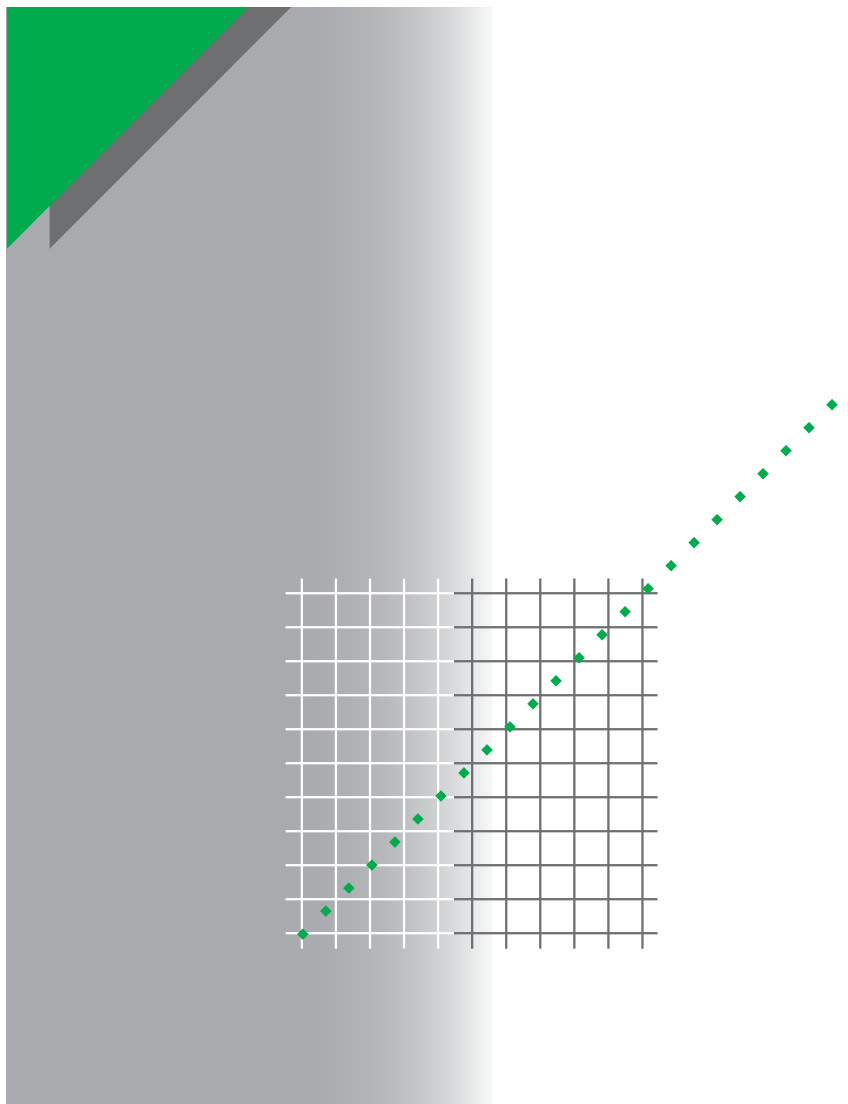


Выпуск № 15

Отключение электрического тока в вакууме



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 № 15

Отключение электрического тока в вакууме



Филипп ПИКО

Горный инженер, окончил ENSMP (Парижская высшая национальная горная школа).

В 1982 году поступил на работу в компанию Merlin Gerin, работал на различных должностях, в отделе по направлению «Среднее напряжение».

С 1995 года участвует в разработке гаммы вакуумных камер Schneider Electric.

В настоящее время отвечает за технологическую подготовку оборудования и устройств по направлению «Среднее напряжение».

Отключение электрического тока в вакууме

В данной Технической тетради дается общее представление об основных понятиях, касающихся принципа работы и использования устройств отключения в вакууме.

В первой части, озаглавленной «Теория и практика отключения в вакууме», содержится краткое описание физических явлений, связанных с отключением в вакууме, и сведения о применении на практике этих явлений. В данном разделе описываются также различные технологические возможности, используемые разработчиками вакуумных камер.

Вторая часть посвящена вопросам взаимодействия вакуумного выключателя и электрической сети при наличии индуктивных цепей, в которых отключение в вакууме может вызвать перенапряжение, а также средствам защиты от перенапряжения.

В третьей части автор объясняет, каким образом характеристики, свойственные явлению отключения в вакууме, представленные в двух предшествующих частях, определяют наиболее предпочтительные виды применения этой технологии в соответствии с уровнем напряжения и типом устройства.

К данной Технической тетради прилагается подробная библиография работ и документов, с которой можно ознакомиться в случае необходимости получить более подробные сведения по какому-либо конкретному вопросу.

