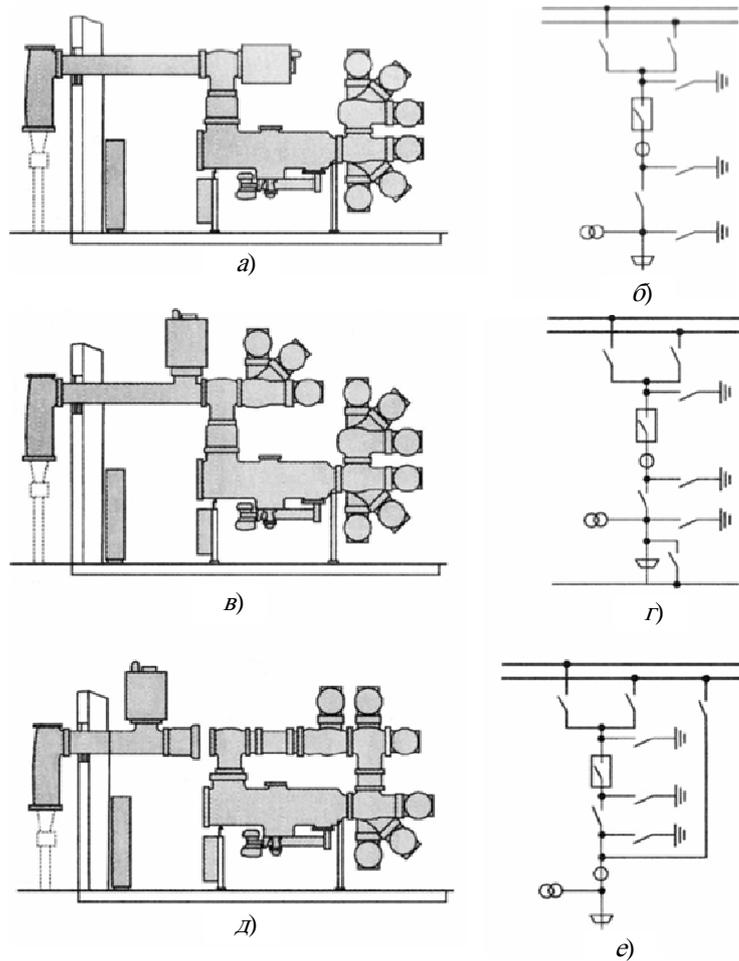


Рис. 3.30. Ячейки КРУЭ (а, в, д, ж, и, л) и их схемы (б, г, е, з, к, м):
 а – ячейка для подключения кабеля, установка с двойной системой сборных шин;
 в – ячейка для подключения кабеля, установка с двойной системой сборных шин с обходной шиной; д – ячейка для подключения кабеля, установка с двойной системой сборных шин с байпасом; ж – секционная ячейка, установка с двойной системой сборных шин; и – ячейка для подключения кабеля, установка с тройной системой сборных шин; л – ячейка для подключения кабеля выполнена по полугорной схеме, или с кольцевой схемой шин
 (позиции ж, и, л характерны для выключателей типа 8DQ1)

