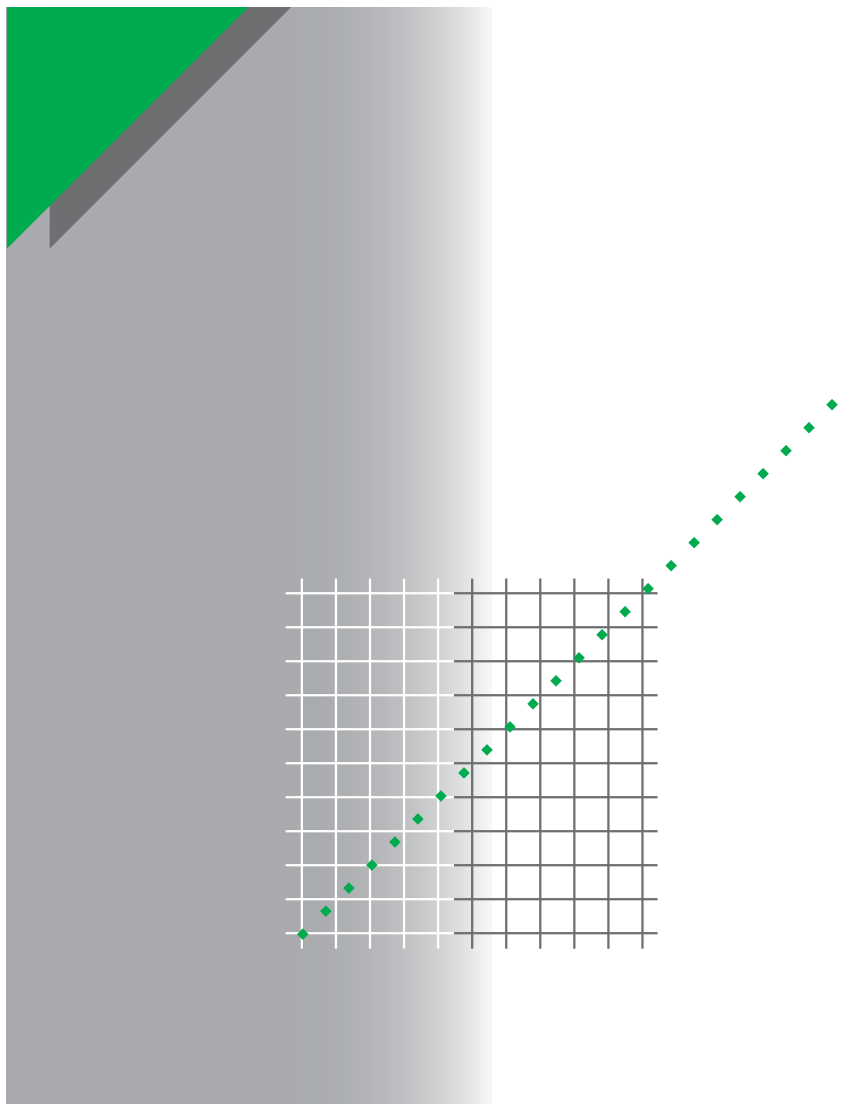


## Выпуск № 14

### Технология отключения в сетях среднего напряжения (СН)



Компания *Schneider Electric* приступила к выпуску **«Технической коллекции *Schneider Electric*»** на русском языке.

**Техническая коллекция** представляет собой серию отдельных выпусков для специалистов, которые хотели бы получить более подробную техническую информацию о продукции *Schneider Electric* и ее применении, в дополнение к тому, что содержится в каталогах.

В **Технической коллекции** будут публиковаться материалы, которые позволят лучше понять технические и экономические проблемы и явления, возникающие при использовании электрооборудования и средств автоматизации *Schneider Electric*.

**Техническая коллекция** предназначена для инженеров и специалистов, работающих в электротехнической промышленности и в проектных организациях, занимающихся разработкой, монтажом и эксплуатацией электроустановок, распределительных электрических сетей, средств и систем автоматизации.

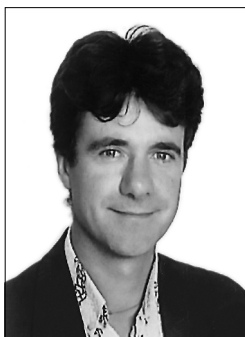
**Техническая коллекция** будет также полезна студентам и преподавателям ВУЗов. В ней они найдут сведения о новых технологиях и современных тенденциях в мире Электричества и Автоматики.

В каждом выпуске **Технической коллекции** будет углубленно рассматриваться конкретная тема из области электрических сетей, релейной защиты и управления, промышленного контроля и автоматизации технологических процессов.

**Валерий Саженов,**  
Технический директор  
ЗАО «Шнейдер Электрик»,  
Кандидат технических наук

## Выпуск № 14

### Технология отключения в сетях среднего напряжения (СН)



**Серж ТЕОЛЕЙР**

Научный работник, в 1983 году окончил Высшую национальную школу инженеров-электриков в Гренобле, имеет диплом доктора-инженера. В 1984 году поступил на работу в Schneider Electric. Занимался научными исследованиями и разработками, а также маркетингом по направлению «Силовые конденсаторы».

С 1995 года участвует в работах Schneider Electric в области стандартизации и технической коммуникации по направлению «Передача и распределение электрической энергии высокого / среднего напряжения (ВН/СН)».

---

### **$U_r$ :**

Номинальное напряжение, соответствующее действующему значению напряжения, которое должно выдерживать устройство в течение неопределенно долгого промежутка времени в заданных условиях использования и работы.

### **$I_{ss}$ :**

Ток короткого замыкания.

### **$I_r$ :**

Номинальный ток, соответствующий действующему значению тока, который должно выдерживать устройство в течение неопределенно долгого промежутка времени в заданных условиях использования и работы.

### **Коммутационный аппарат**

Устройство, предназначенное для включения и отключения тока в электрической цепи.

### **Аппаратура**

Общий термин, обозначающий коммутационные аппараты и их сочетание с соответствующими устройствами управления, измерения, защиты и регулировки.

### **Постоянная времени деионизации**

Время, необходимое для удвоения значения сопротивления дуги, при условии, что скорость его изменения остается постоянной.

### **Короткое замыкание**

Случайное или вынужденное соединение через сопротивление или относительно низкое полное сопротивление двух или нескольких точек цепи, обычно находящихся под разным напряжением.

### **Повреждение**

Случайное изменение нормального режима работы.

### **Замыкание на землю**

Повреждение в результате прямого или непрямого контакта провода с землей либо уменьшения сопротивления изоляции относительно земли ниже заданной величины.

### **Коэффициент перенапряжения**

Отношение пикового значения перенапряжения к пиковому значению максимального допустимого напряжения устройства.

### **Отключающая способность (PdC)**

Ожидаемый ток, который коммутационный аппарат должен отключать в заданных условиях использования и характеристиках.

### **Повторное зажигание**

Восстановление тока между контактами механического коммутационного устройства при выполнении операции отключения **за время до** четверти периода после прохождения тока через нуль.

### **Повторный пробой**

Восстановление тока между контактами механического коммутационного устройства при выполнении операции отключения **за время после** четверти периода после прохождения тока через нуль.

### **Перенапряжение**

Любое напряжение между проводом фазы и землей или нейтралью либо между двумя фазными проводами, пиковое значение которого превышает пиковую величину, соответствующую максимальному напряжению оборудования.

### **Переходное восстанавливающееся напряжение (TRV)**

Восстанавливающееся напряжение между контактами коммутационного устройства, сохраняющееся в течение периода времени, когда это напряжение имеет выраженный переходный характер.

### **Номинальное значение**

Величина, обычно устанавливаемая производителем для заданных условий эксплуатации какого-либо элемента, устройства или оборудования.

# Технология отключения в сетях среднего напряжения (СН)

Отключение тока является необходимым действием, выполняемым в электрической цепи с целью обеспечения безопасности людей и оборудования в случае возникновения повреждения, а также для управления и контроля распределения и использования электрической энергии.

Предметом данной работы является подробное представление преимуществ, недостатков и областей применения уже используемых и новых технологий отключения по среднему напряжению.

После описания теоретических аспектов, характеризующих токи отключения и процесс отключения, автор затрагивает тему отключения в воздухе, в масле, в вакууме и в элегазе (среда SF<sub>6</sub>) и в конце описания дает две сравнительных таблицы.

В настоящее время наиболее предпочтительной является технология отключения с разрывом электрической дуги либо в элегазе, либо в вакууме. Эта технология заслуживает подробного анализа.

## Содержание

	<i>Стр.</i>
<b>1 Введение</b>	<b>4</b>
<b>2 Отключение тока нагрузки и тока повреждения</b>	
2.1. Принцип отключения	6
2.2 Отключение тока нагрузки	9
2.3 Отключение тока повреждения	13
<b>3 Технологии отключения</b>	
3.1 Среда отключения	17
3.2 Отключение в воздухе	18
3.3 Отключение в масле	19
3.4 Отключение в вакууме	21
3.5 Отключение в элегазе (среда SF <sub>6</sub> )	24
3.6 Сравнение различных методов отключения	29
3.7 Каковы возможности использования других технологий отключения?	30
<b>4 Заключение</b>	<b>31</b>
<b>Библиография</b>	<b>32</b>

# 1 Введение

От электростанции электрическая энергия подается на пункты потребления по электрической сети, схема которой представлена на **рисунке 1**.

Необходимо иметь возможность отключить ток в любой точке сети с целью обеспечения эксплуатации и технического обслуживания или для защиты сети в случае возникновения повреждения. Требуется также обеспечить восстановление тока в различных ситуациях, при нормальном режиме работы или при повреждении. Для этого используются отключающие устройства, выбор которых обуславливается характером тока отключения и областью применения (см. **рис. 2**). Токи отключения можно разделить на три категории:

- Ток нагрузки, как правило, меньше или равен номинальному току  $I_n$ . Номинальный ток  $I_n$  является действующим значением тока, который должно выдерживать оборудование в течение неопределенно долгого промежутка времени в заданных условиях использования и работы.
  - Ток перегрузки, когда ток превышает свое номинальное значение.
  - Ток короткого замыкания, в случае возникновения повреждения в сети, значение которого зависит от мощности источника энергии, характера повреждения и величины полного сопротивления со стороны источника питания цепи.
- Кроме того, независимо от условий – отключение, включение или продолжительный режим работы, все эти устройства подвергаются действию следующих нагрузок:
- механическое напряжение в диэлектрике от воздействия электрического напряжения;
  - тепловое напряжение (обычные токи и токи повреждения);

- электродинамические силы (ток повреждения);
- механическое напряжение.

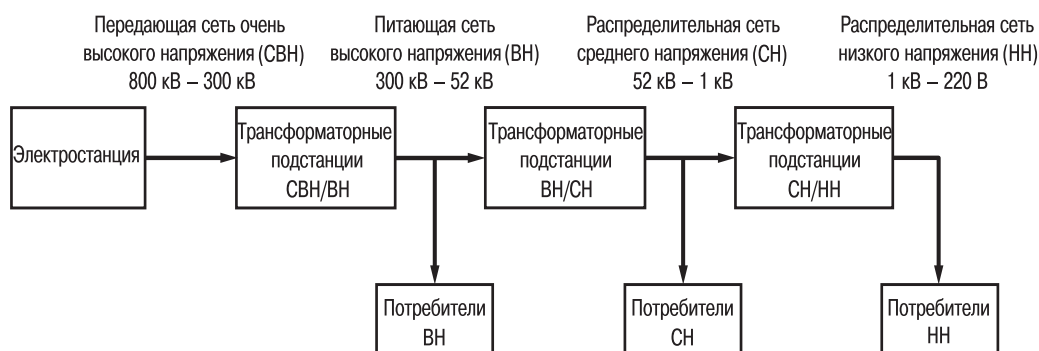
Наиболее значительные нагрузки связаны с переходными процессами, которые возникают при выполнении коммутационных операций и в случае отключения токов повреждения с разрывом электрической дуги. Несмотря на использование современных методов моделирования, представляется сложным спрогнозировать поведение этой дуги.

Тем не менее, накопленный опыт, используемые технологии и экспериментальные исследования, в значительной мере, способствуют успешной разработки отключающих устройств. Эти устройства называются «электромеханическими», так как на сегодняшний день технология статического отключения в сетях среднего и высокого напряжения с точки зрения технико-экономических показателей пока еще не рассматривается.

Таким образом, из всех типов отключающих устройств наибольший интерес представляют (автоматические) выключатели, так как они способны устанавливать, выдерживать и отключать ток в нормальном и аномальном режимах (короткое замыкание).

В данной работе речь идет, главным образом, об отключении переменного тока с помощью выключателя. Рассматриваемый диапазон относится к области среднего напряжения (1 – 52 кВ), поскольку именно для этого уровня напряжения существует наибольшее количество методов отключения.

В первой части настоящего документа рассматриваются явления, возникающие при отключении и включении. Во второй части представлены четыре типа технологий отключения, получившие в настоящее время наибольшее распространение, а именно, метод отключения в воздухе, масле, вакууме и элегазе.



**Рис. 1:** Схема электрической сети

	<b>■ Определение в соответствии со стандартом МЭК</b> <b>■ Функция</b>	Включение			Отключение			Изол.
<b>Разъединитель</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Механическое коммутационное устройство, обеспечивающее в положении отключения секционирование, соответствующее указанным в стандарте требованиям.</li> <li>■ Данное устройство гарантирует безопасную изоляцию цепи, часто используется вместе с заземляющим разъединителем.</li> </ul>	да	нет	да <input type="checkbox"/>	да	нет	нет	да
<b>Заземляющий разъединитель</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Специальный разъединитель, разработанный для подсоединения фазных проводов к земле.</li> <li>■ Данное устройство предназначено для обеспечения безопасности в случае проведения работ в цепях, используется для соединения токопроводящих проводов, находящихся не под напряжением, с землей.</li> </ul>	да	нет	да <input type="checkbox"/>	да	нет	нет	нет
<b>Выключатель</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Механическое коммутационное устройство, способное включать, выдерживать и прерывать ток в нормальных условиях работы цепи, в том числе, ток перегрузки при эксплуатации сети.</li> <li>■ Данное устройство предназначено для управления цепями (отключение и включение), часто используется для обеспечения функции секционирования. В распределительных сетях среднего напряжения (СН) общего пользования и частных сетях данное устройство часто применяется вместе с предохранителями.</li> </ul>	да	да	да	да	да	нет	да <input type="checkbox"/>
<b>Контактор</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Механическое коммутационное устройство, имеющее одно нерабочее положение, управляемое не вручную, способное устанавливать, выдерживать и прерывать ток в нормальных условиях работы цепи, в том числе в режиме перегрузки при эксплуатации.</li> <li>■ Данное устройство рассчитано на очень частое срабатывание, используется, главным образом, для управления двигателями.</li> </ul>	да	да	да	да	да	нет	нет
<b>Автоматический выключатель</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Механическое коммутационное устройство, способное включать, выдерживать и прерывать ток в нормальных условиях работы цепи, а также в ненормальных условиях эксплуатации цепи, указанных в стандарте, например, в случае короткого замыкания.</li> <li>■ Коммутационное устройство общего назначения. Помимо управления цепями данное устройство обеспечивает их защиту от электрических повреждений. Используется вместо контакторов для обеспечения управления двигателями большой мощности в сетях среднего напряжения (СН).</li> </ul>	да	да	да	да	да	да	нет

= в вакууме   
 = под нагрузкой   
 = в условиях короткого замыкания   
 = в соответствии с условиями эксплуатации

**Рис. 2** : Различные коммутационные устройства, их функции и назначение

## 2. Отключение тока нагрузки и тока повреждения

### 2.1. Принцип отключения

Идеальное устройство отключения – это устройство, способное мгновенно отключать как номинальные токи, так и токи повреждения. Ни один аппарат не может произвести это отключение без возникновения между контактами электрической дуги, которая рассеивает электромагнитную энергию электрической цепи, ограничивает перенапряжения, а также задерживает полное отключение тока.

#### Идеальный выключатель

Теоретически, иметь возможность мгновенно прерывать ток – это обладать способностью непосредственно переходить из состояния проводника в состояние изолятора. Таким образом, сопротивление подобного «идеального» прерывателя должно от нуля сразу же переходить в бесконечность (см. рис. 3).