Содержание

	<i>Стр.</i>
1. Введение. Использование вакуума как среды отключения электрооборудования	4
2. Теория и практика отключения в вакууме	
2.1 Диэлектрические свойства вакуума	5
2.2 Электрическая дуга в вакууме	7
2.3 Явления, связанные с отключением при прохождении тока через нуль	9
2.4 Практическая разработка вакуумных выключателей	12
3. Отключение в вакууме и возникновение перенапряжения в случае управления индуктивными цепями	
3.1 Явления, вызывающие перенапряжение	19
3.2 Меры защиты от перенапряжения	22
4. Основные области применения отключения в вакууме	24
4.1 Применение технологии отключения в вакууме в сетях среднего напряжения	25
4.2 Применение технологии отключения в вакууме в сетях низкого напряжения	28
4.3 Применение технологии отключения в вакууме в сетях высокого напряжения	29
5. Заключение	30
Библиография	31

1. Введение. Использование вакуума как среды отключения электрооборудования

Отключение в среде SF₆ (элегаз) и в вакууме является современным методом, применяемым для среднего напряжения (1 - 52 кВ) и высокого напряжения (> 72,5 кВ). Разработанная в 60-е годы, эта технология получила быстрое развитие в 70-е годы и в настоящее время вытеснила прежнюю методику разрыва (дуги) в воздухе и в масле (см. **рис. 1**).

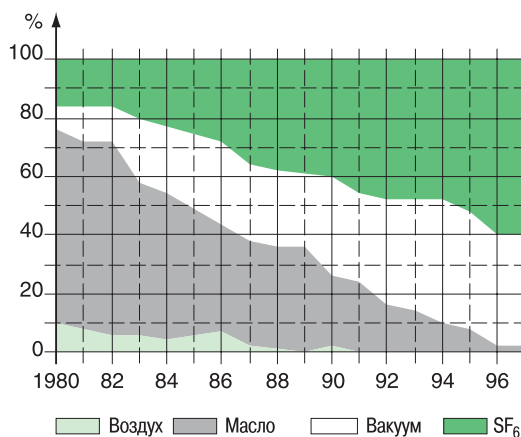


Рис. 1 : Развитие применения выключателей среднего напряжения в Европе

Принимая во внимание то, что отключение электрической дуги в элегазе (SF₆) используется во всех диапазонах среднего и высокого напряжения, отключение электрической дуги в среде вакуума развивалось в основном в диапазоне среднего напряжения, частично вторгаясь в диапазон высокого и низкого напряжений, таким образом: эти два метода конкурируют только в области среднего напряжения.

В настоящее время подобная конкуренция преодолена: если раньше существовало соперничество в коммерческом плане между производителями, выбиравшими

какой-либо один из этих методов для производства, то сейчас все крупные изготовители используют обе технологии, чтобы иметь возможность максимально удовлетворять требования каждого заказчика. В действительности, каждый метод имеет свои сильные и слабые стороны. Несмотря на то, что любая из этих технологий является многофункциональной и позволяет создать надежное и конкурентноспособное оборудование, обеспечивающее решение большинства проблем отключения в сетях среднего напряжения, пользователи, тем не менее, хотят иметь выбор в зависимости от вида применения, условий эксплуатации и технического обслуживания устройств, в зависимости от приоритетов и, может быть, в силу устоявшихся традиций.

Что касается предыстории, то метод отключения (разрыва электрической дуги) в вакууме первоначально был разработан американскими и английскими конструкторами (первопроходцами являются компании General Electric и VIL), затем этими разработками занялись в Японии и в Германии: в обеих этих странах для электроснабжения по среднему напряжению используются сети с относительно низким номинальным напряжением (от 7,2 до 15 кВ). Напротив, в таких странах как Франция и Италия, где для электроснабжения используются сети напряжением, близким к 24 кВ, изготовители оборудования выбрали технологию отключения в SF₆.

С удовлетворением можно отметить, 30 лет спустя правильность этого технологического выбора для рассматриваемого вида применения. В действительности, на сегодняшний момент по результатам общей технико-экономической оценки двух технологий еще прослеживается равенство в использовании для сетей напряжением от 12 до 24 кВ и преимущественное применение метода отключения в SF₆ при более высоком напряжении и отключения в вакууме при более низком напряжении. При этом разница в стоимости затрат остается, по-прежнему, незначительной, чем объясняется использование обеих технологий, отключение в вакууме и в SF₆, для всего диапазона среднего напряжения, от 7,2 до 36 кВ.

2. Теория и практика отключения в вакууме

2.1. Диэлектрические свойства вакуума

Любая среда отключения должна быть прежде всего хорошим изолятором, так как речь идет о создании преграды для прохождения тока. Вакуумная среда не является исключением из правила: вакуум обладает нужными диэлектрическими свойствами, но при этом эти свойства особые по отношению к газообразным диэлектрикам, которые обычно используются при давлении, превышающем или равном 1 бару. Вакуум, квалифицирующийся как «высокий» (диапазон давления от 10^{-1} до 10^{-5} Па либо от 10^{-3} до 10^{-7} мбар), в колбах вакуумных выключателей (см. **рис. 2**) в действительности представляет собой газ под низким давлением: обычно это давление составляет 10^{-6} мбар в новой колбе.