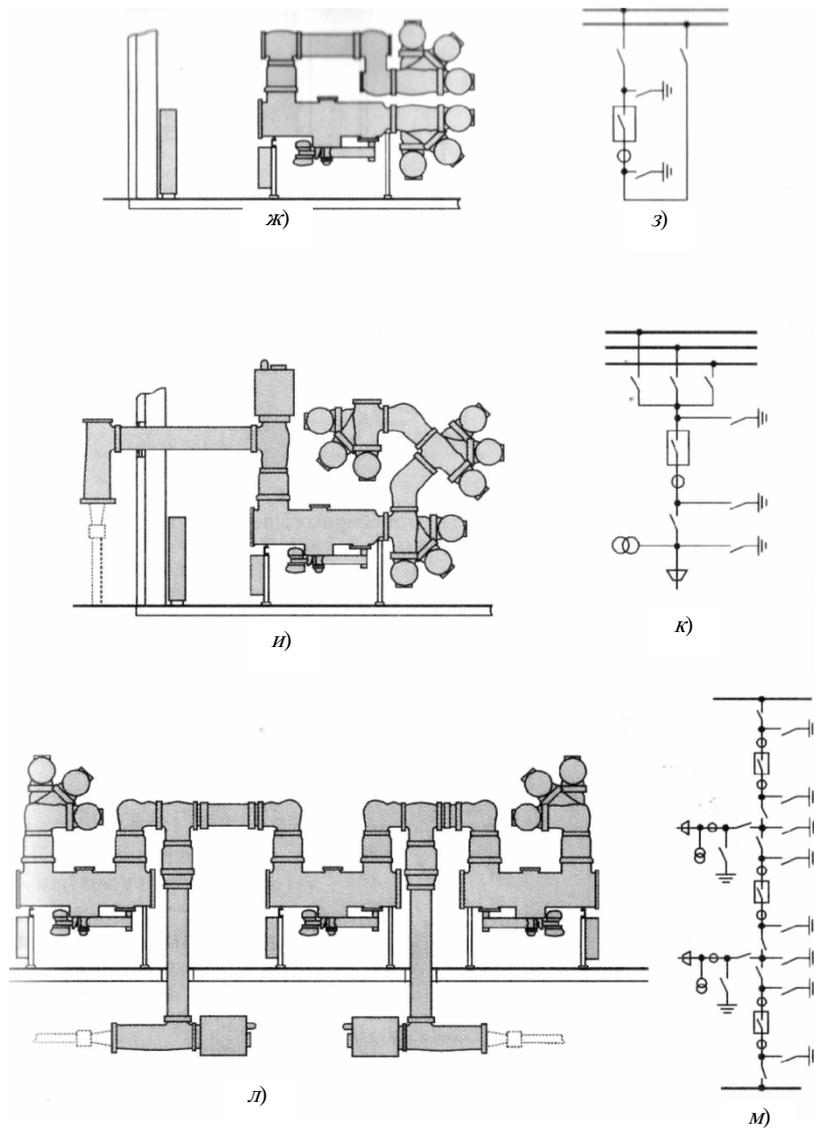


Рис. 3.30. Окончание

Трансформатор напряжения состоит в основном из:

- одного стального сердечника;
- одной вторичной обмотки, или больше, на одном стержне;
- первичной обмотки.

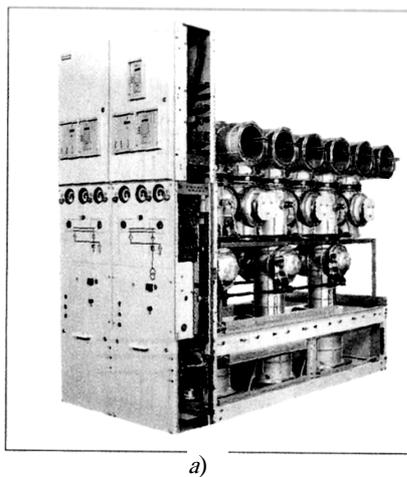


Рис. 3.31. КРУЭ сборных шин:
а – общий вид; б – схема

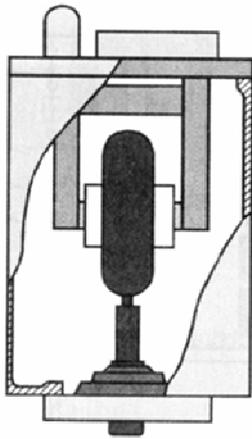


Рис. 3.32. Модуль трансформатора напряжения

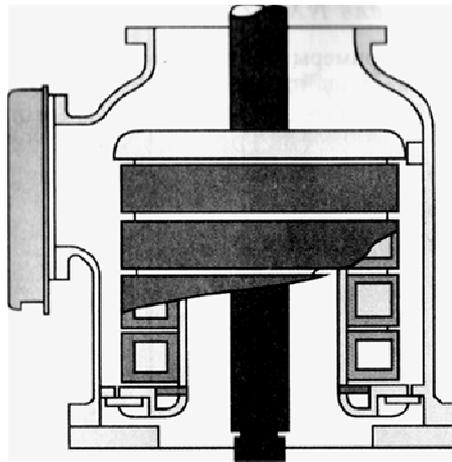


Рис. 3.33. Модуль трансформатора тока

Находящийся под давлением элегаз внутри модуля образует изоляцию против высокого напряжения.