Такое устройство могло бы обладать следующими свойствами:

- поглощать всю электромагнитную энергию, накопленную в цепи до отключения, например, в случае короткого замыкания,  $\frac{1}{2} L I^2$  вследствие индуктивного характера сетей;

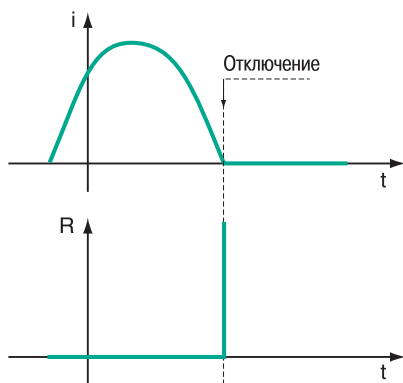
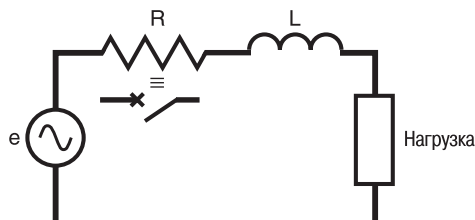


Рис. 3 : Отключение с помощью идеального выключателя

- выдерживать перенапряжение ( $L di/dt$ ), возникающее на выводах устройства, которое могло бы иметь значение бесконечности, если переход от состояния изолятора в состояние проводника происходил за бесконечно малый промежуток времени, что неизбежно привело бы к пробоем диэлектрика.

Если представить, что эти сложности можно преодолеть, добившись полной синхронизации естественного перехода тока через нуль и перехода из состояния изолятора в состояние проводника устройства, то необходимо также учитывать еще одно достаточно серьезное явление, а именно, возникновение переходного восстанавливающегося напряжения (TRV).

В действительности, непосредственно после отключения тока (восстанавливающегося) напряжение на выводах выключателя добавляется к напряжению сети, которое в этот момент является максимальным для индуктивных цепей. Это происходит без резкого разрыва цепи из-за наличия емкостного сопротивления сети. Таким образом, устанавливается переходный режим, обеспечивая добавление возникшего напряжения к напряжению сети. Это напряжение, называемое переходным восстанавливающимся напряжением (TRV), обусловлено характеристиками сети, и скорость повышения этого напряжения ( $dv/dt$ ) может быть значительной (порядка кВ/мкс). Проще говоря, это означает, что для успешного отключения идеальный выключатель должен выдерживать напряжение в несколько киловольт в течение периода менее микросекунды после перехода из состояния проводника в состояние изолятора.

#### Отключение с разрывом электрической дуги

Возникновение электрической дуги объясняется двумя причинами:

- Практически невозможно разомкнуть контакты точно в момент естественного прохождения тока через нуль из-за погрешностей в измерении и в организации управления: при действующем значении 10 кА величина мгновенного тока за 1 мс до прохождения через нуль, по-прежнему, составляет 3000 А. Мгновенное перенапряжение ( $L di/dt$ ), которое бы возникло на выводах устройства, в случае если бы выключатель сразу же перешел в состояние изолятора, было бы бесконечным и незамедлительно вызвало бы пробой в еще очень малом промежутке между контактами.

- Размыкание контактов должно происходить с довольно значительной скоростью, чтобы электрическая прочность между контактами была больше переходного восстанавливающегося напряжения. Для этого необходима механическая энергия, по значению близкая к бесконечности, что на практике не может обеспечить ни одно устройство.



Рассмотрим процесс отключения с разрывом электрической дуги. Он состоит из трех этапов:

- период ожидания;
- период затухания;
- последуговой период.

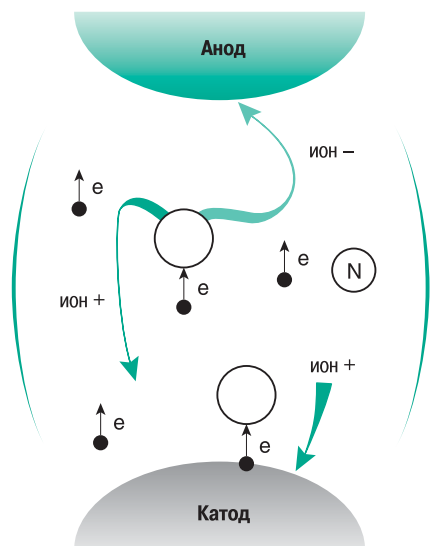
■ Период ожидания:

Перед прохождением тока через нуль два контакта размыкаются, в результате чего в пространстве между ними происходит электрический пробой. Возникшая электрическая дуга представляет собой плазменный столб, состоящий из ионов и электронов, образующихся в промежутке между контактами или из паров металла, выделяемых электродами (см. **рис. 4**). Этот столб остается токопроводящим, пока в нем сохраняется достаточно высокая температура. Таким образом, электрическая дуга «поддерживается» энергией, которую она рассеивает в соответствии с эффектом Джоуля-Ленца.

Напряжение, возникающее между двумя контактами благодаря наличию сопротивления дуги и падения поверхностного напряжения (катодное и анодное напряжение), называется напряжением дуги ( $U_a$ ). На величину этого напряжения, которое зависит от характера дуги, влияет сила тока и теплообмен в пространстве (контакт со стенами, материалами и т.д.). Такой теплообмен, возникающий в результате излучения, конвекции и теплопроводности, характеризует мощность охлаждения устройства.

Напряжение дуги играет основную роль, так как обуславливает мощность, рассеиваемую в устройстве

$$\text{во время отключения: } W = \int_{t_0}^{t_{\text{arc}}} U_a \cdot idt ,$$



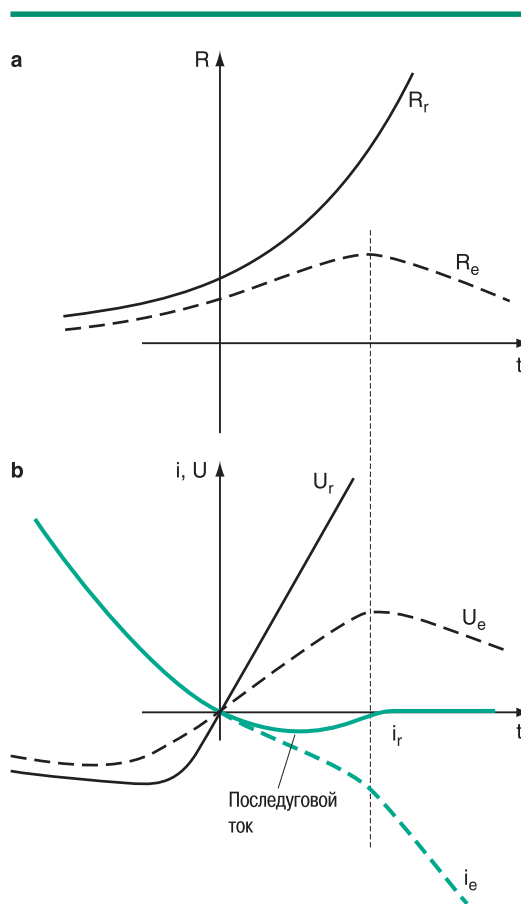
**Рис. 4** : Образование электрической дуги в газовой среде

где:  $t_0$  – момент возникновения дуги и  $t_{\text{arc}}$  – момент отключения.

В сетях среднего и высокого напряжения значение  $U_a$  всегда значительно меньше напряжения сети и, следовательно, не оказывает ограничивающего действия, за исключением отдельных случаев, рассматриваемых ниже. Таким образом, отключение производится вблизи «естественного» нуля переменного тока.

■ Период затухания

Отключение тока, соответствующего затуханию электрической дуги, происходит при прохождении тока через нуль, при условии, что пространственная среда быстро становится изолирующей. Для этого канал ионизированных молекул должен быть перекрыт. Затухание происходит следующим образом: вблизи нуля тока сопротивление дуги возрастает по кривой, которая зависит главным образом от постоянной времени деионизации промежутка между контактами (см. **рис. 5**).



**Рис. 5** : Изменение сопротивления дуги **[a]**, и напряжения и тока **[b]** в течение периода затухания в случае успешного отключения (**r**) или теплового повреждения (**e**)

При прохождении тока через нуль значение этого сопротивления не является бесконечным, и послеразрядный ток по-прежнему проходит через устройство в результате создания на его выводах переходного восстанавливающегося напряжения. Если мощность, рассеиваемая в результате эффекта Джоуля-Ленца, больше характеристической мощности охлаждения устройства, то пространственная среда больше не охлаждается, и возникает тепловой пробой, за которым следует новый электрический пробой: происходит термическое повреждение.

Если, напротив, повышение напряжения не превосходит определенное критическое значение, то сопротивление дуги может достаточно быстро повыситься, чтобы мощность, рассеиваемая в пространственной среде, по-прежнему не превышала мощность охлаждения устройства, что позволит, таким образом, предотвратить тепловой пробой.

#### ■ Последуговой период

Для успешного отключения необходимо также, чтобы скорость восстановления электрической прочности была больше скорости повышения напряжения TVR (см. рис. 6), в противном случае возникает пробой диэлектрика. В момент электрического пробоя пространственная среда снова становится проводником, что порождает переходные процессы, которые подробнее будут представлены ниже. Эти повреждения диэлектрика после отключения называются:

- повторное зажигание, в случае если они возникают в течение четверти периода, следующего за прохождением тока через нуль;
- повторный пробой, если они возникают после.

■ Напряжение TVR в соответствии со стандартами Несмотря на то, что скорость повышения переходного восстанавливающегося напряжения (TVR) оказывает основное влияние на отключающую способность устройств, не представляется возможным точно определить значение этого напряжения для всех конфигураций сетей. В соответствии со стандартом МЭК 60056 для каждого номинального напряжения установлен диапазон значений, который соответствует обычным требованиям (см. рис. 7).

Следовательно, устанавливается отключающая способность выключателя, с учетом его номинального напряжения и соответствующего номинального

напряжения TVR, как максимальное значение тока, который данное устройство способно отключить. Таким образом, выключатель должен обеспечивать отключение любого тока меньше его отключающей способности (PdC) при любом напряжении TVR, значение которого не превышает номинальное напряжение TVR.

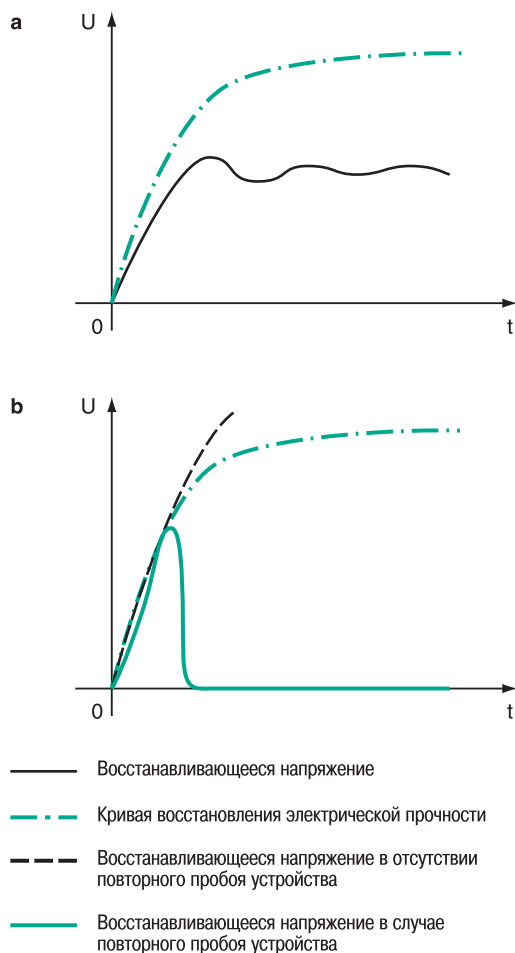


Рис. 6 : Кривые восстановления электрической прочности, успешное отключение [a] или повреждение диэлектрика [b]

Номинальное напряжение ( $U_n$ , кВ)	7,2	12	17,5	24	36	52
Пиковое значение напряжения TVR ( $U_c$ , кВ)	12,3	20,6	30	41	62	89
Время $t_3$ (мкс)	52	60	72	88	108	132
Скорость повышения ( $U_c / t_3$ )	0,24	0,34	0,42	0,47	0,57	0,68

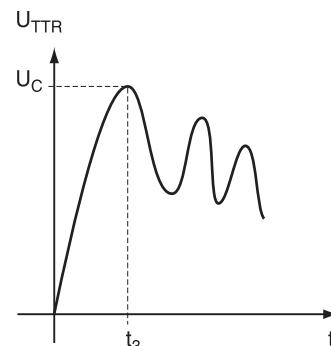


Рис. 7 : Номинальное переходное восстанавливающееся напряжение (TVR) в случае короткого замыкания на выводах выключателя (§ 4.102 стандарта МЭК 60056)

## 2.2. Отключение тока нагрузки

При обычной эксплуатации сетей среднего напряжения отключение цепи происходит в следующих случаях:

■ если ток нагрузки, составляющий от нескольких ампер до нескольких сотен ампер, меньше тока короткого замыкания (10 – 50 кА);

■ если коэффициент мощности больше или равен 0,8, фазовый сдвиг между напряжением электрической цепи и током незначительный, и минимальное напряжение создается вблизи минимальных значений тока (цепь с большим активным сопротивлением).

При этом на выводах устройства отключения возникает напряжение, тогда как напряжение сети не создает, практически, никаких переходных процессов (см. рис. 8). В таких условиях отключение происходит при прохождении тока через нуль, без каких-либо трудностей, так как устройство рассчитано на ток большой силы, сдвинутый по фазе на  $90^\circ$  относительно напряжения.

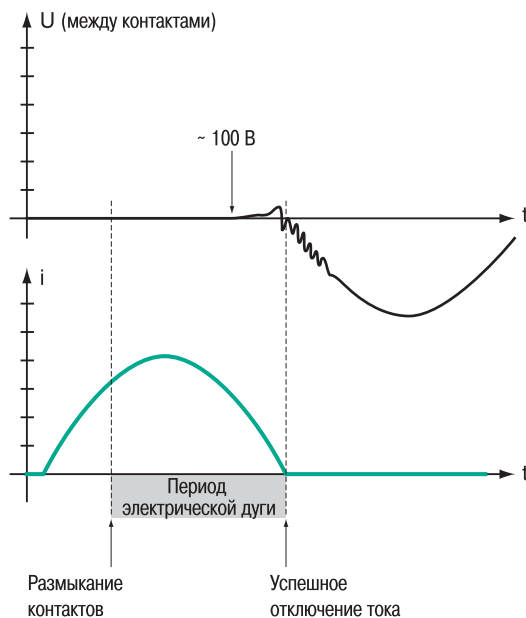
### Отключение индуктивного тока

#### ■ Обрыв тока

При отключении индуктивного тока могут возникать перенапряжения, вызванные ранним отключением тока.

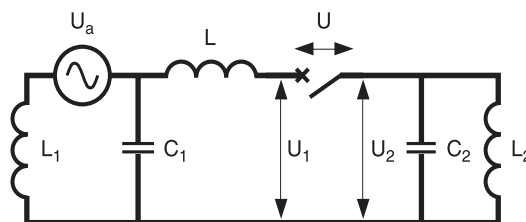
Это явление называется «обрывом тока».

Для слабых индуктивных токов, значение которых составляет от нескольких ампер до нескольких десятков ампер, охлаждающая способность устройств, рассчитанных на ток короткого замыкания, намного больше энергии, рассеиваемой в дуге. Это вызывает неустойчивость дуги, в результате чего возникает колебательный процесс, связанный с обменом энергией



**Рис. 8** : Возникновение очень слабых переходных процессов при отключении тока в случае резистивной нагрузки

между емкостями, «видимыми» устройством отключения и катушками индуктивности (см. рис. 9 и 10). Во время этого колебательного процесса на высокой частоте (порядка 1 МГц) возможно прохождение тока через нуль, и выключатель может произвести отключение тока до нормального прохождения через нуль на промышленной частоте (50 Гц).

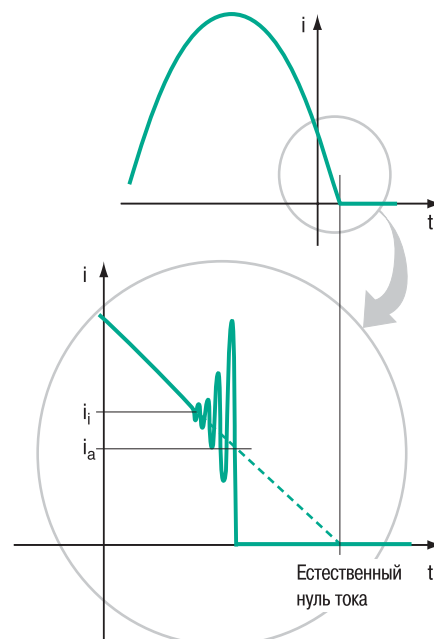


$L_1, C_1$  – катушка индуктивности и емкость, расположенные со стороны источника питания;

$L_2, C_2$  – катушка индуктивности и емкость, расположенные со стороны первичной обмотки трансформатора;

$L$  – катушка индуктивности для подсоединения со стороны источника питания к выключателю  $D$  сборных шин или кабелей.

**Рис. 9** : Схема цепи при отключении слабого индуктивного тока



$i$  – ток в выключателе;

$i_i$  – значение тока, вызывающего неустойчивое состояние;

$i_a$  – значение тока обрыва.

**Рис. 10** : Колебательный процесс на высокой частоте или «обрыв тока» при отключении индуктивного тока

Это явление «обрыва тока» сопровождается переходным перенапряжением, создаваемым, главным образом, колебательным режимом, который устанавливается со стороны нагрузки (см. рис. 11).