Рис. 2 : Вакуумная камера Schneider Electric 17,5 кВ

При таком давлении объем в 1 мм^3 еще содержит $27 \cdot 10^6$ молекул газа, но их взаимодействием можно пренебречь, так как средний свободный пробег между двумя столкновениями молекул составляет порядка сотни метров: таким образом, такое состояние определяется понятием вакуума, как если бы каждая молекула была, практически, единственной.

Диэлектрические характеристики газа

При обычных уровнях давления (атмосферное и более высокое давление) диэлектрические характеристики газа представлены правой ветвью кривой Пашена (см. рис. 3): напряжение пробоя V является возрастающей функцией от произведения $p \cdot d$ (p = давление, d = расстояние

между электродами). Это отношение характеризует механизм цепной ионизации (лавинная ионизация), которая вызывает пробой: электроны должны получить между двумя столкновениями энергию, достаточную (пропорциональную $\frac{V}{p \cdot d}$) для ионизации молекул газа, и, таким образом, создать другие электроны.

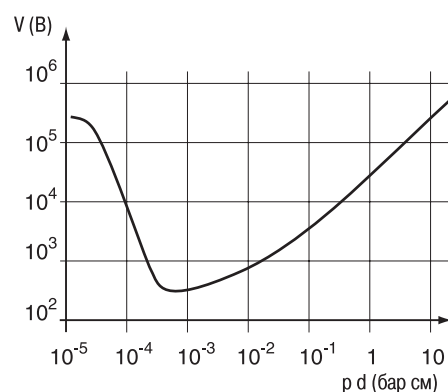


Рис. 3 : Изменение электрической прочности воздуха в зависимости от давления (кривая Пашена)

При низких значениях давления этот механизм перестает работать. В действительности электроны могут получить много энергии за время их среднего свободного пробега, но вероятность того, что электроны столкнутся с молекулами, которые они ионизируют, до того, как достигнут электрода, становится незначительной: лавинный процесс и размножение носителей заряда прекращаются, и электрическая прочность повышается. Именно это явление представлено на кривой Пашена, где показана минимальная электрическая прочность для произведения $p \cdot d$ порядка 1 Па в азоте. Выше этого значения электрическая прочность быстро улучшается (левая часть кривой Пашена) и достигает уровня значений $p \cdot d$ менее 10^{-2} Па м. Этот уровень и характеризует диэлектрические свойства откачанных колб (давление ниже 10^{-3} мбар либо 10^{-1} Па, расстояние порядка 1 – 10 см). Это соответствует высокой электрической прочности, сравнимой с прочностью в элегазе SF6 при давлении примерно 2 бара и интервалов порядка 1 см. В этой области электрическая прочность больше не ограничивается механизмами ионизации остаточного газа, но ограничение вызывается явлениями, связанными с состоянием поверхности электродов, например, электростатической эмиссией и присутствием отделяемых частиц.

■ Автоэлектронная эмиссия

Автоэлектронная эмиссия заключается в экстракции электронов из металла электродов. Этого можно добиться за счет значительного повышения температуры металла: таким образом происходит термоэлектронная эмиссия у поверхности разогретых катодов электронных ламп. Другой способ заключается в приложении достаточно сильного электрического поля к поверхности металла. Данное явление, а именно автоэлектронная эмиссия может происходить в вакуумных камерах. Данный процесс рассчитывается с помощью уравнения Фаулера-Нордхайма, которое в упрощенном виде представлено ниже:

$$j_e = \frac{AE^2}{\phi} \exp\left(-\frac{B\phi^{1,5}}{E}\right), \text{ где:}$$

j_e – плотность электронного потока, Ам^{-2} ;

$A = 1,54 \cdot 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{Дж} \cdot \text{В}^{-2}$

E – напряженность электрического поля, Вм^{-1} ;

ϕ – работа выхода, еВ (4,5 еВ для меди).

$$B = 6,83 \cdot 10^9 \text{ В} \cdot \text{Дж}^{-1,5} \cdot \text{м}^{-1}$$

Как можно заключить из вышеуказанных цифровых значений, автоэлектронная эмиссия становится заметной только при значениях напряженности поля на поверхности металлов в пределах от нескольких 10^9 Вм^{-1} до 10^{10} Вм^{-1} . Речь идет об очень больших значениях, определенно превышающих значения напряженности макроскопического поля, применяемых при расчетах для вакуумных камер (порядка $10^7 \text{ Вм}^{-1} = 100 \text{ кВ/см}$). Тем не менее, автоэлектронная эмиссия отчетливо наблюдается в вакуумных камерах: таким образом, из этого можно сделать вывод, что местно, на микроскопическом уровне, электрическое поле усиливается коэффициентом интенсификации β , составляющим порядка нескольких 10^2 или 10^3 . Явления, обуславливающие эти высокие значения β , еще полностью не описаны исследователями, которые, главным образом, на первый план выдвигают либо воздействие микроскопических острых частиц, либо включений или изолирующих частиц на поверхности металла.