Связь с шиной установки высокого напряжения осуществляется токопроводом, который встроен в газоплотный проходной изолятор. Вторичные подключения также выведены через газоплотные проходные фланцы к клеммному шкафу. Контроль давления элегаза осуществляется, как правило, совместно с контролем газа одного соседнего модуля установки. Для этого прокладывают внешнюю газовую соединительную трубу.

Трансформатор тока (рис. 3.33). В высоковольтных КРУЭ применяются исключительно однофазные индуктивные трансформаторы тока. В КРУЭ серии 8DP3 они вмонтированы в модуль силового выключателя вместе с частью высокого напряжения силового выключателя, или же они имеют свой отдельный корпус и называются тогда модули трансформатора тока.

Трансформаторы тока большей частью встраиваются на отходящей стороне силового выключателя.

У однопроводникового трансформатора тока проведённый прямо проводник тока выполняет функцию первичной обмотки с одним витком.

Находящийся в модуле под давлением элегаз образует при этом изоляцию против высокого напряжения.

Переключение на различные коэффициенты трансформации возможно через вторичные подключения трансформатора тока, которые выведены через газоплотные фланцы в клеммный шкаф. Каждый трансформатор тока может иметь несколько стальных сердечников, каждый с одной вторичной обмоткой. Число сердечников зависит от первичного тока, класса и мощности единичного сердечника.

Заземлители (рис. 3.34) в этих типах КРУЭ выполнены в виде «штифтовых заземлителей». При этом штифтовой заземлитель при включении, в процессе движения вперёд, вдвигается в противоположный контакт токоведущей системы.

Использование заземлителей предпочтительнее в комбинации с разъединителями, но они могут также применяться как самостоятельные моду-

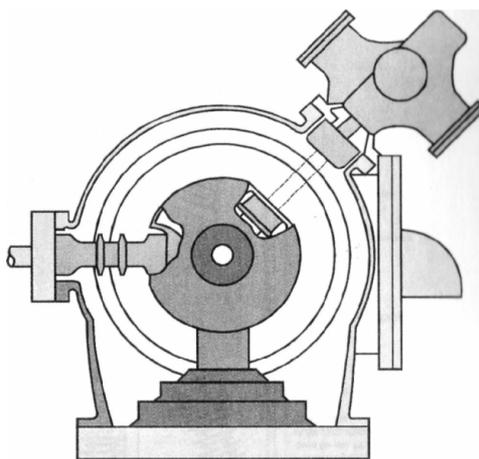


Рис. 3.34. Заземлитель

ли или же могут быть встроены в модули сборных шин. Принципиально, с точки зрения безопасности, все заземлители снабжены одним приводным двигателем для трех полюсного аппарата. Но возможно также оснащение каждого полюса заземлителя собственным приводным двигателем.

3.6. ЭЛЕГАЗОВЫЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ NXA 24

Общий вид выключателя NXA-24, примеры монтажных исполнений, а также его крепление на опоре ВЛ приведены на рис. 3.35 – 3.37, а на рис. 3.38 – схема дистанционного управления разъединительным пунктом с выключателем NXA-24.

Стандартные принадлежности:

- штекерный силиконовый изолятор;

- сигнальный контакт заниженного давления;
- скобы для подвески;
- клеммные шинки;
- клемма заземления;
- рычаг управления;
- рым-болты.