Максимальное значение перенапряжения ( $U_{Cmax}$ ) со стороны нагрузки можно рассчитать по следующей формуле:

$$U_{Cmax}^2 = U_a^2 + \left[ \frac{\eta_m \cdot L_2 \cdot i_a^2}{C_2} \right],$$

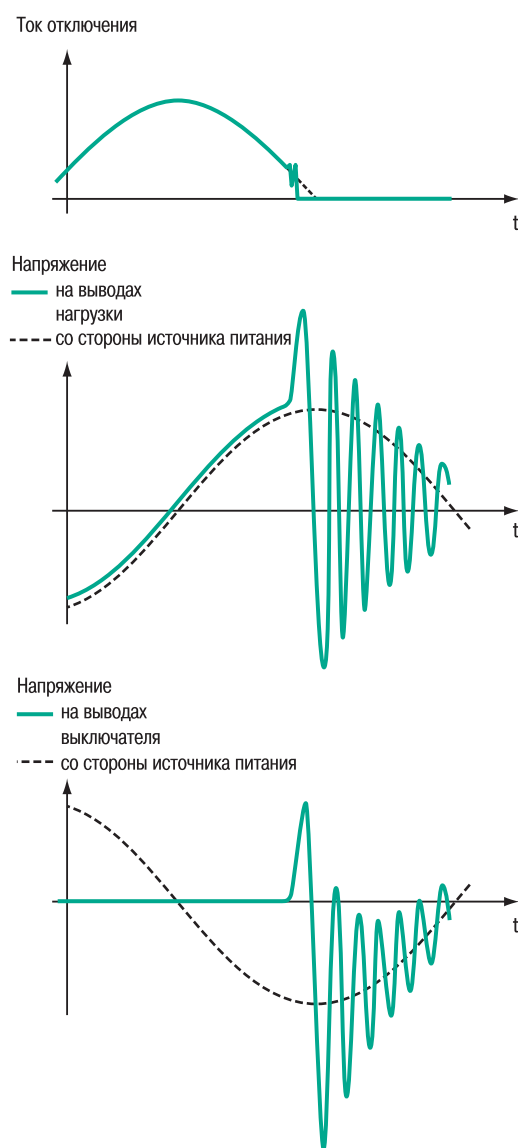
где:

$U_a$  – напряжение обрыва;

$i_a$  – ток обрыва;

$Z_m$  – магнитный КПД.

Со стороны источника питания значение напряжения равно  $U_a$  и стремится к величине напряжения



**Рис. 11** : Кривые тока и напряжения в случае отключения слабых индуктивных токов

сети  $U_n$  при колебательном режиме, которая зависит от  $C_1$  и  $L_1$ . Значение напряжения между контактами выключателя равно разнице между этими двумя напряжениями.

Эти отношения ясно демонстрируют влияние характеристик сети, с учетом того, что ток обрыва сильно зависит от величины  $C_1$  и от использования соответствующего устройства.

#### ■ Повторное зажигание

Значительные перенапряжения могут быть вызваны другим явлением. Речь идет о повторном зажигании при отключении.

В целом, повторное зажигание неизбежно в случае непродолжительного времени горения дуги, так как расхождение контактов незначительно, чтобы выдерживать напряжение, возникающее на выводах устройства. Это происходит всякий раз, когда дуга возникает непосредственно перед прохождением тока через нуль.

В этом случае напряжение со стороны нагрузки добавляется к напряжению со стороны источника питания в переходном колебательном режиме с высокой частотой (порядка 1 МГц). Таким образом, пиковое значение колебания, определяемое по напряжению нагрузки паразитных емкостей со стороны потребителя, в два раза превышает предыдущее значение.

Если выключатель способен отключать ток высокой частоты, то это устройство может произвести отключение при первом прохождении тока через нуль, через несколько микросекунд после повторного зажигания.

Возникновение нового повторного зажигания весьма вероятно вследствие увеличения амплитуды колебаний, и это явление повторяется, вызывая скачок напряжения, который может быть опасным для нагрузки.

Следует отметить, что подобное явление происходит при включении устройства: возникает предпробойное состояние, когда контакты находятся достаточно близко друг к другу. Как и в случае последовательного повторного зажигания, с каждой попыткой отключения накопленная энергия возрастает, но повышение напряжения ограничено сближением контактов.

#### ■ Области применения

Для сетей среднего напряжения речь идет о намагничивающих токах ненагруженных или слабонагруженных трансформаторов, двигателях и шунтирующих индуктивностях.

□ Ненагруженные или слабонагруженные трансформаторы.

В соответствии с требованиями управления сетями трансформаторы могут работать в режиме малой нагрузки (например, в ночное время). Ток, соответствующий намагничивающему току трансформаторов, составляет от нескольких ампер до нескольких десятков ампер, и коэффициент обрыва этого тока может быть значительным. Однако, даже если обрыв тока происходит при его пиковом значении, коэффициент возникающего перенапряжения обычно бывает небольшим, с учетом используемых емкостей и индуктивностей.

При организации электроснабжения по воздушным сетям риск, связанный с возникновением тока перенапряжения, уменьшается, поскольку разрядники ограничивают перенапряжение.

Однако в соответствии со стандартами для трансформаторов предусмотрены испытания импульсной волной, позволяющие проверить способность трансформаторов выдерживать коммутационное перенапряжение.

#### □ Шунтирующая индуктивность

Эта индуктивность используется, чтобы компенсировать реактивную составляющую линий или для предотвращения повышения напряжения в очень длинных линиях и в линиях с малой нагрузкой. Чаще всего шунтирующая индуктивность применяется в сетях высокого напряжения (ВН), но так же может использоваться в сетях среднего напряжения (СН).

Перенапряжение отключения обычно меньше коэффициента перенапряжения, равного 2,5, в результате присутствия соответствующего полного сопротивления. Если существует риск превысить этот предел, то параллельно с выключателем должны быть установлены разрядники и резисторы.

#### □ Двигатели

Статорная и роторная обмотки двигателя работают таким образом, что ток, который они потребляют без нагрузки, а также их пусковой ток является, в основном, индуктивным. По причине большого количества совершаемых коммутационных операций очень часто возникают перенапряжения, которые вызывают постепенное ослабление или повреждение изоляции, в результате чего эти перенапряжения могут стать критическими, в частности, в случае если отключение производится в фазе пуска.

В целом, необходимо выбирать выключатели, которые не дают повторного пробоя или обеспечивают очень малую вероятность повторного пробоя. В противном случае, можно установить на выводах двигателя систему R-C для отвода переходного тока высокой частоты или систему ограничения напряжения типа ZnO.

#### ■ Стандарты на отключение индуктивного тока

Не существует международных стандартов на процедуру отключения индуктивного тока, однако в техническом отчете 61233 МЭК определены требования к проведению испытаний выключателей, используемых для подачи питания на двигатели и шунтирующие индуктивности.

#### □ Двигатели

Для выключателей, рассчитанных на номинальное напряжение от 1 до 17,5 кВ, предусмотрена стандартная цепь, моделирующая блокировку ротора двигателя, при проведении лабораторных испытаний.

#### □ Шунтирующая индуктивность

Шунтирующая индуктивность не очень часто применяется в сетях среднего напряжения, тем не менее, она иногда используется в сетях с напряжением 36 кВ.

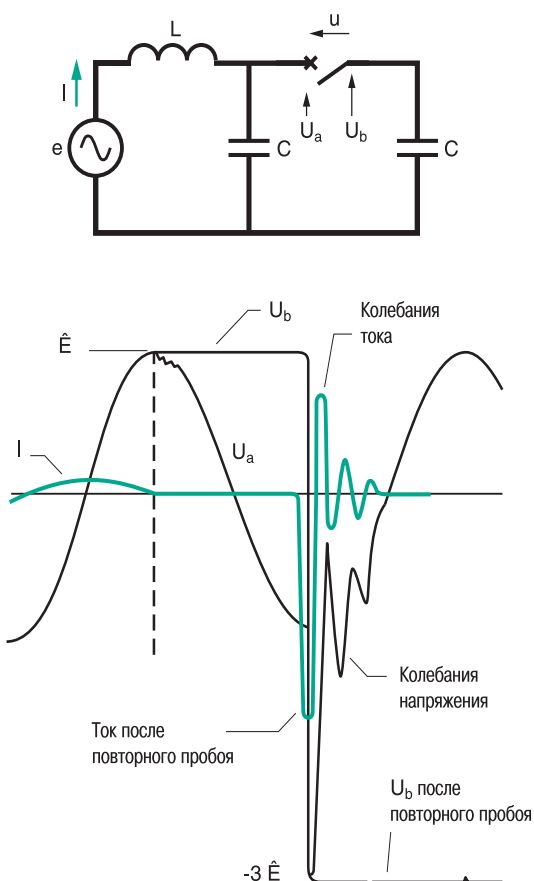
Лабораторные испытания, выполняемые на трехфазной цепи, предусмотрены только для сетей с номинальным напряжением больше 12 кВ.

### Отключение емкостного тока

При отключении емкостного тока может возникать перенапряжение вследствие повторного пробоя в течение периода восстановления напряжения.

■ Теоретически, отключение емкостного тока может происходить без затруднений. В действительности, когда устройство отключает ток, напряжение на выводах генератора имеет максимальное значение, так как ток и напряжение смещены по фазе на  $\pi/2$ ; поскольку конденсатор остается заряженным при этом значении после отключения тока, напряжение на выводах выключателя, будучи первоначально нулевым, медленно повышается, без создания переходного восстанавливающегося напряжения (TVR) и с производной по времени, в начале равной нулю.

■ С другой стороны, существует проблема возникновения повторного пробоя. В действительности, по истечении полупериода напряжение сети инвертируется, и напряжение на выводах выключателя достигает двукратного значения пикового напряжения. Таким образом, риск возникновения повторного пробоя между контактами возрастает, и это усугубляется тем, что отключение происходит медленно. Если повторный пробой возникает на максимуме напряжения, то емкость разряжается на индуктивность цепи, создавая колебательный ток трехкратного пикового напряжения  $3\hat{E}$  (см. рис. 12). Если при следующем прохождении тока через нуль произведено успешное отключение, конденсатор остается заряженным до величины напряжения  $3\hat{E}$ .



**Рис. 12** : Схема цепи с емкостной нагрузкой в случае отключения, когда выключатель не производит достаточно быстрого размыкания цепи и вследствие последовательных повторных пробоев может возникнуть опасное перенапряжение на нагрузке

Когда напряжение «е» снова инвертируется, напряжение на выводах выключателя равно  $5 \hat{E}$ . Таким образом, это перенапряжение может вызвать новый повторный пробой. Это явление может происходить при напряжении на выводах выключателя  $5 \hat{E}$ ,  $7 \hat{E}$  и т.д.

При любом повторном пробое, который происходит по истечении четверти периода после прохождения тока через нуль, может наблюдаться «скачок напряжения», в результате чего создается недопустимое пиковое напряжение для нагрузки.

Напротив, повторное зажигание, возникновение которого обусловлено размерами отключающего устройства, является допустимым: колебательное напряжение на выводах конденсатора, по абсолютному значению, остается меньше максимального значения напряжения генератора, что не представляет особой опасности для выключателей.

Напомним, что испытание перенапряжением конденсаторов выполняется при 2,25-кратном значении их номинального напряжения.

Таким образом, восстановление электрической прочности промежутка между контактами должно происходить достаточно быстро, чтобы не возникло повторного пробоя по истечении четверти периода.

#### ■ Установление емкостного тока и повторный пробой

При включении прибора управления, подающего питание на емкостные нагрузки возникают явления, свойственные емкостным цепям.

Так, при включении конденсаторной батареи происходят значительные колебания тока при повышенной частоте (см. **рис. 13**), максимальная амплитуда колебаний определяется по формуле:

$$I_c = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L_0 + L}},$$

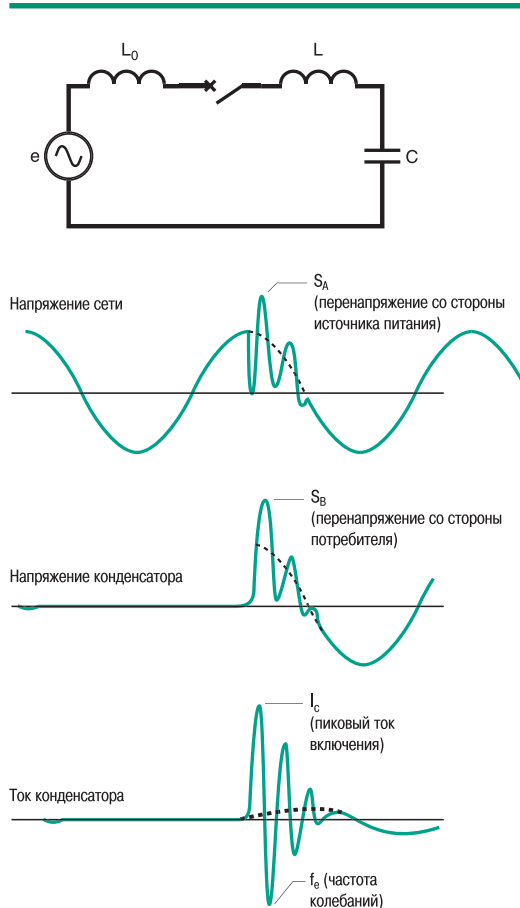
где:

$L_0$  – индуктивность сети со стороны источника питания;

$L$  – индуктивность соединения с конденсаторной батареей, обычно меньше  $L_0$ .

В случае использования регулируемой многоступенчатой конденсаторной батареи это явление еще более усиливается за счет энергии, накопленной в уже включенных конденсаторах: переходный ток может в несколько сотен раз превышать номинальный ток с частотой, составляющей несколько килогерц, из-за низкого полного сопротивления соединения между ступенями батареи.

В случае повторного пробоя на уровне контактов прибора управления (зажигание токопроводящей дуги до соприкосновения контактов) этот повышенный переходный ток является причиной возникновения преждевременной эрозии контактов и, возможно, их



**Рис. 13** : Форма тока и напряжения (перенапряжение предпробойного состояния) в случае подсоединения к сети одноступенчатой конденсаторной батареи

сваривания. Чтобы уменьшить действие этих явлений, ограничивающие дроссели (импульсное полное сопротивление) соединяются последовательно с конденсаторной батареей.

Таким образом, для конденсаторной батареи с  $n$  ступенями и удельной емкостью  $C$  предыдущая формула будет выглядеть следующим образом:

$$I_c = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L} \frac{n}{n+1}},$$

где:

$L$  – ограничивающая индуктивность (импульсное полное сопротивление), повышенная относительно  $L_0$ .

Следует отметить, что существуют устройства, адаптированные к данному виду применения. И при заказе это должно быть оговорено.



#### ■ Области применения

Емкостный ток имеет, главным образом, два источника происхождения: он возникает в кабелях и линиях, а также в конденсаторных батареях.

#### □ Кабели и линии

Речь идет о зарядном токе ненагруженных кабелей и дальних воздушных линий. В некоторых европейских странах (прежде всего, в Южной Европе, Франции, Италии, Испании и т.д.) воздушные сети среднего напряжения (СН) имеют большую протяженность и, соответственно, особенно чувствительны к атмосферным перенапряжениям, из-за которых часто происходит большое количество отключений в этих линиях и, следовательно, повторных включений.

#### □ Конденсаторные батареи

Они подключаются как ответвление к сетям и предназначены для компенсации реактивной энергии линий (передающая сеть) и нагрузки (среднее напряжение (СН) / низкое напряжение (НН)). Конденсаторные батареи позволяют увеличить передаваемую активную мощность и снизить потери в линии. Используются:

- одна конденсаторная батарея в случае слабой компенсации и устойчивой нагрузки;
- ступени конденсаторных батарей (блоком или разделенные).

Этот тип конденсаторных батарей очень широко применяется на крупных предприятиях (благодаря большой установленной мощности) и на распределительных пунктах. Батареи оснащены автоматикой, что позволяет выполнять большое количество коммутационных операций (несколько операций в день): устройства, обеспечивающие данные требования, указаны в стандартах и нормах.

#### ■ Стандарты на отключение емкостного тока

Стандартом МЭК 60056 (4-е издание, 1987 год) предусмотрены, для всех напряжений, номинальные значения отключающей способности выключателей,

обеспечивающих защиту кабелей, которые могут быть ненагруженными. Но эти требования не являются обязательными и не выполняются при значениях напряжения меньше 24 кВ.

Что касается номинальной отключающей способности выключателей, обеспечивающих защиту ненагруженных линий, то требования стандарта распространяются на устройства, номинальное напряжение которых  $\geq 72$  кВ. Для конденсаторных батарей никаких значений в стандарте не указано.