□ Процесс формирования напряжения пробоя

Наличие активных микроскопических участков эмиссии выражается, главным образом, в низкой электрической прочности новых камер (примерно 10 кВ/см); напротив, в ходе экспериментов установлено, что многократный пробой диэлектрика разрушает эти участки или, по меньшей мере, уменьшает значение коэффициента интенсификации, что говорит о высокой чувствительности этих участков. Таким образом, должная электрическая прочность (относительно заданных значений) достигается только в результате процесса формирования напряжения пробоя, который заключается в подаче в течение нескольких минут повышенного напряжения (значением равным расчетной электрической прочности): многочисленные пробои, которые происходят, постепенно повышают электрическую прочность между электродами. Это явление представлено на **рисунке 4**, где показано

изменение во времени напряжения пробоя при прохождении разрядов: предел повышения электрической прочности достигается на уровне примерно 10^8 Вм^{-1} , что, кроме того, соответствует микроскопическому «неснижаемому» β порядка 100.

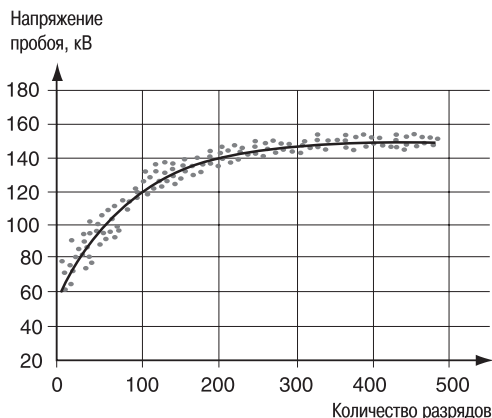


Рис. 4 : Изменение во времени напряжения пробоя между двумя электродами в вакууме при прохождении разрядов

□ Механизм пробоя

В результате пробоя диэлектрика, который возникает под действием тока электронной эмиссии, бывают задействованы дополнительные механизмы: в действительности установившийся ток электронной эмиссии (при максимальных значениях в несколько мА) не переходит в обязательном порядке в пробой, если подаваемое напряжение не увеличивается, ток эмиссии может даже сам по себе уменьшаться под влиянием процесса формирования напряжения пробоя. Пробой как таковой связан с образованием локализованной плазмы (ионизированный газ), достаточно плотной для того, чтобы вызвать лавинный процесс газовых разрядов. Плазма может образовываться со стороны катода за счет подрыва участка микроскопической эмиссии в результате интенсивного нагрева, обусловленного очень высокой локальной плотностью тока (эффект Джоуля – Ленца): пробой происходит в среде паров металла, образующихся при разрушении участка эмиссии. Плазма может также образовываться со стороны анода, бомбардируемого пучком энергетически сильно заряженных электронов (что выражается, к тому же, в появлении рентгеновского излучения). Этот локальный поток энергии вызывает десорбцию газа, поглощенного с поверхности, и испарение металла с поверхности анода: затем образованный газ ионизируется пучком электронов, и происходит пробой.

■ Влияние отделяемых частиц

Второй фактор может вызвать пробой диэлектрика в вакууме: речь идет об отделяемых частицах присутствующих на поверхности стенок вакуумного

выключателя. Высвобождаясь под воздействием удара или электростатических сил, эти заряженные частицы приобретают энергию при преодолении расстояния между электродами. В момент столкновения с электродом, который их притягивает, эти частицы могут вызвать пробой за счет двух, возможно, сопутствующих явлений:

- локального повышения плотности газа в результате десорбции поглощенных молекул газа;
- возникновения процесса электронной эмиссии и частичного испарения частиц или электрода под действием пучка, который их бомбардирует.

Подтверждением практического значения состояния частиц является экспериментально полученный вывод о том, что электрическая прочность в вакууме между двумя электродами повышается приблизительно пропорционально значению квадратного корня расстояния между электродами. Это отношение может быть объяснено предположением, что частицы должны получить заряд энергии (пропорциональный V^2/d), достаточный для того, чтобы вызвать пробой. По этой же причине крупные частицы, способные нести более мощный электрический заряд, способны создать больше проблем, чем мелкие частицы.

Рассматривая вопрос неблагоприятного влияния отделяемых частиц на электрическую прочность вакуумных выключателей, следует учитывать два обстоятельства:

- трудно добиться очень больших значений электрической прочности, даже при значительном расстоянии между электродами (см. рис. 5);
- электрическая прочность вакуумного выключателя носит неопределенный характер: пробой может произойти с задержкой относительно подачи напряжения и при напряжении, меньшем, чем напряжение, которое безаварийно выдерживалось раньше.