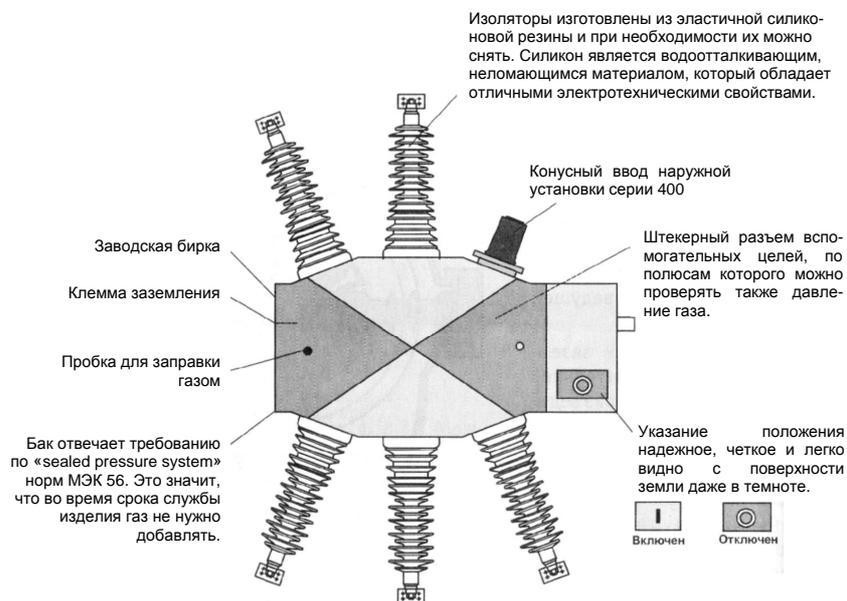


Рис. 3.35. Выключатель элегазовый типа NXA-24

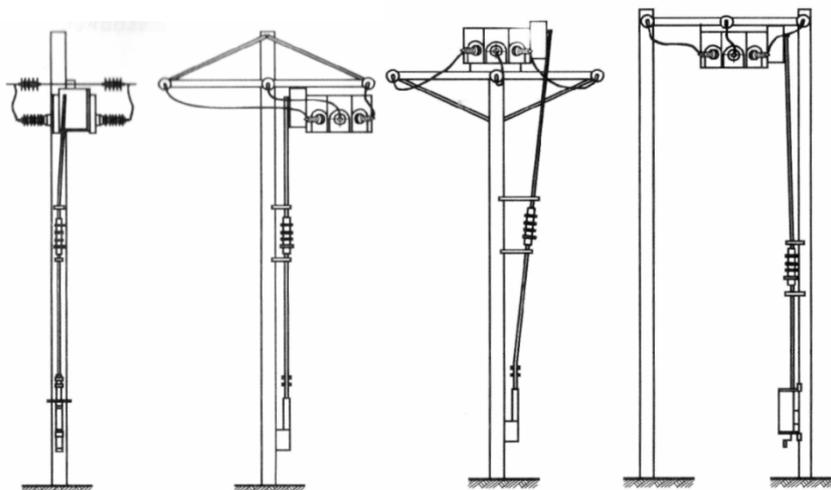


Рис. 3.36. Примеры монтажных исполнений

Дополнительные принадлежности:

- ручной привод;
- моторный привод;
- пружинный механизм, применимый для магнита отключения;
- магнит отключения;
- блок-контакты;
- реле тока повреждения;
- токовый датчик для индикации тока повреждения;
- вентильные разрядники с крепежом;
- траверса с принадлежностями для крепления и заземления;
- комплект подъемных средств.

Технические характеристики выключателя NXA-24:

Уровень изоляции

Номинальное напряжение, кВ 24

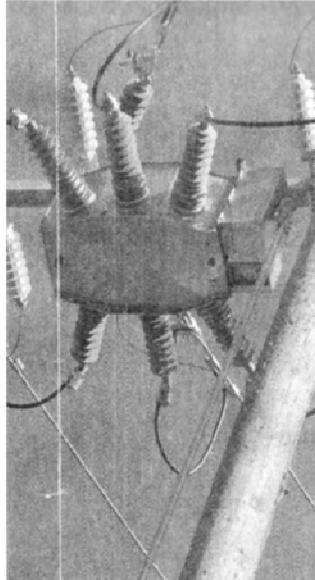


Рис. 3.37. Выключатель NXA-24 на опоре ВЛ

Одноминутное напряжение промышленной частоты, кВ:

- между фазами и на землю 50
- между разомкнутыми контактами ... 60

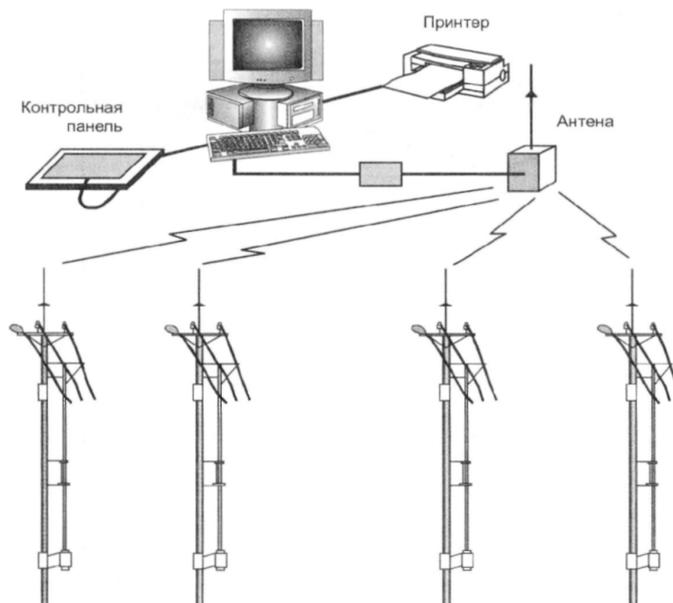


Рис. 3.38. Система дистанционного управления разъединительным пунктом с выключателями NXA-24

Стойкость к воздействию импульса напряжения, кВ:

- между фазами и на землю 25
- между разомкнутыми контактами 146

Токовые характеристики

- Номинальный ток, А 630
- Номинальная отключающая способность,
100 операций ВО, А 630
- Ток отключения замкнутого кольца, А 630
- Ток отключения ненагруженной
воздушной линии, А 50
- Ток отключения ненагруженного кабеля, А 50
- Ток отключения ненагруженного трансформатора, А 21

Характеристики КЗ

- Ток термической устойчивости 3 с, кА 16
- Ток динамической устойчивости пик, кА 40
- Ток включения на короткое замыкание, кА 40

3.7. ПРИБОРЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ ЭЛЕГАЗОВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Сигнализатор плотности элегаза (СПЭ) предназначен для оценки плотности элегаза в герметизированных объемах элегазового оборудования (рис. 3.39).

Применяется в электроэнергетике, в том числе в комплектных распределительных устройствах (КРУЭ).

Используется:

- как устройство контроля и диагностики состояния оборудования;
- в системах противопожарной автоматики.

Выдача предупредительного и аварийного сигналов при выходе значений плотности за задние пределы.

Плотность определяется по результатам замены значений давления и температуры в объемах. Сигналы выдаются посредством замыкания «сухих» контактов реле. Пределы значений давления для каждого из объемов различны (в зависимости от типа КРУЭ и назначения устройства).

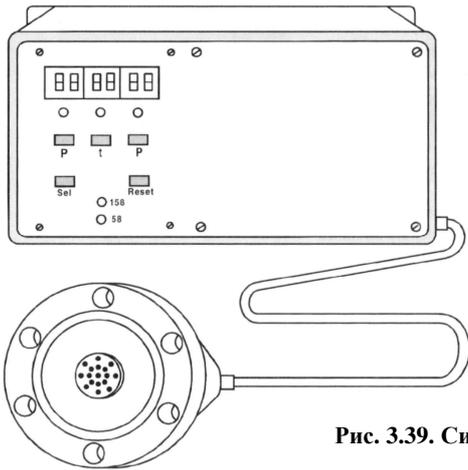


Рис. 3.39. Сигнализатор плотности элегаза

Состав прибора: блок измерительный (БИ), датчики давления и температуры, устанавливаемые на контролируемых объемах (до 15 шт.).

Преимущества:

- простота и удобство в обращении;
- индикаторное отображение значений плотности, давления и температуры в каждом из контролируемых объемов;
- цифровой канал связи с внешними устройствами сбора информации (RS 458);
- высокая степень точности;
- устойчивость к воздействию электромагнитных полей.

Основные технические характеристики:

Диапазон измерений плотности, г/дм ³	11...60
Диапазон измерения давления (избыточного), Па	$2 \cdot 10^5 \dots 7 \cdot 10^5$
Диапазон измерения температур, °С	5 (-40)...56
Погрешность измерения плотности, не более, %	1,7
Давление окружающей среды, Па	$133,3 \dots 10^6$
Температура окружающей среды, °С	1 (-40)...40 (70)
Средняя наработка на отказ, не менее, ч	15000
Питание	-220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, не более, В·А	100
Масса, не более, кг	27,6
Габариты, мм:	
датчик давления и температуры	Ш1 20×110
блок индикации	150×180×350

Устройство учёта ресурса выключателей (УУРВ) (рис. 3.40) предназначено для учета механического и коммутационного ресурса высоковольтных выключателей комплектных распределительных устройств (КРУЭ).