Для устройств управления и защиты стандартом МЭК 60056 предусмотрены также испытания с коммутационными операциями (см. рис. 14) по емкостному току для ненагруженных линий, ненагруженных кабелей и одноступенчатых конденсаторных батарей, но для дальних линий и блоков фильтров никаких указаний в данном стандарте нет. Изменения в стандартах в отношении применения для емкостного тока касаются устройств с малой вероятностью повторного пробоя с подробным указанием величин и предельного количества коммутационных операций, гарантирующих их пригодность к эксплуатации.

Режим испытаний	I <sub>сс</sub> цепи питания в зависимости от PdC выключателя (I <sub>сс</sub> / PdC) x100	Испытательный ток (% от I <sub>сара</sub> )
1	< 10	20 а 40
2	< 10	> 100
3	100	20 а 40
4	100	>100

Рис. 14 : Испытания в соответствии со стандартом МЭК 60056 для устройств управления и защиты

## 2.3. Отключение тока повреждения

В случае короткого замыкания фазовый сдвиг между током и напряжением всегда очень значительный ( $0,07 \leq \cos \varphi \leq 0,15$ ), так как сети, главным образом, являются индуктивными. При прохождении тока через нуль напряжение сети становится максимальным или почти достигает своего максимума.

В сетях среднего напряжения (СН) ток короткого замыкания составляет несколько десятков тысяч ампер, следовательно, отключение производится без обрыва тока, так как электрическая дуга очень устойчива. Как было описано выше, процесс отключения состоит из трех этапов:

- период ожидания прохождения тока через нуль;
- период затухания;
- период восстановления.

### Ток короткого замыкания

Из всех типов замыкания (трехфазное, двухфазное, однофазное и замыкание на землю) наиболее часто случается однофазное замыкание на землю (80% коротких замыканий). Как правило, причиной этого повреждения является пробой изоляции между фазой и землей вследствие атмосферных перенапряжений, повреждения или перекрытия изолятора, либо проведения строительных работ.

Трехфазные короткие замыкания происходят редко (5% случаев), но являются указанием к проведению испытаний, так как эти токи короткого замыкания и напряжение TVR намного выше, чем при однофазных или двухфазных замыканиях.

Расчет тока повреждения производится на основании характеристик сети и схем заземления (с изолированной, глухозаземленной или резистивно-заземленной нейтралью). Были разработаны методы расчета, которые указаны в стандартах (МЭК 60909).

В настоящее время достаточно распространен метод расчета с помощью моделирования на компьютере, и службы Schneider разработали и располагают программным обеспечением, позволяющим получить очень точные результаты.

■ **Определение места повреждения**

□ **Повреждение на выводах ниже выключателя**

В этом случае ток короткого замыкания является максимальным, так как он ограничен только полными сопротивлениями, расположенными выше устройства. Несмотря на то, что этот тип повреждения встречается очень редко, он указан в стандартах на выключатели для сетей среднего напряжения (СН).

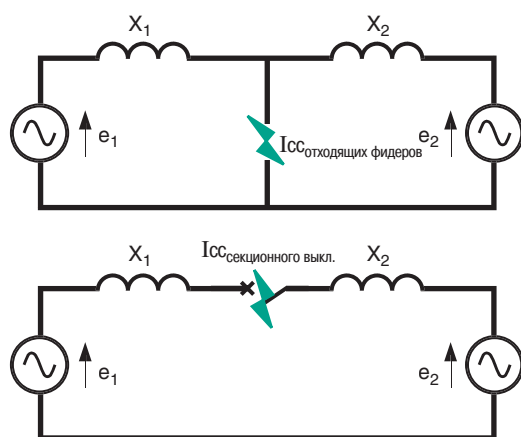
□ **Повреждение в линии**

Данный тип повреждения в воздушных сетях встречается чаще, чем предыдущий. В сетях среднего напряжения (СН) характеристики электрической дуги выключателей и соединений выключатель/кабель/линия создают условия, при которых нагрузка меньше, чем при коротком замыкании на выводах. Специальных испытаний для выключателей СН не предусмотрено.

Для сетей высокого напряжения (ВН) этот тип короткого замыкания требует выполнения специальных испытаний на близкие повреждения, так как явление отражения волн приводит к значительному увеличению нагрузочного напряжения TVR.

□ **Включение в противофазе (см. рис. 15)**

Речь идет об особом виде короткого замыкания, которое происходит при соединении двух несинхронизированных генераторов.



где:  $e_1 = e_2 = e$  и  $X_1 = X_2 = X$

$$I_{cc \text{ отходящих фидеров}} = \frac{e}{X} + \frac{e}{X} = \frac{2e}{X}$$

$$I_{cc \text{ секционного выключателя}} = \frac{2e}{2X} = \frac{e}{X}$$

**Рис. 15** : Отключение в случае рассогласования по фазе при включении двух несинхронизированных генераторов

В случае потери синхронизма двумя генераторами напряжение на выводах секционного выключателя равно сумме напряжений каждого генератора. При этом ток отключения выключателя может достигать половины значения тока, соответствующего короткому замыканию в точке соединения. Этот максимум возникает при включении в противофазе.

В соответствии со стандартом МЭК 60056 (§ 4.106) необходимо, чтобы в этом случае устройством обеспечивалось отключение 25% тока повреждения на его выводах при напряжении, равном 2,5-кратному значению напряжения относительно земли, что охватывает диапазон величин, встречающихся на практике.

■ **Форма тока короткого замыкания**

При коротком замыкании сила тока в течение переходного периода складывается из суммы двух составляющих, симметричной или периодической ( $i_a$ ) и несимметричной или аperiodической ( $i_c$ ) (см. рис. 16). Симметричная составляющая ( $i_a$ ) образуется за счет альтернативного источника переменного тока, который создает ток короткого замыкания.

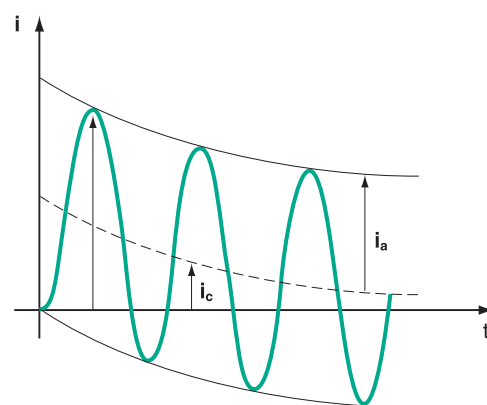
Аperiodическая составляющая ( $i_c$ ) образуется за счет электромагнитной энергии, накопленной в катушке индуктивности в момент короткого замыкания. Значение этой составляющей в момент возникновения замыкания равно и противоположно значению симметричной составляющей, это необходимое условие для обеспечения непрерывности подачи тока. Данная составляющая уменьшается вместе с постоянной времени ( $L/R$ ), являющейся характеристикой сети, величина которой в соответствии со стандартом составляет 45 мс. Составляющие можно выразить следующим формулами:

$$i_a = I \sin(\omega t + \theta)$$

$$i_c = I \sin \theta e^{-t/(L/R)}$$

$I$  = максимальный ток =  $E/Z_{cc}$

$\theta$  = электрический угол, характеризующий сдвиг между начальным моментом повреждения и началом волны тока.



**Рис. 16** : В случае короткого замыкания ток складывается из суммы двух составляющих, симметричной или периодической ( $i_a$ ) и несимметричной или аperiodической ( $i_c$ )



Рассмотрим два различных случая:

- Короткое замыкание возникает непосредственно в момент прохождения напряжения  $e$  через нуль. Симметричная составляющая и постоянная составляющая имеют максимальное значение. Такой режим называется асимметричным.
- Начальный момент короткого замыкания совпадает с прохождением через нуль переменной составляющей: постоянная составляющая отсутствует, и режим называется симметричным.

### Отключающая способность

Отключающая способность (PdC) – это максимальный ток, который может отключить устройство при номинальном напряжении в цепи, напряжение TVR которой соответствует требованиям стандарта. Устройство должно обеспечивать отключение любого тока короткого замыкания с периодической составляющей меньше его PdC и с какой-либо апериодической составляющей, процентная характеристика которой не превышает указанного в стандарте значения. Однако, в зависимости от типа используемого устройства могут возникать трудности при отключении тока повреждения, имеющего значение меньше PdC, поскольку в некоторых случаях такой ток вызывает очень продолжительную электрическую дугу, следовательно, повышается и риск неотключения.

#### ■ Отключение при трехфазной схеме

В связи с фазовым сдвигом тока в трехфазной схеме отключение производится следующим образом:

- Выключатель отключает ток первой фазы (фаза 1, **рис. 17**), в которой ток проходит через нуль. В результате этого устанавливается двухфазный режим, и процесс идет, как если бы точка N сместилась на N'.
- Напряжение, которое устанавливается в первой фазе, на выводах разомкнутого контакта AA', является напряжением между A и N' и может быть представлено, таким образом, следующей формулой:

$$U_{\text{сети}} \geq U_{AA'} = V \cdot k \geq U_{\text{сети}} \sqrt{3} / 2,$$

где  $k$  – коэффициент первого полюса. Значение этого коэффициента изменяется от 1 до 1,5 в зависимости от того, является ли нейтраль глухозаземленной или полностью изолированной.

- Спустя полупериод тока в двух других фазах, в свою очередь, проходят через нуль, выключатель производит отключение, и сеть вновь становится симметричной относительно нейтрали.

Таким образом, напряжение TVR зависит от режима нейтрали. Стандартом предусмотрены значения, устанавливаемые при выполнении испытаний: 1,5 для сетей среднего напряжения (СН) и сетей с изолированной нейтралью и 1,3 – в других случаях.

#### ■ Включение выключателя на короткое замыкание

Поскольку повреждения часто бывают неустойчивыми, обычно при нормальной эксплуатации производится повторное включение выключателя после отключения тока повреждения. Однако, некоторые повреждения носят устойчивый характер, и, следовательно, выключатель должен обеспечивать возможность включения на короткое замыкание.

Включение, которое сопровождается предпробойным состоянием, вызывает волну напряжения с крутым фронтом, когда пиковое значение тока, теоретически, может достигать  $2,5 I_{\text{сс}}$  при условии полной несимметрии, с постоянной времени 45 мс при 50 Гц и без сдвига полюсов. Таким образом, для выключателей требуется обеспечение включающей способности.

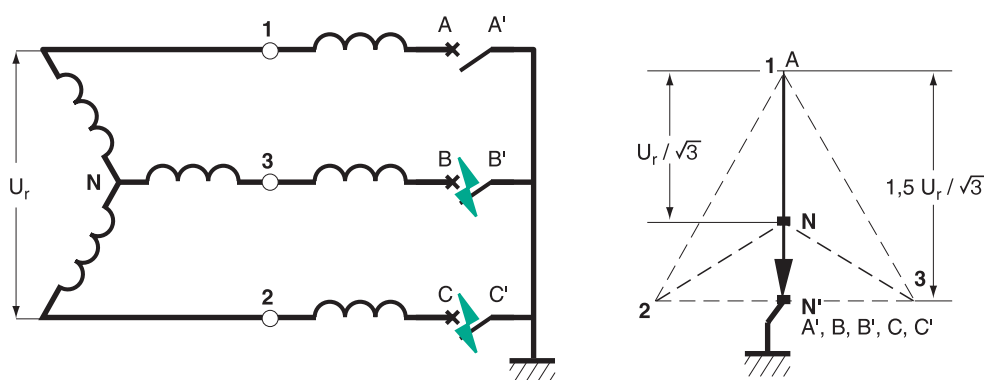
#### ■ Стандартная отключающая способность

Соответствие выключателей стандартам подтверждается, в частности, их способностью отключать любой такой ток, в том числе и так называемый критический ток.

Стандартом МЭК 60056 (§ 4.104) предусмотрено проведение серии испытаний, позволяющих оценить PdC устройства и проверить его способность выполнять многократные операции включения и отключения. Номинальная отключающая способность характеризуется двумя величинами.

- Действующим значением ее периодической составляющей, обычно называемым отключающей способностью.

Нормализованные значения номинальной отключающей способности взяты из рядов Ренара (6,3, 8, 10, 12,5, 16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100 кА) с учетом того, что на практике ток короткого замыкания имеет значения от 12,5 кА до 50 кА для сетей среднего напряжения (СН).



**Рис. 17** : Напряжение  $U_{AA'}$ , выдерживаемое первым полюсом, который производит отключение, трехфазного устройства

□ Процентной характеристикой аperiodической составляющей  
 Процентная характеристика соответствует значению, полученному по истечении времени  $\tau$ , равному минимальной продолжительности отключения выключателя, к которой добавляется полупериод номинальной частоты для устройств с источником оперативного питания. Постоянная времени стандартного затухания по экспоненте составляет 45 мс. В настоящее время проводятся исследования в отношении других больших значений для некоторых отдельных случаев. Испытания на отключение при коротком замыкании выполняются при значениях напряжения TVR, указанных в стандарте, для значений тока 10, 30, 60 и 100% PdC в соответствии с таблицей, представленной на **рисунке 18**, где:

O - операция отключения;

BO – операция включения, за которой сразу же следует операция отключения.

Если стандартом не предусмотрены особые случаи, определена следующая последовательность нормативных операций.

□ Для устройств без быстрого автоматического повторного включения

O – 3 мин – BO – 3 мин – BO

или

BO – 15 с – BO.

□ Для устройств, рассчитанных на быстрое автоматическое повторное включение

O – 0,3 с – BO – 3 мин – BO.

Режим испытаний	% I <sub>a</sub> (симметричная составляющая)	% I <sub>c</sub> (несимметричная составляющая)
1	10	< 20
2	30	< 20
3	60	< 20
4	100	< 20
5*	100	в соответствии со стандартной кривой затухания

\* : Для выключателей с промежутком времени  $\tau < 80$  мс.

**Рис. 18** : Указанные в стандарте значения напряжения TVR для проведения испытаний выключателей на отключающую способность при коротком замыкании

## 3. Технологии отключения

Для отключения зарядного тока или тока повреждения производителями разработаны и совершенствуются устройства отключения, выключатели и контакторы, в которых, в частности, используется разная среда отключения: воздух, масло, вакуум и элегаз (SF<sub>6</sub>). В то

время как отключение в воздухе или в масле используется все реже, технология отключения в вакууме или в элегазе находит все большее применение и является преобладающей для сетей среднего напряжения.

### 3.1. Среда отключения

В предыдущем разделе указывалось, что успешное отключение обеспечивается при следующих условиях:

- мощность, рассеиваемая в электрической дуге под воздействием эффекта Джоуля-Ленца, остается меньше мощности охлаждения устройства;
- высокая скорость деионизации среды;
- промежуток между контактами имеет достаточную электрическую прочность.

Таким образом, при разработке оборудования важно учитывать выбор среды отключения. Эта среда должна обладать следующими свойствами:

- иметь большую удельную теплопроводность, в частности, в фазе гашения дуги, чтобы обеспечить отвод тепловой энергии от дуги;
- как можно быстрее восстанавливать свои электроизоляционные свойства во избежание несвоевременного повторного пробоя (на рис. 19 показаны исключительные свойства элегаза в этой связи);
- при высоких температурах обеспечивать хорошую электропроводность, чтобы уменьшить удельное сопротивление дуги, а, следовательно, рассеиваемую энергию;
- при низких температурах обеспечивать хорошую электрическую изоляцию, чтобы облегчить процесс восстановления напряжения.

Это качество диэлектрика измеряется электрической прочностью пространства между контактами, которая зависит от давления газа и расстояния между электродами. Зависимость напряжения пробоя от расстояния между электродами и давления представлена кривой Пашена (см. рис. 20 и 21), которая позволяет определить три зоны в зависимости от давления газа.