Выводы

- Вакуум обладает нужными диэлектрическими свойствами при условии ограничения подаваемого напряжения в пределах примерно от 100 до 200 кВ, что соответствует требуемому уровню изоляции для заданных

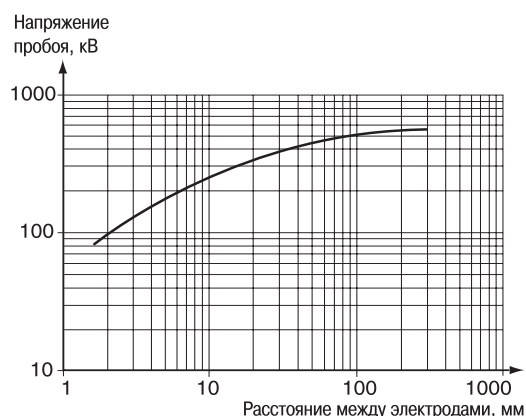


Рис. 5 : Допустимая электрическая прочность при очень большом расстоянии между электродами

значений напряжения, 36 кВ, при которых расстояние между электродами может составлять несколько сантиметров. При больших значениях напряжения задача обеспечения необходимой электрической прочности вышеописанным методом становится трудоемкой и менее эффективной, чем решение этой проблемы за счет использования газовой изоляции SF₆.

- Электрическая прочность любого устройства отключения в вакууме изменяется во времени. В действительности, в результате механических действий и воздействия электрической дуги происходит изменение состояния поверхности контактов и генерация частиц. Таким образом, уровень электрической прочности, обеспечиваемый при выходе на требуемое напряжение, не может считаться окончательно достигнутым. Следовательно, вакуум не является идеальной изолирующей средой, когда надежность поддержания уровня электрической прочности является первостепенной задачей, например, в случае применения разъединителя.

2.2. Электрическая дуга в вакууме

Несмотря на то, что, как указано в предыдущем разделе, вакуум является превосходным диэлектриком, тем не менее электрическая дуга вполне может присутствовать в вакууме. В действительности, напряжение дуги в вакууме обычно бывает значительно ниже напряжения электрической дуги в других средах, что является преимуществом, когда речь идет об энергии, рассеиваемой в дуге. Электрическая дуга в вакууме возникает, если представить упрощенно, в двух основных формах: диффузной и сфокусированной.

Диффузный режим, характерный для вакуума

Диффузия характерна для электрической дуги в вакууме: это явление представляет особые свойства, которые определенным образом отличают его от дуги в

газообразной среде. Разумеется, при подобном явлении допускается присутствие электрической дуги в вакууме, если сила тока составляет от нескольких ампер до нескольких килоампер.

Диффузия имеет следующие основные характеристики:

- катод излучает в пространство между электродами в виде одного или нескольких катодных пятен в целом нейтральную плазму, состоящую из электронов и ионов, которые, в обычном режиме, с большой скоростью направляются к поверхности анода;
- анод, по всей поверхности окруженный плазмой, играет роль пассивного коллектора зарядов. Катодные пятна и плазма характеризуют электрическую дугу в режиме диффузии.

■ Катодное пятно

Катодное пятно представляет собой зону очень маленького размера (луч порядка 5 – 10 мкм), из которой происходит эмиссия тока, достигающего сотни ампер. На поверхности катодного пятна создаются предельные температурный режим и состояние электрического поля (обычно 5000 К и $5 \cdot 10^9$ В/м), обеспечивающие электронную эмиссию за счет сочетания механизмов термоэлектронной и автоэлектронной эмиссии (англ. T.F.: thermo-field emission), создающих очень высокую плотность тока (порядка $10^{11} - 10^{12}$ А/м²). При значениях больше 100 А это пятно разделяется, и на катоде образуется несколько пятен, число которых является достаточным для передачи каждым пятном тока силой в сотню ампер. Эти пятна взаимно отталкиваются, что позволяет квалифицировать их движение как «ретроградное», так как оно является противоречащим обычному действию электромагнитных сил. Таким образом, в режиме рассеивания электрическая дуга стремится занять всю свободную поверхность катода (даже когда в определенный момент времени участки эмиссии представляют собой совсем маленькую часть катода).

■ Плазма

На макроскопическом уровне катодное пятно (с которым связано появление кратера и плазмы) представляется в виде точки, вырабатывающей плазму малой плотности, которая выделяется пятном и заполняет пространство между электродами. Эта плазма, являясь в целом нейтральной (значения плотности равны зарядам + и -), состоит из электронов и ионов, обычно с двойным зарядом (для дуги, образующейся на электродах на основе меди). Одной из характеристик данного вида плазмы является большая скорость ионов, которые заряжены энергией, превышающей напряжение электрической дуги (что свидетельствует о наличии в зоне катодного пятна процессов образования высоких энергий). Эти ионы, выходящие из пятна с распределенной скоростью примерно по $\cos(\text{угол} / \text{нормаль})$, без труда достигают анода и создают ионный поток, противоположный по направлению основному электронному току, который составляет обычно 10 % от тока дуги. Направленная скорость этих ионов достигает порядка 10^4 м/с, что больше скорости теплового движения ионов.

Одним из важных следствий высокой скорости ионов, создаваемых катодными пятнами, является их малое время прохождения пространства между электродами (обычно порядка 1 нс). Таким образом, плазма, образуемая катодным пятном, состоящая из очень подвижных частиц (быстрые электроны и ионы, нейтральные частицы практически отсутствуют), исчезает очень быстро, когда пятно перестает функционировать (при нулевом потоке).