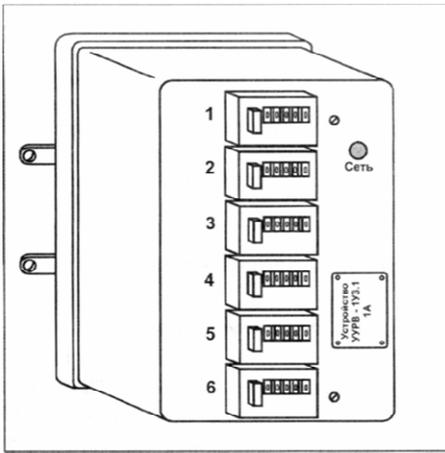


Рис. 3.40. Устройство учёта ресурса выключателей

Устройство *регистрирует*:

- количество и уровни отключаемых выключателем токов короткого замыкания (коммутационный ресурс);
- число срабатываний привода выключателя как на включение, так и на выключение (механический ресурс).

Устройство обеспечивает запоминание и отображение регистрируемой информации, её сохранение при пропадании питания.

УУРВ изготавливаются на номинальные токи 1 и 5 А.

Основные технические характеристики:

Число счётчиков механического ресурса	1
Число счётчиков коммутационного ресурса (по разным установкам тока короткого замыкания)	5
Рабочий диапазон температур, °С	-10...+40
Рабочий диапазон давлений, мм рт. ст.	400...800
Погрешность срабатывания, менее, %	5
Питание	-220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, не более, В·А	30
Масса, не более, кг	4,5
Габариты, мм	207×320×116

Прибор контроля приводов элегазовых выключателей (рис. 3.41) предназначен для измерения характеристик приводов выключателей в процессе их функционирования:

- при разработке и исследованиях;
- при приемке ОТК завода-изготовителя;
- при ремонте и настройке в эксплуатирующих организациях;
- при диагностике состояния приводов.

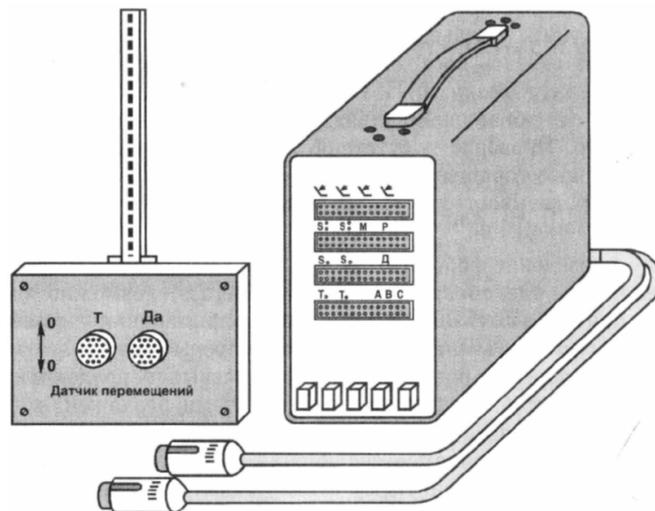


Рис. 3.41. Прибор контроля приводов элегазовых выключателей

Преимущества:

- многофункциональность;
- цифровая индикация показаний;
- возможности осциллографирования процесса замыкания (размыкания);

- большое число измеряемых характеристик (при включении и отключении):
 - полный ход (перемещение) контактов;
 - ход подвижного контакта в неподвижном;
 - мгновенная скорость движения контактов в момент их замыкания или размыкания;
 - максимальная скорость движения контактов;
 - средняя скорость движения контактов на задаваемом участке хода;
 - собственное время включения (отключения).
- определение разновременности срабатывания выключателей каждой из фаз.

Состав прибора:

- блок обработки индикации;
- датчик, устанавливаемый на штоке привода выключателя.