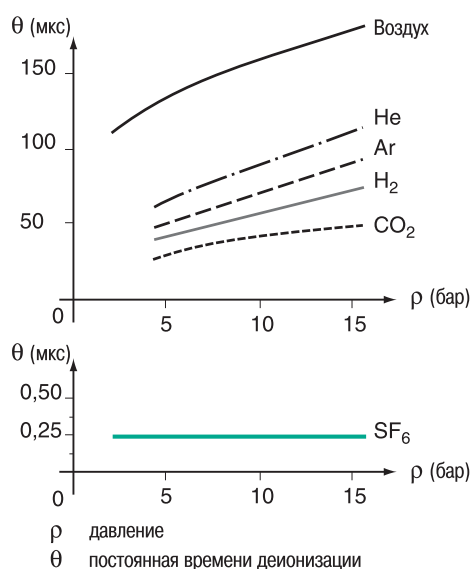


Рис. 19 : Зависимость постоянной времени деионизации от давления для различных газов

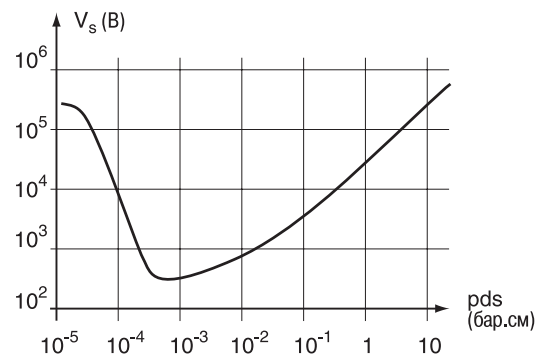


Рис. 20 : Изменение электрической прочности воздуха в зависимости от давления в слабо неоднородном поле (кривая Пашена)

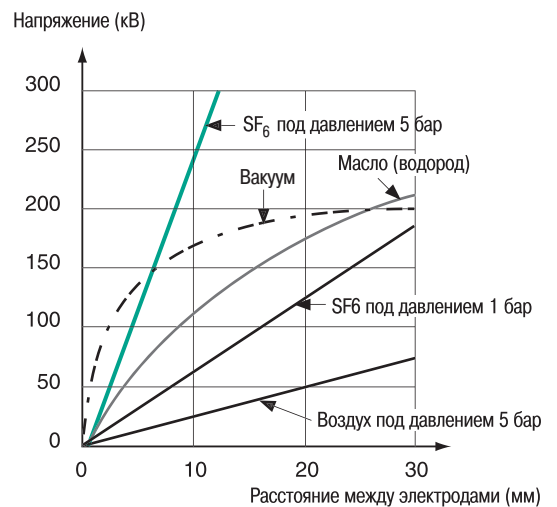


Рис. 21 : Влияние расстояния между контактами на электрическую прочность

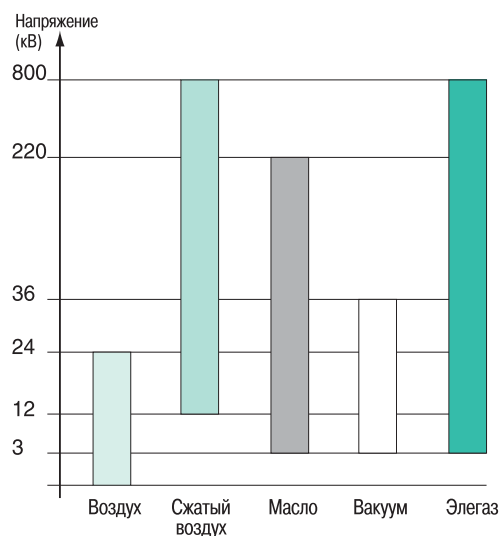
1. Зона высокого давления, называемая «атмосферным режимом», где электрическая прочность пропорциональна давлению газа и расстоянию между контактами.

2. Зона низкого давления, где электрическая прочность достигает истинного минимума в интервале от 200 до 600 В в зависимости от используемого газа (минимум Пашена). Данное значение определяется произведением давления на расстояние между контактами и составляет примерно  $10^2$  мбар.см.

3. Зона вакуума, в которой напряжение пробоя зависит только от расстояния между контактами и состояния их поверхности.

Состояние проводимости обеспечивается электронами и атомами, выделяемыми контактами в вакууме, а в газовой среде – за счет быстрой ионизации молекул этого газа.

Эти кривые демонстрируют возможные характеристики, которые проявляются в зависимости от вариантов среды отключения, которые были последовательно использованы: воздух при атмосферном давлении или под высоким давлением, водород, полученный при разложении масла, вакуум или элегаз. На рисунке 22 показаны диапазоны значений напряжения, для которых в настоящее время применяется каждая из этих технологий.



**Рис. 22** : Среда отключения, применяемая в зависимости от эксплуатационного напряжения

## 3.2. Отключение в воздухе

Первыми начали применяться устройства, использующие метод отключения в воздухе при атмосферном давлении (электромагнитные выключатели).

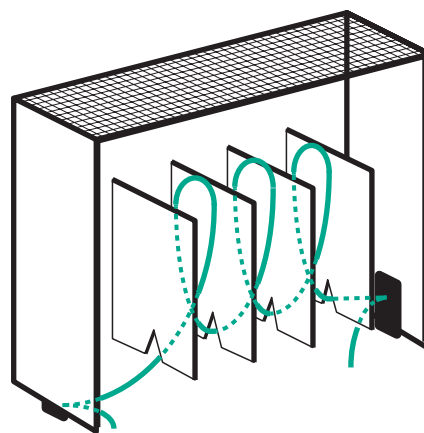
Воздух при атмосферном давлении, несмотря на относительно низкую электрическую прочность и большую постоянную времени деионизации (10 мкс), может использоваться как среда отключения при значениях напряжения порядка до 20 кВ. При этом во избежание теплового пробоя необходимо обеспечить достаточную мощность охлаждения и большое напряжение дуги после прохождения тока через нуль.

### Механизм отключения в воздухе

Принцип заключается в сохранении дуги в течение довольно короткого промежутка времени, пока ток имеет большую силу, чтобы ограничить рассеиваемую энергию, а затем в удлинении дуги только перед прохождением тока через нуль.

Этот принцип привел к созданию для каждого полюса устройства дугогасительной камеры. Речь идет об объеме вблизи промежутка между контактами, разделенном огнеупорными перегородками (пластины, обладающие высокой способностью накапливать тепловую энергию) (см. **рис. 23**), между которыми дуга растягивается.

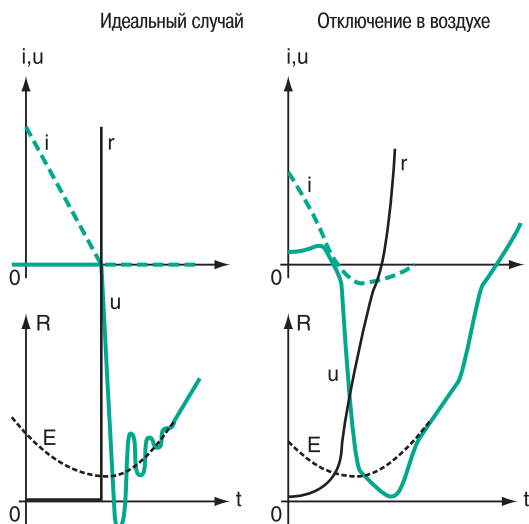
На практике, при уменьшении силы тока электрическая дуга под действием электромагнитных сил затягивается между перегородками. Дуга растягивается и охлаждается при контакте с огнеупорным материалом, пока



**Рис. 23** : Растяжение электрической дуги между огнеупорными керамическими перегородками дугогасительной камеры выключателя для отключения в воздухе (выключатель типа Solenarc, продукция Merlin Gerin)

напряжение дуги не станет больше напряжения сети, и, вследствие чего, сопротивление дуги резко возрастает. При этом мощность, подаваемая на дугу от сети, по-прежнему остается меньше мощности охлаждения – происходит успешное отключение.

Из-за продолжительной постоянной времени деионизации при использовании этого метода рассеиваемая энергия дуги остается большой. При этом, риск возникновения перенапряжения при отключении почти нулевой (см. **рис. 24**).



**Рис. 24** : Сравнительные характеристики идеального устройства и устройства отключения в воздухе

#### Основные характеристики устройства отключения в воздухе

Размер дугогасительной камеры определяется, главным образом, в зависимости от мощности короткого замыкания сети (в МВА).

В устройствах типа Solenarc очень большая длина дуги (несколько метров при 24 кВ) достигается в приемлемом объеме благодаря созданию дуги в форме соленоида. С учетом требуемой скорости размыкания контактов, составляющей несколько метров в секунду, энергия управления равна нескольким сотням джоулей.

#### Области применения устройств отключения в воздухе

Этот тип устройств нашел широкое применение во многих областях, однако по-прежнему существует ограничение на его использование на напряжение свыше 24 кВ. Для более высоких напряжений отключение производится в среде сжатого воздуха, чтобы увеличить электрическую прочность и скорость охлаждения и деионизации. При этом гашение дуги производится дутьем под высоким давлением (20 – 40 бар). Эта технология была использована для быстродействующих выключателей или при повышенном напряжении (до 800 кВ).

В сетях низкого напряжения (НН) технология отключения в воздухе при атмосферном давлении нашла универсальное применение в силу простоты, стойкости, отсутствия перенапряжений и ограничивающего действия. В сетях среднего напряжения (СН) предпочтительно использовать другие методы, так как отключение в воздухе имеет ряд недостатков:

- габариты оборудования (выбор устройств большего размера для обеспечения растяжения дуги);
- влияние металлических перегородок ячейки и влажности воздуха на отключающую способность устройств;
- затраты на оборудование и создаваемый оборудованием шум.

В настоящее время выключатели, используемые для отключения в воздухе в сетях среднего напряжения, практически, не производятся.

### 3.3. Отключение в масле

Масло, которое раньше уже применялось в качестве изоляционного материала, с начала прошлого века стало использоваться как среда отключения, так как эта технология позволяла создавать относительно простое и экономичное оборудование.

Масляные выключатели использовались, главным образом, для напряжений от 5 до 15 кВ.

#### Принцип действия

Контакты погружены в диэлектрическое масло. В момент размыкания контактов под воздействием электрической дуги происходит разложение масла с выделением водорода (70%), этилена (20%), метана (10%) и свободного углерода. Энергия дуги в 100 кДж производит примерно 10 л этих газов. Эти газы образуют пузырь, который под действием инерции массы масла находится

в течение времени отключения под динамическим давлением, которое может достигать 50 – 100 бар. При прохождении тока через нуль давление газа снижается, и происходит гашение дуги дутьем.

Водород, выделившийся в результате разложения масла, служит дугогасительной средой. Водород является хорошим дугогасительным веществом благодаря его тепловым свойствам и его постоянной деионизации, которая лучше этой характеристики в воздушной среде, в частности, в условиях повышенного давления.

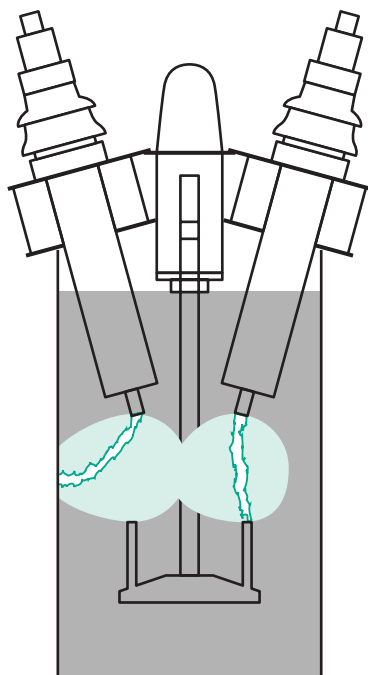
#### Различные методы отключения в масле

- Выключатели с большим объемом масла
- В первых устройствах с использованием масла электрическая дуга свободно возникала между контактами, образуя пузырьки газа без их удержания. Во

избежание возникновения дуги между фазами или между выводами и корпусом, эти пузырьки не должны ни в коем случае касаться бака или соединяться (см. **рис. 25**). Следовательно, устройства, сконструированные с учетом этих условий, имеют очень большие размеры. Помимо значительных габаритов, эти устройства имеют другие многочисленные недостатки, например, невозможность обеспечения достаточной безопасности из-за того, что выделяемый водород скапливается под крышкой, повышенные требования к проведению технического обслуживания для контроля чистоты масла и сохранения электроизоляционных свойств. Для устранения этих недостатков (недостаточная безопасность, громоздкие размеры оборудования) производители разработали малообъемные масляные выключатели.

#### ■ Малообъемные масляные выключатели

Электрическая дуга и пузырь газы удерживаются в масляном баке. Давление газа повышается, когда дуга последовательно проходит через камеры, а затем, при прохождении тока через нуль, давление снижается через сопло в зоне дуги.



**Рис. 25** : Пузырьки газа, образующиеся в начале замыкания фазы на корпус при отключении в выключателе с большим объемом масла

В результате происходит резкое гашение дутьем, что обеспечивает восстановление электроизоляционных свойств между контактами.

□ Влияние значения тока на отключающую способность (PdC)

При больших значениях тока наблюдается значительное выделение водорода и повышение давления. Как следствие, время горения дуги сравнительно мало. Напротив, при малых значениях тока давление повышается незначительно, и время дуги длительное. Время горения дуги увеличивается, достигая критических значений, и тогда уже становится трудно завершить отключение. Чтобы устранить этот недостаток, в конце хода можно использовать дополнительные устройства для дутья.

□ Основные характеристики малообъемных масляных выключателей

Значение тока короткого замыкания или номинального тока определяет выбор минимального диаметра подвижного контакта. Длина дугогасительной камеры и ход подвижной части почти пропорциональны приложенному напряжению.

Чтобы избежать избыточного давления, минимальное время горения дуги при отключении тока большой силы должно быть меньше 10 мс и не должно превышать 40 мс для критического тока.

Кроме того, изолирующая оболочка дугогасительной камеры должна быть рассчитана на очень высокое давление, создаваемое в результате неустраненных коротких замыканий, так как на то, чтобы снизить давление, требуется примерно одна секунда.

Однако, несмотря на использование небольшого количества масла, в этой технологии все же имеются некоторые недостатки:

- разложение масла является необратимым процессом;
- разложение масла и износ контактов пагубно влияют на электрическую прочность, что, в свою очередь, вызывает необходимость дополнительных затрат на техническое обслуживание;
- в случае быстрого повторного включения полюс остается под повышенным давлением, и его отключающая способность ухудшается;
- полностью не исключен риск взрыва и воспламенения.

#### Области применения метода отключения в масле

Эта технология очень широко использовалась во многих областях, в том числе на транспорте и в энергетике. Постепенно данный метод вытесняется технологиями отключения в вакууме и в элегазе, которые не имеют недостатков, описанных в предыдущих параграфах.



### 3.4. Отключение в вакууме

Электроизоляционные свойства вакуума известны давно и используются, например, в колбах рентгеновских трубок. Вакуум в отключающих устройствах использовался с 1920 года, но по причине ограниченных технологических возможностей эффективное использование вакуума в промышленном масштабе началось только с 1960 года. В 70-е годы вакуумные технологии получают все большее распространение в силу преимуществ, которые они обеспечивают: малые габариты оборудования, большая безопасность и более высокая износостойкость.

#### Электроизоляционные свойства вакуума

Теоретически, вакуум является идеальной диэлектрической средой: в нем нет материала, соответственно, нет и электрической проводимости. Однако вакуум никогда не бывает идеальным и в любом случае имеет предел электрической прочности. Несмотря на то что истинный «вакуум» обладает уникальными свойствами: под давлением  $10^{-6}$  бар электрическая прочность в однородном поле может достигать пикового напряжения 200 кВ при расстоянии между электродами 12 мм.

Механизм возникновения электрического пробоя в вакууме связан с явлениями автоэлектронной эмиссии, не сопровождающимися лавинной ионизацией. Поэтому электрическая прочность в вакууме практически не зависит от давления, если давление не превышает  $10^{-6}$  бар. Таким образом, электрическая прочность обуславливается составом используемых материалов, формой электродов (в частности, наличием шероховатостей на их поверхности) и расстоянием между электродами.

Характер кривой, отражающей зависимость напряжения пробоя от интервала между контактами (см. рис. 21), показывает, почему область применения вакуума остается ограниченной по напряжению. В действительности, расстояние, необходимое для обеспечения электрической прочности, очень быстро увеличивается, как только напряжение становится больше 30 – 50 кВ, в результате данный метод становится недоступным с точки зрения затрат по сравнению с другими технологиями. Кроме того, при повышении напряжения возникает рентгеновское излучение.

#### Механизм отключения в вакууме

Отключение в вакууме является довольно специфичным процессом в силу совершенно особых характеристик электрической дуги в вакууме.

##### ■ Электрическая дуга в вакууме

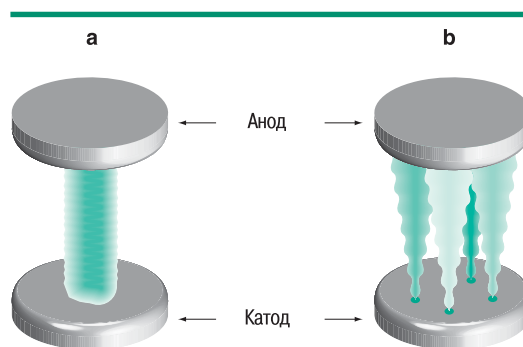
Столб электрической дуги состоит из паров металла и электронов, выпускаемых электродами, в других методах

отключения, описанных выше, этот столб, в основном, состоит из ионизированного газа находящегося в пространстве между контактами.

Электрическая дуга может двух видов, сфокусированная и диффузная, в зависимости от силы тока в дуге.

□ При больших значениях тока ( $\geq 10\ 000$  А) дуга является единственной и сфокусированной, как в обычных жидкостных средах (см. рис. 26а). Катодные и анодные пятна размером в несколько мм<sup>2</sup> нагреваются до очень большой температуры. Тонкий слой контактного материала испаряется, и в атмосфере паров металла возникает электрическая дуга, которая занимает все пространство. При уменьшении тока эти пары конденсируются непосредственно на электродах или на установленных для этого металлических экранах. В этом режиме напряжение дуги может достигать 200 В.