Анод окружен плазмой, создаваемой катодными пятнами. Анод играет роль пассивного электрода, принимающего заряды и выдающего заданный по схеме ток, регулируя тем самым свой потенциал: потенциал является отрицательным относительно потенциала плазмы, пока ток меньше потока, соответствующего столкновениям, вызванным тепловым движением электронов.

Распределение потенциалов в дуге следующее:

- катодный скачок порядка 20 В, происходящий в непосредственной близости от катода;
- падение напряжения на несколько вольт в плазме, которое увеличивается с расстоянием и током (положительная характеристика, допускающая взаимное действие нескольких параллельных дуг, в противоположность электрической дуге в газообразной среде);
- отрицательный анодный скачок, как в выше описанном случае (умеренный ток, поглощаемый анодом). В этом режиме наблюдается слабая эрозия катода: она соответствует потоку ионов, исходящих с катода, примерно 40 мкг/с. Значительная часть этих ионов осаждается на аноде, в результате чего при переменном токе эрозия как таковая намного меньше: значение, приблизительно деленное на коэффициент 10 для контакторов, работающих в этом режиме при ограниченной силе тока и небольшом расстоянии между электродами.

Сфокусированный режим, аналогичный явлению электрической дуги в газообразной среде

При увеличении тока ситуация, описанная выше, изменяется прежде всего со стороны анода. Это изменение вызвано несколькими явлениями.

■ Сначала происходит сжатие плазменного столба, главным образом, обусловленное эффектом Холла (отклонение зарядов под действием азимутального магнитного поля, создаваемого другими линиями тока, в результате чего появляется радиальная составляющая, прижимающая линии тока к оси): ток фокусируется в более ограниченной области анода.

■ Однако, поскольку анод должен притягивать все больше электронов, нейтральность плазмы больше не обеспечивается: не хватает положительных ионов, чтобы уравновесить пространственный заряд электронов вблизи анода. Это вызывает положительный анодный скачок напряжения, необходимый для того, чтобы притягивать электроны, несмотря на наличие пространственного заряда. Энергия, полученная анодом, возрастает и стремится сфокусироваться в ограниченной зоне: анод нагревается и начинает излучать нейтральные частицы, которые ионизируются первичными электронами. Вблизи анода появляется вторичная плазма, образуемая вторичными электронами и ионами, энергетически менее заряженными, чем электроны и ионы, излучаемые катодными пятнами.

В результате этих явлений возникает световое анодное пятно, значительно большего размера (примерно квадратный сантиметр), чем катодные пятна, образованное расплавленным металлом, который испускает в пространство между электродами последовательные порции пара, ионизирующиеся в потоке, выходящем с катода.

Этот процесс сжатия на стороне анода заканчивается тем, что вызывает такое же сжатие на стороне катода, так как создается преимущественное прохождение благодаря плазме, образуемой анодом: устанавливается катодное

пятно, соответствующее анодному пятну, и электрическая дуга возникает в сфокусированном режиме, характерном для дуги в газообразной среде. В этом случае речь идет о дуге в плотной атмосфере паров металла, в которой механизмы функционирования теперь основываются на ионизации газообразной среды.

Таким образом, электрическая дуга в сфокусированном режиме характеризуется образованием плазмы, состоящей из электронов (по большей части, вторичных), из нейтральных частиц и ионов, энергия которых близка к энергии нейтральных частиц, то есть относительно медленных ионов.

2.3. Явления, связанные с отключением при прохождении тока через ноль

Основные принципы отключения

В работе всех выключателей среднего напряжения используется эффект естественного прохождения через ноль переменного тока (2 раза за период или каждые 10 мс для тока частотой 50 Гц) для отключения тока.

■ Неизбежность фазы электрической дуги

При установлении в цепи тока повреждения размыкание контактов выключателя не оказывает незамедлительного действия на прохождение тока. На поверхности последних точек контактирования плотность тока становится очень высокой, что вызывает локальное оплавление контактов и образование жидкого металлического моста. Поскольку контакты продолжают размыкаться, этот разогретый ток становится неустойчивым, и его разрыв выражается в появлении электрической дуги, сфокусированной в парах металла, в результате разрыва жидкого моста. Напряжение дуги, которое возникает, для вакуума является низким относительно электродвижущей силы генераторов сетей низкого или высокого напряжения: таким образом, это напряжение дуги существенно не влияет и не ограничивает ток, проходящий по цепи.

Эта дуга действует в режиме рассеивания или в сфокусированном режиме, представленных в предыдущем разделе, может переходить из одного режима в другой и сохраняться до прохождения тока через ноль.