Основные технические характеристики:

Диапазон измерения хода контактов, мм	100...250
Погрешность измерения хода, не более, мм	±1
Диапазон измерения скорости, м/с	0...10
Погрешность измерения скорости, не более, м/с	±0,1
Рабочий диапазон температур, °С.....	-30...+50
Срок службы, не менее, лет.....	10
Питание	~220 В, 50 Гц
Масса, не более, кг:	
датчика	0,7
прибора.....	5
Габариты прибора, мм.....	150×180×350

3.8. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕГАЗОВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В ЗРУ

Химически чистый элегаз не имеет запаха. Так как он тяжелее воздуха, то при утечке скапливается на уровне пола, в кабельных каналах, подвалах и т. п. Скапливаясь, элегаз вытесняет воздух, и персонал, оказавшись в месте скопления элегаза, почувствует только недостаток кислорода, в результате чего может наступить удушье. Необходимо помнить, что противогаз в этом случае не может оказать пострадавшему помощь. Ему необходимо обеспечить доступ свежего воздуха. Поэтому дежурный персонал при входе в помещение РУ, где обнаружена утечка элегаза, должен обязательно включить вентиляцию. Проверка отсутствия элегаза в помещении должна проводиться с помощью горящей спички или свечи. Горение спички или свечи на уровне пола показывает отсутствие опасной концентрации элегаза и разрешает вход в помещение.

Поэтому проведение работ (в том числе и оперативных переключений) в помещениях РУ, где обнаружена утечка элегаза, возможно только при включенной приточно-вытяжной вентиляции и применении индивидуальных средств защиты. Это объясняется тем, что выбросы элегаза в атмосферу в случае прожига резервуаров выключателя, разрывов предохранительных мембран и т.д. могут быть загрязнены продуктами разложения. В продуктах разложения элегаза электрической дугой содержатся активные высокотоксичные фториды и сернистые соединения. Наличие продуктов разложения обнаруживается по неприятному едкому запаху. Эти химические соединения в газообразном и твердом состояниях чрезвычайно опасны для человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические сети и станции / под ред. Л.Н. Баптиданова. – М. – Л. : Государственное энергетическое изд-во, 1963. – 464 с.
2. Электрическая часть станций и подстанций / под ред. А.А. Васильева. – М. : Энергия, 1980. – 608 с.
3. Чунихин, А.А. Электрические аппараты / А.А. Чунихин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
4. Кох, Д. Свойства SF₆ и его использование в коммутационном оборудовании среднего и высокого напряжения / Д. Кох // Schneider Electric. –2006. – Вып. 2.
5. Силовой выключатель 3AP1FG для номинального напряжения 110 В: Руководство по эксплуатации / АО «Сименс». – 2001.
6. Макаров, Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4...35 кВ и 110...1150 кВ / Е.Ф. Макаров. – М. : Папирус Про, 2005. – Т. 5. – 624 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОТКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ	4
1.1. Общие сведения	4
1.2. Вольт-амперная характеристика газового разряда	5
1.3. Общие положения отключения электрических цепей	6
1.4. Описание отключения индуктивной цепи переменного тока	7
1.5. Характеристики дугового разряда	10
1.6. Дугогасительные устройства газового дутья	18
2. ЭЛЕГАЗ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРООБОРУДОВА- НИИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ	19
2.1. Общие сведения	19
2.2. Физические и химические свойства элегаза	22
2.3. Обзор элегазового коммутационного оборудования	28
2.4. Использование и обращение с элегазом в коммутацион- ном оборудовании	34
3. ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ	41
3.1. Общие сведения	41
3.2. Элегазовые выключатели 35 кВ фирмы «Элтек», Екате- ринбург	49
3.3. Элегазовые выключатели типа ВФ (фирма «ABB», Швеция)	55
3.4. Элегазовый выключатель типа НВ	59
3.5. Выключатели фирмы «Siemens» (Германия)	60
3.6. Элегазовый выключатель NXA-24	88
3.7. Приборы для обеспечения работы элегазовых выключа- телей	90
3.8. Техника безопасности при эксплуатации элегазовых вы- ключателей в ЗРУ	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	95