□ При значениях тока меньше нескольких тысяч ампер эта дуга имеет диффузную форму. Она состоит из нескольких отдельных дуг, отделенных друг от друга, конической формы, с вершиной на катоде (см. рис. 26б). Катодные основания этих дуг, называемые пятнами, имеют очень маленькую поверхность ( $10^{-5}$  см<sup>2</sup>), и плотность тока в этих пятнах очень высокая ( $10^5 - 10^7$  А/см<sup>2</sup>). Из-за очень высокой локальной температуры (3000 К) возникает интенсивная комбинированная термоэлектронная/автоэлектронная эмиссия, в результате чего начинается процесс испарения контактного материала. При этом ток создается, в основном, потоком электронов. Положительные ионы металла, выделяемые катодом, обладают такой кинетической энергией (30 – 50 эВ), что способны занять все пространство до анода. Таким образом, они нейтрализуют пространственные заряды между контактами, чем объясняется малый градиент потенциала и низкое напряжение дуги (до 80 В).



**Рис. 26** : Дуга в режиме фокусировки [а] и дуга в режиме диффузии [б]

#### ■ Прохождение тока через нуль

В режиме диффузии дуги, либо сразу же, либо после возникновения единственной и сфокусированной дуги, но через достаточный промежуток времени, чтобы пары металла сконденсировались, происходит успешное отключение при прохождении тока через нуль. В действительности, при подходе к нулю количество пятен уменьшается, и остается последнее, которое исчезает, когда энергии, создаваемой дугой, становится недостаточно, чтобы поддерживать довольно высокую температуру основания дуги. Резкое гашение последнего пятна вызывает явление обрыва тока, часто встречаемое при использовании этой технологии.

Следует отметить, что при инверсии напряжения анод становится катодом, но холодным, а значит не в состоянии излучать электроны, что соответствует крайне малой постоянной времени деионизации. Следовательно, вакуумные устройства способны отключать ток при очень быстром повышении напряжения TVR, а также ток высокой частоты.

При больших значениях тока в момент прохождения через нуль в пространстве между контактами может еще оставаться плазма дуги, и в этом случае отключение может быть ненадежным. Таким образом, на отключающую способность (PdC), в основном, влияет плотность остаточных паров металла.

#### ■ Явления повторного зажигания и повторного пробоя

Эти явления возникают, когда контакты выделяют слишком много паров металла.

Считается, что если плотность паров после прохождения тока через нуль превышает  $10^{22} / \text{м}^3$ , вероятность отключения, практически, равна нулю.

В целом, эти явления сложно воспроизвести и смоделировать.

Требуется выполнить многократные испытания, чтобы проверить конструктивные решения. В частности, можно наблюдать позднее повреждение изоляции после отключения, возможно, неустойчивое, связанное с наличием частиц или конденсата металла.

#### Различные технологии отключения в вакууме

Все разработчики и изготовители сталкивались с необходимостью выполнять одни и те же требования:

- уменьшить влияние обрыва тока, чтобы ограничить перенапряжения;
  - стремиться предотвратить раннюю эрозию контактов, чтобы обеспечить высокую износоустойчивость;
  - замедлить возникновение режима сфокусированной дуги, чтобы повысить отключающую способность (PdC);
  - ограничить образование паров металла, чтобы предотвратить повторные пробои;
  - поддерживать вакуум для обеспечения рабочих характеристик отключающего устройства в течение его срока службы.
- Разработки оборудования велись, в основном, по двум направлениям: состав контактного материала и контроль дуги с помощью магнитного поля.

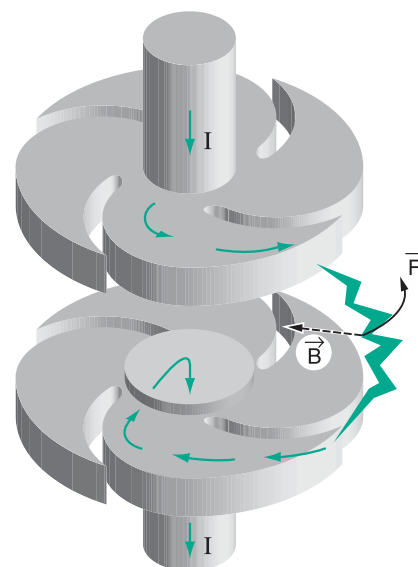
#### ■ Выбор магнитного поля

Используются два типа магнитного поля: радиальное и аксиальное.

#### □ Технология использования радиального магнитного поля (см. рис. 27)

Поле создает ток, циркулирующий в используемых для этого электродах. В случае возникновения сфокусированной дуги ее основания совершают круговое движение, тепло распределяется равномерно, в результате чего ограничивается эрозия и плотность паров металла. В диффузном режиме дуги пятна свободно перемещаются по поверхности катода, как если бы это был диск из твердого материала.

Достаточно сложная форма электродов, необходимая для этой технологии, затрудняет обеспечение электрической прочности между электродами.



**Рис. 27 :** Контакты, создающие радиальное магнитное поле. Электрическая дуга, под действием электромагнитных сил, смещается от центра к краям «лепестков», а затем поворачивает к периферии электродов

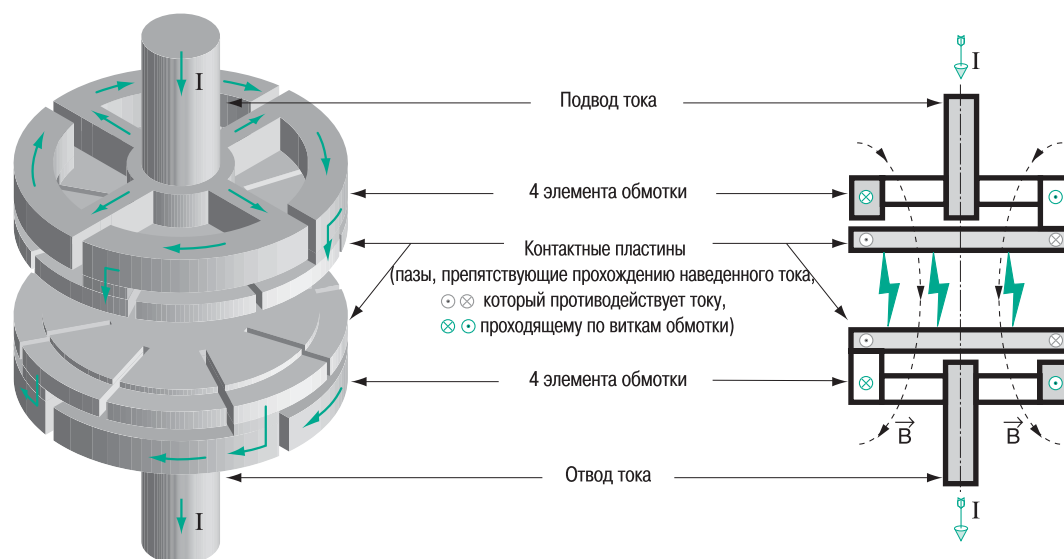
#### □ Технология использования аксиального магнитного поля (см. рис. 28)

При приложении аксиального магнитного поля электронам и ионам задается спиральная траектория движения вдоль линий магнитного поля, которая стабилизирует дугу в диффузном режиме и препятствует возникновению режима сфокусированной дуги. Это предотвращает, таким образом, появление анодного пятна, и эрозия, по-прежнему, остается ограниченной, что позволяет обеспечить высокую отключающую способность. Это магнитное поле создается с помощью внутренних или внешних витков колбы, по которым постоянно проходит ток.

Внутренние витки должны быть защищены от действия дуги. Для внешних витков этот риск исключен, но в этом случае из-за их большего размера увеличиваются тепловые потери, и возникает необходимость ввода ограничений в связи с опасностью перегрева.

На рисунке 29 представлена сравнительная таблица этих двух технологий.





**Рис. 28** : Контакты, создающие аксиальное магнитное поле

	Радиальное поле	Аксиальное поле
Переходное сопротивление контактов / нагрев	+	-
Напряжение дуги	-	+
Эрозия контактов	-	+
Отключающая способность (PdC) / диаметр контактов	=	=

**Рис. 29** : Сравнительная таблица преимуществ (+) и недостатков (-) каждой технологии

#### ■ Выбор материалов

Для сохранения качества вакуума необходимо, чтобы материалы, используемые для контактов и поверхностей, контактирующих с вакуумом, были очень чистыми и не содержали газа.

Материал контактов имеет большое значение, так как давление насыщающего пара в колбе не должно быть слишком большим или слишком низким:

□ Высокое давление паров металла позволяет стабилизировать дугу и ограничить явление обрыва тока (перенапряжения).

□ Напротив, низкое давление паров металла больше подходит для отключения большого тока.

Кроме того, необходимо обеспечить меньшее удельное сопротивление, чтобы снизить тенденцию к свариванию и повысить механическую прочность.

Контакты из сплава меди и хрома (50-80 % Cu, 50-20 % Cr), главным образом, используются в выключателях благодаря их устойчивости к эрозии, малому удельному сопротивлению и низкому давлению паров.

Другие материалы, такие, как состав медь/висмут (98 % Cu, 2 % Bi) или более современные материалы, например Ag/W/C, используются в отключающих устройствах с большой коммутационной способностью (типа контакторов), так как они не вызывают обрыва тока и имеют низкую способность к свариванию.

В отношении других элементов, контактирующих с вакуумом, можно отметить, что на настоящий момент для них используются керамические материалы, связанные с процессом высокотемпературной пайки, которые более всего подходят для поддержания высокого вакуума (давление обычно меньше  $10^{-6}$  мбар).

#### ■ Конструкция корпуса выключателя

Основной проблемой является обеспечение герметичности вакуумной камеры: например, в конструкции следует избегать вставляющихся подвижных частей.

Такие контакты не используются в вакууме по причине их чувствительности к присутствию частиц и возможности холодного спая скользящих контактов. Следовательно, применяются простые торцевые контакты, и рабочая энергия таких устройств, таким образом, незначительная (30 – 50 Дж). Напротив, контактное давление должно быть большим, чтобы минимизировать переходное сопротивление контактов и предотвратить их размыкание при прохождении тока короткого замыкания. Для создания этого необходимого давления контактов требуется большое механическое усилие.

Принимая во внимание малое изоляционное расстояние в вакууме и простоту устройства, камеры выключателей могут быть очень компактными. В связи с этим их диаметр, а следовательно и объем зависят от PdC (диаметр камеры), но при этом внешняя электрическая прочность камеры становится основной характеристикой при расчете размеров устройства.

Эту технологию в настоящее время хорошо освоили крупные производители, выпускающие устройства, срок службы которых превышает 20 лет. Тем не менее, следует отметить, что невозможно обеспечить постоянный контроль вакуума при эксплуатации, так как для этого необходимо отключать оборудование и использовать соответствующую измерительную аппаратуру.

Таким образом, при использовании данной технологии профилактическое техническое обслуживание, проводимое для контроля надежной работы распределительных щитов среднего напряжения (СН), не проводится.

### **Области применения технологии отключения в вакууме**

Эта технология отключения позволяет сегодня изготавливать устройства, обладающие большой коммутационной износостойкостью при TVR с очень крутым фронтом.

Данная технология чаще всего используется в сетях среднего напряжения (СН): в настоящее время имеются выключатели общего применения, рассчитанные на различные варианты использования и обеспечивающие любую отключающую способность (до 63 кА). Они применяются для защиты и управления:

- кабелей и воздушных линий;
- трансформаторов;
- одиночных конденсаторных батарей;
- двигателей и шунтирующих индуктивностей.

В частности, они адаптированы для управления дуговыми электропечами (высокая коммутационная износостойкость), но должны использоваться с осторожностью для управления параллельно соединенными конденсаторными батареями.

Эта технология применяется в контакторах, где требуется обеспечить большую износостойкость, и реже в выключателях в силу экономических причин.

В сетях низкого напряжения данная технология используется редко из-за высоких затрат и отсутствия ограничивающей мощности. В целом, для низкого напряжения (НН) применение этого метода ограничено номинальным током в пределах от 800 до 2500 А при отключающей способности меньше 75 кА.

В будущем возможно применение данной технологии и для сетей высокого напряжения (ВН)  $U_e \geq 52$  кВ.

Примечание:

■ При отключении емкостного тока электрическая прочность в вакууме после отключения носит случайный характер, что приводит к риску возникновения значительного повторного пробоя. Таким образом, вакуумные выключатели плохо подходят для защиты емкостных сетей напряжением больше 12 кВ или оснащенных конденсаторными батареями.

■ При использовании вакуумных выключателей есть риск сваривания контактов, в частности, после включения при коротком замыкании. Это происходит в некоторых случаях, например, при определении места повреждения или выполнении цикла испытаний на соответствие стандарту. В действительности, в случае отключения без нагрузки отсутствие дуги не позволяет устранить шероховатости, оставшиеся от разрыва сварного соединения, т.е. спая, возникшего во время включения под нагрузкой. Это повреждение поверхности еще больше способствует предпробойному состоянию при последовательных включениях и усиливает спай, создавая риск окончательного сваривания.

Таким образом, использование этих выключателей требует принятия определенных мер предосторожности.

■ Для управления двигателями необходимо принимать особые меры предосторожности, так как вакуумные выключатели или контакторы обеспечивают отключение тока высокой частоты (явления повторного зажигания) и, таким образом, создают перенапряжение. Несмотря на наличие специальных устройств, рекомендуется также использовать приборы защиты от перенапряжений типа ZnO.

## **3.5. Отключение в элегазе (среда SF<sub>6</sub>)**

Шестрифтористая сера (SF<sub>6</sub>) – это газ, обладающий многочисленными ценными химическими и диэлектрическими свойствами. Технология отключения в этом газе, также как и метод отключения в вакууме, была разработана в 70-е годы.

### **Свойства элегаза**

#### **■ Химические свойства**

Это незагрязняющий газ, бесцветный, без запаха, не воспламеняющийся и нетоксичный в чистом виде. Не растворяется в воде.

Элегаз химически инертный характеризуется тем, что его молекула имеет все насыщенные химические связи и большую энергию диссоциации (+1096 кДж/моль), а также обладает высокой способностью отвода тепла,

создаваемого дугой (повышенная энтальпия). Во время возникновения электрической дуги элегаз, под действием температуры, которая может достигать 15 000 – 20 000 К, разлагается. Это разложение может носить почти обратимый характер: при уменьшении тока температура понижается, и при этом ионы и электроны рекомбинируются, чтобы составить молекулу элегаза. В результате разложения элегаза при наличии примесей, например, диоксида серы или четырехфтористого углерода, образуется небольшое количество побочных продуктов. Эти побочные продукты остаются в колбе и очень легко поглощаются активными элементами, например, алюмосиликатом, которые часто помещаются в корпус выключателя.

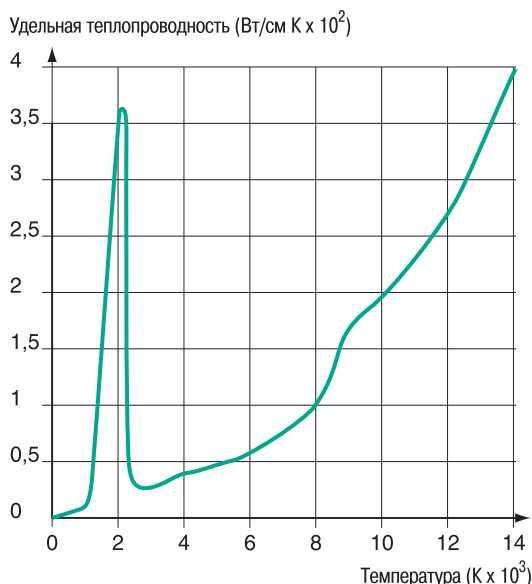
В отчете МЭК 61634 об использовании элегаза в выключателях указаны типовые значения содержания побочных продуктов, обнаруженных после нескольких лет эксплуатации оборудования. Выявленные количества по-прежнему остаются незначительными и не представляют опасности для людей и окружающей среды: воздух (несколько пропромилле об.),  $CF_4$  (40 – 600 пропромилле об.),  $SOF_2$  и  $SO_2F_2$  (в незначительном количестве).

#### ■ Физические свойства

##### □ Тепловые свойства

Удельная теплопроводность элегаза эквивалента удельной теплопроводности воздуха, но исследование этой характеристики элегаза при высоких температурах показало, что имеется пик температуры диссоциации элегаза (см. рис. 30).