■ Фаза восстановления после прохождения тока через ноль

Если плазма, которая обеспечивала до этого момента прохождение тока, за время разрыва очень быстро рассеется, к следующему полупериоду ток может не установиться. Тогда на зажимах элемента, перешедшего из состояния проводника в состояние изолятора, появляется переходное восстанавливающееся напряжение (TVR), заданное по схеме. В случае короткого замыкания напряжение TVR возникает в результате колебаний между локальными емкостями и катушками индуктивности сети. Это напряжение, в своей начальной фазе, приблизительно имеет форму $(1 - \cosinus)$ с частотой, характерной для сетей среднего напряжения, порядка нескольких десятков кГц и достигает пикового значения, превышающего нормальное напряжение сети, что соответствует средней скорости увеличения в несколько кВ/мкс. Если новая изолирующая среда выдерживает механическое напряжение диэлектрика, которое прикладывается, отключение тока считается успешным (см. **рис. 6**).

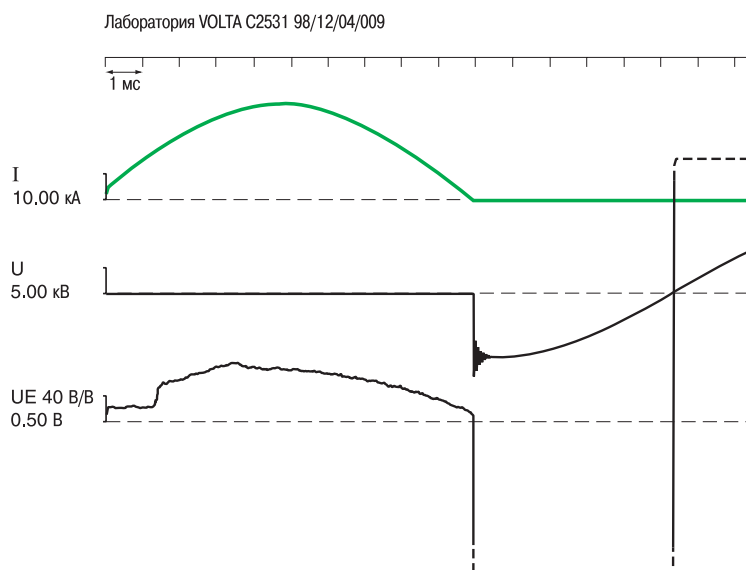


Рис. 6 : Успешное отключение тока (источник данных: Merlin Gerin)

Отключение в вакууме

Чтобы определить условия успешного отключения тока, необходимо изучить явления, происходящие вблизи нуля тока в плазме электрической дуги в вакууме.

■ Послеразрядный ток

К концу полупериода ток уменьшается тем быстрее, чем больше был пиковый ток, и выше частота сети ($di/dt = \omega \hat{I}$). Дуга в вакууме переходит в режим рассеивания и вблизи нуля тока теперь имеется только одно катодное пятно. Напротив, пространство между контактами еще заполнено остаточной плазмой, в целом нейтральной, состоящей из электронов, ионов и нейтральных частиц, образованных предыдущей дугой. В момент прохождения тока через нуль последнее катодное пятно исчезает, поскольку отсутствует напряжение дуги. Таким образом, больше нет участка эмиссии, излучающего заряженные частицы (электроны и ионы), необходимые для передачи электрического тока. С этого момента между двумя контактами возникает напряжение с полярностью, противоположной напряжению предыдущей дуги (TVR): бывший анод становится отрицательным по отношению к бывшему катоду и отталкивает электроны. Ток в цепи теперь представляет собой только ионный ток, экстрагируемый бывшим анодом из остаточной плазмы, которая разрежается: этот ток противоположной полярности по отношению к току в дуге называется послеразрядным. Таким образом, бывший анод больше не находится в контакте с нейтральной плазмой, еще присутствующей в пространстве между контактами: анод отделен от плазмы определенным пространством, подобным экранирующей

оболочке, что объясняет отсутствие электронов, отталкиваемых под действием отрицательного напряжения бывшего анода, и присутствие только положительных ионов, которые преодолевают границу нейтральной плазмы и затем ускоряются к бывшему аноду. Таким образом, напряжение, которое возникает между бывшим катодом и бывшим анодом, прикладывается только по толщине этого пространства (оболочки), разделяющей нейтральную плазму и бывший анод. Кроме того, присутствие в этом пространстве положительных пространственных зарядов усиливает электрическое поле на поверхности бывшего анода, напряженность которого больше средней напряженности соответствующего поля при значении TVR, деленном на толщину оболочки (см. **рис. 7**).

Толщина пространства, окружающего бывший анод, пропорциональна напряжению между нейтральной плазмой и электродом и обратно пропорциональна плотности положительных ионов: то есть толщина увеличивается с изменением TVR, и скорость этого увеличения возрастает, по мере того как плазма разрежается. Когда пределы пространства достигают бывшего катода, остаточная плазма исчезает, поскольку все ее заряды использованы послеразрядным током, который переходит на нуль.

Эти явления происходят за очень малый промежуток времени: общая продолжительность прохождения послеразрядного тока обычно составляет 1 - 10 мкс (см. **рис. 8**).