##### □ Диэлектрические свойства



**Рис. 30** : Кривая удельной теплопроводности элегаза в зависимости от температуры

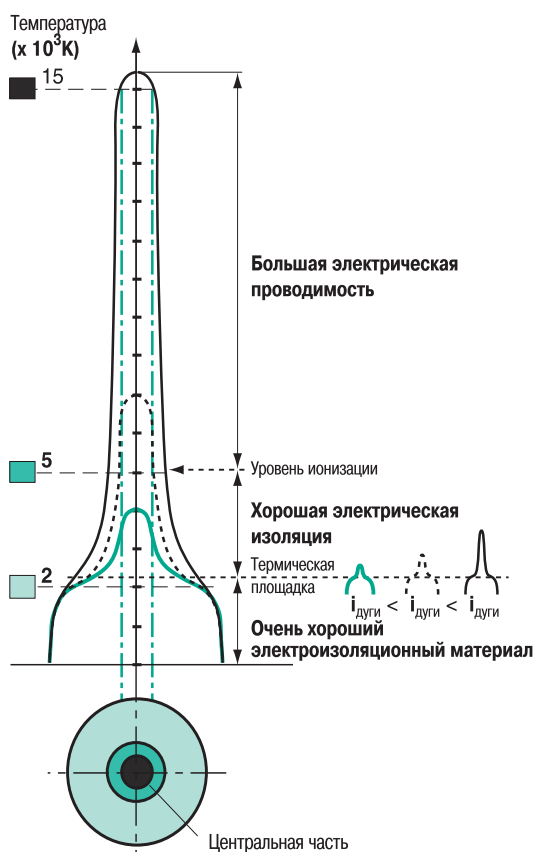
Элегаз обладает очень высокой электрической прочностью благодаря крайне электроотрицательным свойствам фтора (см. рис. 21):

- Время жизни свободных электронов фтора остается очень коротким, и они образуют с молекулами элегаза малоподвижные тяжелые ионы. Таким образом, вероятность возникновения лавинного электрического пробоя замедляется.
- В среде элегаза постоянная времени деионизации имеет чрезвычайно малое значение, порядка 0,25 мкс (см. рис. 19).

#### Механизм отключения в элегазе

##### ■ Электрическая дуга в элегазе

Изучение ее тепловых характеристик позволяет сделать вывод, что электрическая дуга образуется диссоциированной плазмой элегаза, имеет цилиндрическую форму, состоит из центрального узкого цилиндра с очень высокой температурой, обусловленной током отключения, который окружен оболочкой из более холодного газа. Центральная часть и оболочка разделены термической площадкой, зависящей от температуры диссоциации молекулы. При значениях, близких к 2000 °С, эта термическая площадка остается неизменной, в то время как сила тока изменяется (см. рис. 31). В течение этого периода горения дуги суммарная сила тока передается через центральную часть дуги, так как температура термической площадки меньше минимальной температуры ионизации, и внешняя оболочка остается изолирующей. Характеристические величины дуги зависят от того, какой тип отключения используется (автокомпрессия, вращающаяся дуга, саморасширение), и указаны в параграфах, касающихся каждого из этих типов отключения.



**Рис. 31** : Кривая распределения температуры дуги в цилиндрической трубке, наполненной элегазом

#### ■ Прохождение тока через нуль

С уменьшением тока температура центрального столба дуги понижается, в результате чего электрическая проводимость также начинает уменьшаться. При подходе тока к нулю возникает интенсивный теплообмен между оболочкой и центральной частью. Центр дуги исчезает, вызывая исчезновение проводимости при очень малой постоянной времени (0,25 мкс), но которая не является достаточной для отключения тока высокой частоты (нет повторного зажигания).

#### Различные технологии отключения в элегазе и области их применения

В элегазовых устройствах контакты находятся внутри закрытого корпуса, заполненного газом, давление в котором изменяется в зависимости от напряжения и расчетных параметров. Такой корпус, как правило, изготавливается наглухо запаянным на весь срок службы, поскольку коэффициент утечки очень низкий. Для данных устройств отключения можно устанавливать системы измерения давления или плотности с тем, чтобы обеспечить постоянный контроль давления газа в корпусе. Имеются несколько технологий использования элегазовых устройств, которые различаются по способу охлаждения дуги, а также имеют разные характеристики и области применения.

#### ■ Отключение методом автокомпрессии

Для этого типа выключателей гашение дуги происходит за счет расширения объема элегаза, сжатого нагнетанием.

При отключении устройства цилиндр, соединенный с подвижным контактом, перемещается и сжимает некоторый объем элегаза (см. **рис. 32а**). Через дугогасительное сопло газ поступает на ось дуги, которая, в свою очередь, выталкивается на полые контакты. При протекании тока большой силы дуга производит эффект заглушки, что способствует накоплению сжатого газа. При подходе тока к нулю дуга сначала охлаждается, а затем гасится благодаря инъекции новых молекул элегаза. Среднее значение напряжения дуги составляет от 300 до 500 В.

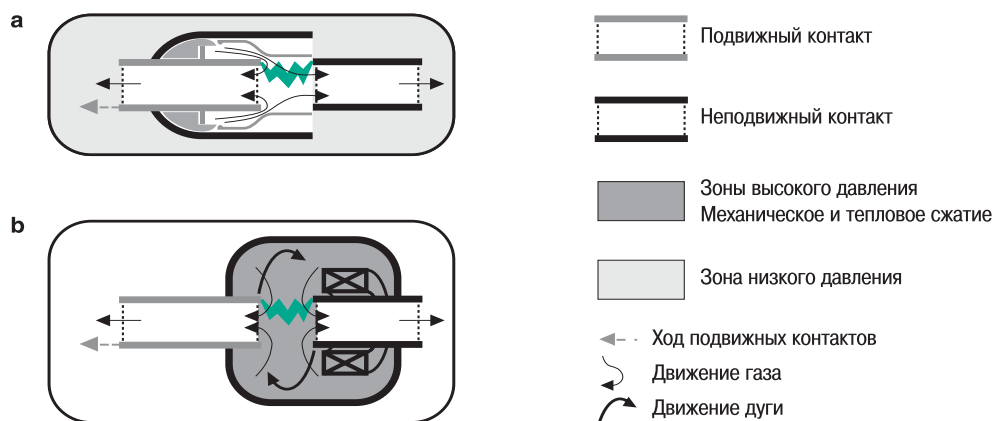
Эта технология позволяет без труда отключать любой ток вплоть до значений отключающей способности (PdC), не создавая критический ток, так как энергия, необходимая для гашения дуги, образуется за счет механического управления и, следовательно, не зависит от тока отключения.

#### □ Характеристические величины

Обычно элегаз используется при относительном давлении от 0,5 бар (16 кА, 24 кВ) до 5 бар (52 кВ), что позволяет изготавливать герметичный корпус устройств с полной гарантией безопасности.

Факторы, влияющие на размеры дугогасительной камеры, следующие:

- стойкость к входному/выходному испытательному напряжению, определяющая изоляционное расстояние между разомкнутыми контактами. Это расстояние может быть постоянным и составлять порядка 45 мм с учетом используемого давления элегаза;



**Рис. 32** : Принцип отключения методом автокомпрессии **[а]** и с помощью вращающейся дуги **[б]**

- ток короткого замыкания, который требуется отключить, определяет диаметр сопла и контактов;  
- отключаемая мощность короткого замыкания определяет размеры поршня гашения (под напряжением 24 кВ объем газа гашения составляет порядка одного литра при отключающей способности (PdC) 40 кА). Несмотря на компактность устройств энергия отключения сохраняется относительно высокой, от 200 Дж (16 кА) до 500 Дж (50 кА), из-за присутствия энергии, необходимой для сжатия газа.

□ Области применения отключения путем автокомпрессии

Принцип автокомпрессии является наиболее давним. Он использовался во всех типах выключателей общего применения. Автокомпрессия не вызывает слишком большие перенапряжения, так как обрыв тока маловероятен и нет риска последовательных повторных зажиганий.

Выключатели с автокомпрессией хорошо адаптированы для управления конденсаторными батареями, так как, с одной стороны, создают очень малую вероятность повторного пробоя, а, с другой стороны, имеют большую стойкость к току включения.

Однако, относительно высокая коммутационная энергия, которая требуется, создает довольно большие нагрузки на приводные механизмы и может привести к ограничению количества рабочих операций.

В настоящее время эта технология, по-прежнему, широко применяется, прежде всего, в устройствах, рассчитанных на большую силу тока, и находящихся под напряжением свыше 24 кВ.

■ Отключение с помощью вращающейся дуги

По этой технологии дуга гасится в результате собственного относительного движения в элегазе. Вращение дуги с очень большой скоростью (которая может превышать скорость звука при атмосферном давлении ( $P_{at}$ ) возникает под действием магнитного поля, создаваемого катушкой, в обмотке которой проходит ток повреждения.

При размыкании главных контактов ток коммутируется на катушку, и создается аксиальное магнитное поле. Равнодействующая сила Лапласа ускоряет круговое движение дуги. Контакты дуги имеют форму круговых дорожек, которые могут быть либо концентрическими (радиальная дуга и аксиальное поле), либо расположенными друг напротив друга, как показано на **рисунке 32b** (аксиальная дуга и радиальное поле).

В результате, происходит равномерное охлаждение дуги в элегазе.

Таким образом, мощность охлаждения устройства зависит непосредственно от силы тока короткого замыкания, что обеспечивает этим устройствам хорошую отключающую способность при малых затратах коммутационной энергии: энергия, необходимая для отключения, полностью создается дугой, и слабый ток отключается без обрыва и перенапряжения.

Благодаря быстрому движению оснований дуги области с высокой температурой, выделяющие пары металла, не образуются, и эрозия контактов является минимальной, в частности, в случае использования аксиальной геометрии.

Следует отметить, что при подходе тока к нулю магнитное поле уменьшается. Магнитное поле должно сохранять не нулевое значение, для того чтобы дуга оставалась в движении в холодном элегазе в момент возникновения напряжения TVR, и чтобы таким образом избежать присутствия критического тока. Это достигается за счет включения короткозамыкающих колец, которые создают небольшой фазовый сдвиг магнитного поля относительно тока.

□ Характеристические величины

В сетях среднего напряжения (СН) вращающаяся дуга в элегазе имеет напряжение 50 – 100 В при длине 15 – 25 мм. Из-за малой энергии отключения устройства очень компактны, даже при относительно низком давлении наполняющего газа (порядка 2,5 бар), и энергия управления отключением составляет меньше 100 Дж.

□ Области применения

Технология отключения с помощью вращающейся дуги хорошо подходит для управления машинами, чувствительными к перенапряжениям, например, для двигателей среднего напряжения (СН) и генераторов переменного тока. Большой срок службы устройств за счет слабого износа контактов и низкой энергии управления делает эту технологию очень привлекательной для применения при многократных коммутационных операциях (функция контактора).

Технология вращающейся дуги, используемая отдельно, обеспечивает ограниченную отключающую способность (25/30 кА при 17,5 кВ) и применяется только при напряжении менее 17,5 кВ.

■ Отключение путем саморасширения

В этой технологии используется тепловая энергия, рассеиваемая дугой, для повышения давления в небольшом объеме элегаза, который выходит через отверстие, где проходит дуга (см. **рис. 33a**).

Пока в дуге сохраняется большой ток, он действует как заглушка и препятствует выходу газа через отверстие. Холодный газ, блокированный в этом объеме, имеет некоторую температуру, которая повышается из-за рассеяния тепла дуги (в основном, в результате излучения), таким образом, давление газа тоже повышается. При прохождении тока через нуль образовавшаяся «заглушка» исчезает, элегаз расширяется и гасит дугу. Эффект гашения дугьем зависит от силы тока, когда обеспечивается малая энергия управления и хорошее отключение, но имеется риск возникновения критического тока. Такой ток обычно составляет 10% PdC.

□ Были разработаны два способа управления электрической дугой, управление механическое и магнитное управление, которые позволяют стабилизировать дугу в зоне гашения дугьем и, кроме того, подавлять возникновение критического тока.

- Механическое управление (типа автокомпрессии) (см. **рис. 33b**)

В этом способе поддерживается постоянное горение дуги, центрированная между двумя контактами с помощью изолирующих перегородок, которые удерживают поток газа аналогично тому, как действуют сопла, используемые при автокомпрессии.

Эта технология, освоенная всеми крупными производителями, является простой и надежной, но при ее использовании увеличивается энергия, необходимая для управления. В действительности, присутствие этих устройств в зоне дуги ухудшает электроизоляционные характеристики элегаза в течение периода восстановления, что приводит к увеличению

расстояния между электродами и скорости перемещения контактов и даже к повышению давления элегаза.

- Магнитное управление (типа вращающейся дуги) (см. **рис. 33c**)

Правильно рассчитанное магнитное поле позволяет центрировать дугу в зоне расширения элегаза, приводя ее во вращательное движение, подобно технологии вращающейся дуги. Преимущество этого метода магнитного управления, требующего очень точного расчета, состоит в том, что он позволяет исключить присутствие каких-либо других материалов, кроме элегаза, в зоне дуги. Термодинамический КПД является оптимальным, и элегаз сохраняет все свои электроизоляционные свойства. Таким образом, поскольку изоляционное расстояние можно сократить до минимума, обеспечивается малая необходимая энергия управления.

□ Характеристические величины

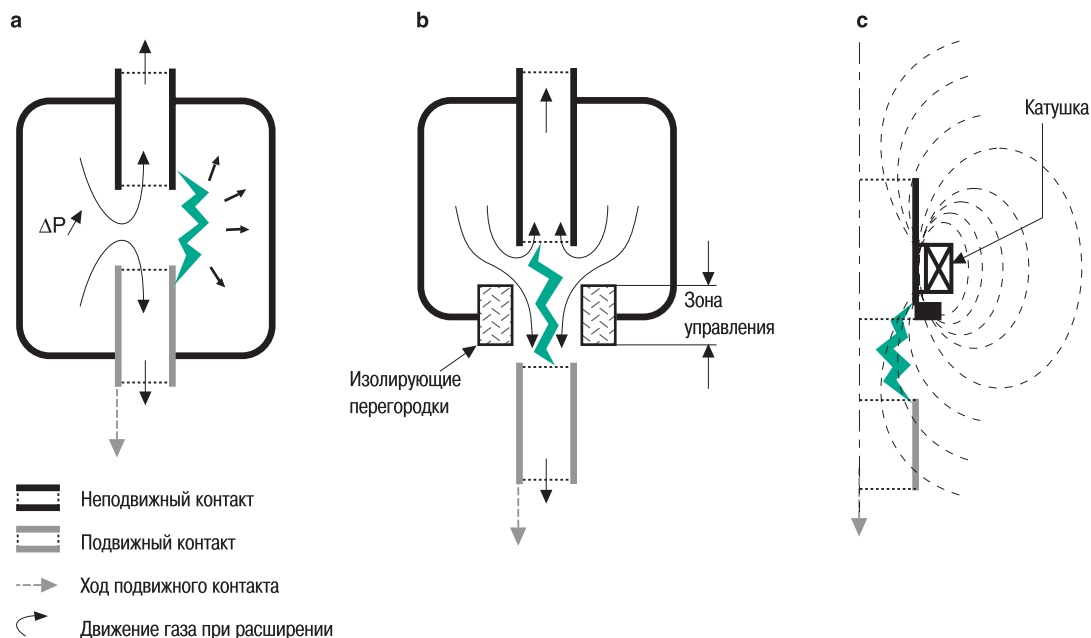
При токе малой силы гашение дугьем почти не существует, и напряжение дуги обычно не превышает 200 В. Давление в камере близко по значению к атмосферному давлению.

Объем теплового дутья составляет 0,5 – 2 л.

Энергия управления при 24 кВ меньше 100 Дж.

Все эти характеристики указывают на то, что на сегодняшний день наиболее эффективной является технология отключения путем саморасширения.

Отключающая способность устройств, в которых используется эта технология, при низком давлении и слабой энергии управления может быть очень высокой, обеспечивая тем самым высокую надежность.



**Рис. 33** : Саморасширение, принцип действия [a] и два способа управления дугой, механическое управление [b] и магнитное управление [c]



□ Области применения

Эта технология, разработанная для отключения тока повреждения, хорошо подходит для отключения емкостного тока, так как рассчитана на ток перегрузки и перенапряжение. Данный метод также используется для отключения слабых индуктивных токов. Без применения каких-либо вспомогательных средств устройства, использующие эффект теплового расширения, имеют ограниченные отключающую способность (PdC) и рабочее напряжение. Поэтому саморасширение часто сопровождается автокомпрессией при вращающейся дуге или нагнетании поршнем. Таким образом, метод саморасширения используется как в

устройствах для среднего напряжения (СН) так и для высокого напряжения (ВН) и подходит для всех видов применения.

Рабочие характеристики, полученные благодаря сочетанию теплового расширения и вращающейся дуги, позволяют рассматривать возможность использования этих технологий для выключателей при очень жестких требованиях к применению, например, для защиты генераторов переменного тока на электростанциях (большая асимметрия и повышенное напряжение TVR) или при необходимости обеспечить высокую износостойкость устройств.

### 3.6. Сравнение различных методов отключения

На сегодняшний день в области высокого напряжения (ВН) единственной используемой технологией, за исключением нескольких особых случаев, является магнитное отключение в воздухе.

Для очень высокого напряжения (СВН) в основном применяется, практически, только метод отключения в элегазе.

В сетях среднего напряжения (СН), где могут использоваться все технологии, методы отключения в элегазе и в вакууме заменили отключение в воздухе по причине меньших затрат и большей компактности (см. рис. 34) и отключение в масле в силу большей надежности, безопасности и сокращения объема технического обслуживания (см. рис. 35).

Технологии отключения в вакууме и в элегазе имеют сходные характеристики, и их свойства, соответственно, обуславливают выбор какой-либо из этих методик как наиболее адаптированной для определенного вида применения.

В разных странах та или иная технология находят преимущественное применение, главным образом, в силу сложившихся традиций или выбора изготовителей оборудования.

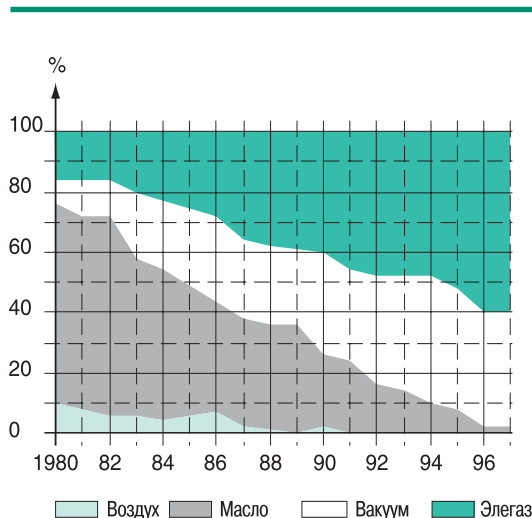


Рис. 34 : Динамика развития рынка выключателей для сетей среднего напряжения в Европе

	Масло	Воздух	Элегаз / вакуум
<b>Безопасность</b>	Риск возникновения взрыва или пожара, при повышении давления (при многократных коммутационных операциях) вызывает повреждение.	Значительные внешние проявления (эмиссия горячего и ионизированного газа при отключениях).	Нет риска возникновения взрыва или внешних проявлений.
<b>Размеры</b>	Относительно большие размеры устройства.	Установка, требующая больших расстояний (неограниченное отключение).	Небольшие.
<b>Обслуживание</b>	Периодическая замена масла (необратимое разложение масла при каждом отключении).	По возможности, замена дугогасительных контактов. Периодическое техническое обслуживание механизма управления.	Не требуется для отключающих устройств. Смазка в минимальном объеме механизмов управления.
<b>Чувствительность к воздействию окруж. среды</b>	Свойства среды отключения могут ухудшаться под воздействием факторов окружающей среды (влажность, пыль и т.д.).		Нечувствительны: полностью запаянная герметичная камера.
<b>Отключение быстрым циклом</b>	Большое время понижения давления приводит к необходимости снижения PdC, если есть риск возникновения последовательных отключений.	Очень медленный отвод горячего воздуха вызывает необходимость понижения номинала отключающей способности (PdC).	Элегаз и вакуум очень быстро восстанавливают свои электроизоляционные свойства: понижение номинала не требуется.
<b>Износостойкость</b>	Посредственная.	Средняя.	Высокая.

Рис. 35 : Сравнительная таблица характеристик различных технологий отключения

Ниже в таблице на **рисунке 36** представлены соответствующие характеристики каждой из этих двух технологий.

□ Элегазовые и вакуумные выключатели являются устройствами общего назначения и могут использоваться для всех видов применения.

Технологический прогресс в области производства вакуумных камер позволил получить очень надежные устройства, которые могут конкурировать с элегазовыми приборами.

Вакуумная технология удобнее в использовании при низком напряжении (меньше 7,2-12 кВ). С другой стороны, элегазовая технология позволяет обеспечивать лучшие характеристики отключения (напряжение или ток короткого замыкания).

□ Для обеспечения функций управления (контактор) (напряжение и ток умеренной силы, высокая требуемая износостойкость) очень широко применяется технология отключения в вакууме, несмотря на необходимость принятия мер защиты от перенапряжений. Напротив, данный метод почти не используется для отключения (функция отключения-изоляции) в силу экономических причин. В частности, высокая электрическая прочность элегаза после отключения позволяет сочетать в одном устройстве функции размыкания и разъединения, чего нельзя добиться при отключении в вакууме. На сегодняшний день большинство крупных производителей при изготовлении коммутационного оборудования используют обе технологии отключения в соответствии с их свойствами.

		Элегаз	Вакуум
<b>Виды применения</b>	Двигатели, печи, линии и т.д.	Все. Больше подходит для обеспечения высоких характеристик отключения (I и U).	Все. Больше подходит для использования при низком напряжении и при очень быстрых процессах TVR.
	Выключатели, контакторы и т.д.	Все.	Не используются для обеспечения функций изолирования.
<b>Характеристики</b>	Износостойкость	Соответствующие всем текущим видам применения.	Могут быть очень высокими для некоторых текущих видов применения.
	Перенапряжения	Нет риска возникновения при слабом емкостном токе. Очень малая вероятность повторного пробоя при емкостном токе.	Для управления двигателями и конденсаторными батареями рекомендуется использовать устройство защиты от перенапряжений
	Входная-выходная изоляция	Очень устойчивая, обеспечивающая функции изолирования.	
	Размеры		Очень компактное оборудование для использования в сетях низкого напряжения.
<b>Эксплуатационная надежность</b>	Потеря герметичности	При снижении до атмосферного давления ( $P_{atm}$ ) сохраняются до 80% рабочих характеристик.	
	Техническое обслуживание	В сокращенном объеме для механизма управления. Возможность постоянного контроля давления газа.	В сокращенном объеме для механизма управления. Возможность, при необходимости, контроля состояния вакуума.
	Количество повреждений	Очень малое (< 4/10 000), главным образом, связанное с приводом.	Очень малое, если обеспечивается контроль производства вакуумных камер выключателей.

**Рис. 36** : Сравнительная таблица технологий отключения в элегазе и в вакууме

### 3.7. Каковы возможности использования других технологий отключения?

На протяжении нескольких десятилетий инженеры занимаются разработкой выключателей без электрической дуги или подвижных частей, с использованием, в частности, электронных элементов. Тиристоры позволяют создать отключающие устройства, характеристики которых близки к параметрам идеального выключателя, поскольку тиристоры отключают ток при его прохождении через нуль, кроме того, имеют исключительную износостойкость при нормальных условиях эксплуатации. К сожалению, помимо их значительной стоимости, статические элементы имеют некоторые недостатки:

■ большое рассеяние тепла;

- высокая чувствительность к перенапряжениям и току перегрузки;
- возникновение тока утечки в состоянии блокировки;
- ограничение по напряжению обратной последовательности.

Эти особенности вызывают необходимость использовать вместе с данными устройствами:

- радиаторы;
- устройства для защиты от перенапряжений;
- предохранители быстродействующие;
- прерыватели или разъединители;
- системы электронного управления.



Достигнут огромный прогресс в разработке полупроводниковых устройств (тиристоры, GTO (запираемые тиристоры), IGBT), которые широко используются в сетях низкого напряжения (НН) для различных видов применения, например для контакторов, когда требуется обеспечить максимально высокую коммутационную способность.

В сетях высокого напряжения (ВН) тиристоры устанавливаются в автоматические устройства регулирования полного сопротивления, состоящие из дросселей и конденсаторов, в FACTS – Flexible Alternative Current Transmission System (Гибкая система передачи переменного тока), роль которых – оптимизация и стабилизация передающих сетей, и в Custom Power для распределительных сетей.

В сетях среднего напряжения (СН) эти устройства применяются очень редко, и статические выключатели по-прежнему используются в качестве прототипов, так как, помимо выше перечисленных их слабых сторон, для того, чтобы выдерживать номинальное напряжение, для этих устройств требуется последовательное подключение нескольких элементов.

В заключение следует отметить, что кроме совершенно особых видов применения, метод статического отключения в настоящее время не получил большого развития.

На сегодняшний день **безальтернативным** решением остается технология отключения с разрывом электрической дуги.

## 4. Заключение

Среди всех технологий отключения по среднему напряжению (СН) отключение в элегазе и отключение в вакууме обеспечивают заметно лучшие рабочие характеристики.

Выбор между отключением в вакууме или в элегазе обусловлен, прежде всего, областью применения и технологическим предпочтениями производителей, но также традициями использования той или иной страны: этим объясняется неодинаковая география распределения элегазовых и вакуумных устройств.

В настоящее время не существует какой-либо другой технологии, способной заменить отключение в вакууме или в элегазе, так как эти два метода, по сравнению с ранее разработанными способами, имеют много преимуществ:

- **безопасность:** нет риска взрыва, пожара или возникновения внешних проявлений при отключении;
- **компактность:** вакуум и элегаз являются очень хорошими изоляторами, соответственно, вакуумные и элегазовые устройства имеют меньшие габариты;

■ **наджность:** в этих устройствах мало подвижных частей при небольшой энергии управления, в результате чего обеспечивается техническое обслуживание в сокращенном объеме, высокая эксплуатационная готовность и очень большой срок службы;

■ **более простая установка** в корпус этих устройств и возможность изготовления компактных комплектных щитов среднего напряжения (СН) является еще одним важным преимуществом этого оборудования, так как наличие металлических перегородок не влияет на отключающую способность (PdC).

Благодаря использованию современных средств вычислительной техники, обеспечивающих процесс моделирования и симулирования, происходит постоянное совершенствование устройств отключения. Однако, наиболее значительные успехи в плане повышения эксплуатационной надежности оборудования (наджность, безопасность, обслуживаемость) связаны с практически повсеместным использованием устройств в готовом корпусе и протестированных в заводских условиях.

# Библиография

## Стандарты

- МЭК 60034. Вращающиеся электрические машины.
- МЭК 60056. Выключатели переменного тока высокого напряжения.
- МЭК 60909. Расчет тока короткого замыкания в трехфазных сетях переменного тока.
- Отчет МЭК 61233. Выключатели высокого напряжения переменного тока. Установление и отключение индуктивной нагрузки.
- Отчет МЭК 61634. Высоковольтная аппаратура. Использование и манипуляция шестифтористой серы (элегаза) в высоковольтной аппаратуре.

## Технические тетради Schneider Electric

- Анализ работы трехфазных сетей в аварийном режиме с помощью симметричных составляющих. Б. ДЕ МЕТЦ-НОБЛА, Техническая тетрадь № 18.
- Процесс отключения с помощью элегазового выключателя с автокомпрессией, тип Fluarc. Ж. ЭННЕБЕР, Техническая тетрадь № 112.
- Процесс отключения с помощью выключателя Fluarc или контактора Rollarc с разрывом вращающейся электрической дуги в элегазе. К. ДЮПЛЭ, Техническая тетрадь № 123.
- Преодоление коммутационных перенапряжений с помощью элегазовых устройств. О. БУЙЕ, Техническая тетрадь № 125.
- Расчет тока короткого замыкания. Б. ДЕ МЕТЦ-НОБЛА и Ж. ТОМАССЕ, Техническая тетрадь № 158.
- Управление, контроль и защита высоковольтных двигателей. Ж.-И. БЛАН, Техническая тетрадь № 165.
- Отключение методом саморасширения. Ж. БЕРНАР, Техническая тетрадь № 171.
- Свойства элегаза и использование в коммутационном оборудовании для сетей среднего напряжения (СН) и высокого напряжения (ВВ). Д. КОХ, Техническая тетрадь № 188.
- Управление и защита конденсаторных батарей. Д. КОХ, Техническая тетрадь № 189.

## Прочие публикации

- Высоковольтные выключатели. Конструкция и применение. РУБЕН, Д. ГАРЗОН.
- Выключатели ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. Сравнение различных способов отключения. Б. ЖУАЙЕ-БУЙОН (GEC ALSTHOM) и Ж.-П. РОБЕР (Merlin-Gerin).
- Элегазовые выключатели. Разработка 1959 - 1994 гг. Д. ДЮФУРНЕ (GEC ALSTHOM- T&D).
- Управление емкостным током. Технологический уровень. ELECTR № 155, август 1994 года.
- Изучение существующих технологий использования выключателей в распределительных сетях. IREQ, апрель 1991 года.
- Техническое руководство по использованию выключателей. П. ПОЛО и П. АТЬЕ, 1993 г.

# Schneider Electric в странах СНГ

## Азербайджан

**Баку**  
AZ 1008, ул. Гарабах, 22  
Тел.: (99412) 496 93 39  
Факс: (99412) 496 22 97

## Беларусь

**Минск**  
220030, ул. Белорусская, 15, офис 9  
Тел.: (37517) 226 06 74, 227 60 34  
227 60 72

## Казахстан

**Алматы**  
050050, ул. Табачнозаводская, 20  
Швейцарский Центр  
Тел.: (727) 244 15 05 (многоканальный)  
Факс: (727) 244 15 06, 244 15 07

## Астана

ул. Бейбитшилик, 18  
Бизнес-центр «Бейбитшилик 2002», офис 402  
Тел.: (7172) 91 06 69  
Факс: (7172) 91 06 70

## Атырау

060002, ул. Абая, 2-А  
Бизнес-центр «Сутас - С», офис 407  
Тел.: (7122) 32 31 91, 32 66 70  
Факс: (7122) 32 37 54

## Россия

**Волгоград**  
400001, ул. Профсоюзная, 15/1, офис 12  
Тел.: (8442) 93 08 41

## Воронеж

394026, пр-т Труда, 65  
Тел.: (4732) 39 06 00  
Тел./факс: (4732) 39 06 01

## Екатеринбург

620219, ул. Первомайская, 104, офисы 311, 313  
Тел.: (343) 217 63 37, 217 63 38  
Факс: (343) 349 40 27

## Иркутск

664047, ул. Советская, 3 Б, офис 312  
Тел./факс: (3952) 29 00 07

## Казань

420107, ул. Спартаковская, 6, этаж 7  
Тел.: (843) 526 55 84 / 85 / 86 / 87 / 88

## Калининград

236040, Гвардейский пр., 15  
Тел.: (4012) 53 59 53  
Факс: (4012) 57 60 79

## Краснодар

350020, ул. Коммунаров, 268, офисы 316, 314  
Тел./факс: (861) 210 06 38, 210 06 02

## Красноярск

660021, ул. Горького, 3 А, офис 302  
Тел.: (3912) 56 80 95  
Факс: (3912) 56 80 96

## Москва

129281, ул. Енисейская, 37  
Тел.: (495) 797 40 00  
Факс: (495) 797 40 02

## Нижний Новгород

603000, пер. Холодный, 10 А, офис 1.5  
Тел.: (831) 278 97 25  
Тел./факс: (831) 278 97 26

## Новосибирск

630005, Красный пр-т, 86, офис 501  
Тел.: (383) 358 54 21, 227 62 54  
Тел./факс: (383) 227 62 53

## Пермь

614010, Комсомольский пр-т, 98, офис 11  
Тел./факс: (343) 290 26 11 / 13 / 15

## Самара

443096, ул. Коммунистическая, 27  
Тел./факс: (846) 266 50 08, 266 41 41, 266 41 11

## Санкт-Петербург

198103, ул. Циолковского, 9, корпус 2 А  
Тел.: (812) 320 64 64  
Факс: (812) 320 64 63

## Уфа

450064, ул. Мира, 14, офисы 518, 520  
Тел.: (347) 279 98 29  
Факс: (347) 279 98 30

## Хабаровск

680011, ул. Металлистов, 10, офис 4  
Тел.: (4212) 78 33 37  
Факс: (4212) 78 33 38

## Туркменистан

### Ашгабат

744017, Мир 2/1, ул. Ю. Эмре, «Э.М.Б.Ц.»  
Тел.: (99312) 45 49 40  
Факс: (99312) 45 49 56

## Узбекистан

### Ташкент

100000, ул. Пушкина, 75  
Тел.: (99871) 140 11 33  
Факс: (99871) 140 11 99

## Украина

### Днепропетровск

49000, ул. Глинки, 17, 4 этаж  
Тел.: (380567) 90 08 88  
Факс: (380567) 90 09 99

### Донецк

83023, ул. Лабутенко, 8  
Тел./факс: (38062) 345 10 85, 345 10 86

### Киев

04070, ул. Набережно-Крещатицкая, 10 А  
Корпус Б  
Тел.: (38044) 490 62 10  
Факс: (38044) 490 62 11

### Львов

79015, ул. Тургенева, 72, к. 1  
Тел./факс: (032) 298 85 85

### Николаев

54030, ул. Никольская, 25  
Бизнес-центр «Александровский», офис 5  
Тел./факс: (380512) 48 95 98

### Одесса

65079, ул. Куликово поле, 1, офис 213  
Тел./факс: (38048) 728 65 55

### Симферополь

95013, ул. Севастопольская, 43/2, офис 11  
Тел./факс: (380652) 44 38 26

### Харьков

61070, ул. Ак. Проскуры, 1  
Бизнес-центр «Telesens», офис 569  
Тел.: (380577) 19 07 49  
Факс: (380577) 19 07 79



## ЦЕНТР ПОДДЕРЖКИ КЛИЕНТОВ

Тел.: 8 (800) 200 64 46 (многоканальный)  
(495) 797 32 32  
Факс: (495) 797 40 02  
ru.csc@ru.schneider-electric.com  
www.schneider-electric.ru