■ Причины неотключения

Для поддержания тока необходимо, чтобы механизмы формирования электрических зарядов выполняли роль катодных пятен, погашенных бывшим катодом.

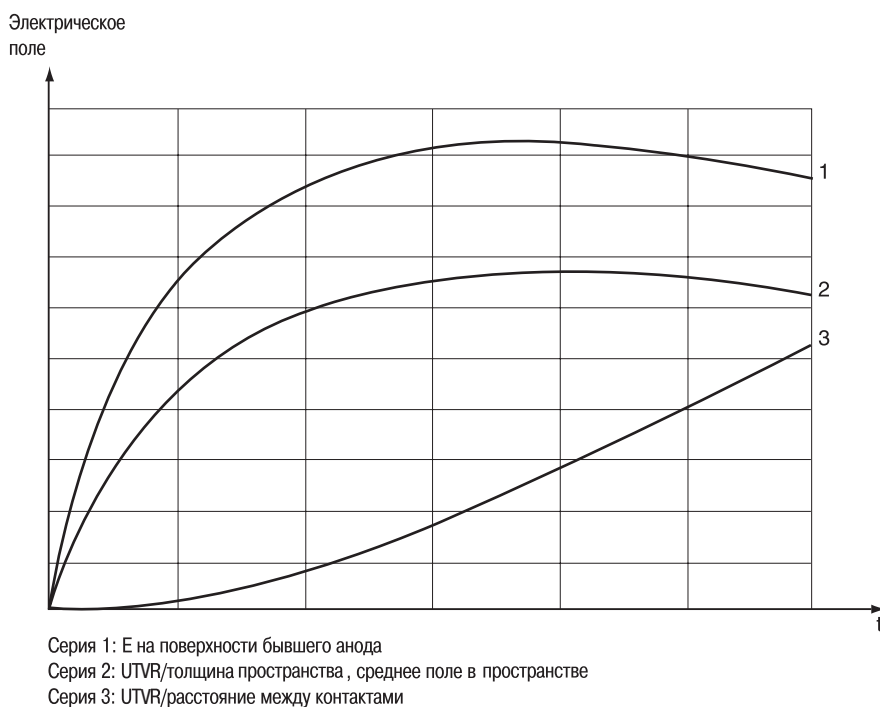


Рис. 7 : Электрическое поле на поверхности бывшего анода и соответствующее среднее поле между электродами

Первым возможным механизмом является ионизация нейтрального пара металла, присутствующего в пространстве между контактами. Ионизация происходит тем проще, чем выше плотность нейтральных частиц. Если плотность пара очень высока (очень сильно разогретые зоны на контактах, выделяющие большое количество паров металла), ток вообще не отключается: нет возрастания TVR, и речь идет о «термическом неотключении».

Если плотность нейтральных частиц достаточно велика, чтобы электрическая прочность вакуума снизилась (примерно до минимума по кривой Пашена), ток может быть отключен, но пространство между контактами не выдерживает приложенного напряжения TVR, и во время повышения TVR происходит пробой, то есть речь идет о «диэлектрическом неотключении».

Вторым возможным механизмом является возникновение катодных пятен на бывшем аноде. Для этого на поверхности бывшего анода должны быть локально созданы условия электронной эмиссии:

- термо-электронная эмиссия, если имеются очень разогретые точки, что происходит в случае, когда анод содержит тугоплавкий металл (W);
- эмиссия поля или комбинированная эмиссия Т.Ф., если электрическое поле на поверхности сильное в отдельных участках, характеризующихся большим коэффициентом интенсификации β .

Ранее отмечалось, что электрическое поле на поверхности бывшего анода возникает при больших значениях с момента подачи TVR, так как толщина пространства (оболочки) на этом этапе небольшая,

и становится меньше по мере повышения плотности ионов. В то же время бывший анод бомбардируют ионы, получившие ускорение в пространстве (оболочке) под действием TVR, что вызывает местный нагрев. Таким образом, вероятность появления катодных пятен на бывшем аноде тем больше, чем выше плотность ионов в остаточной плазме, что сопровождается повышением плотности нейтральных частиц, которые тормозят при столкновении быстрые ионы, испускаемые катодными пятнами, термализуют их (средняя энергия, близкая к температуре плазмы) и замедляют их диффузию в момент прохождения тока через нуль.

Если плотность плазмы в момент прохождения тока через нуль достаточно низкая, возможно создание условий успешного отключения: ток отключается, и в пространстве между контактами выдерживается восстанавливающееся напряжение до выхода его на пиковое значение. Однако, в отношении вакуумных выключателей нельзя говорить о полном обеспечении успешного отключения, когда этот этап преодолен. В действительности, в течение нескольких миллисекунд после отключения внутри выключателя продолжают происходить изменения, и может возникнуть пробой диэлектрика:

- частицы, генерированные во время фазы электрической дуги, могут отделяться от стенок под действием вибрации и/или электростатических сил;
- в зонах оплавления контактов могут выделяться капли металла под действием электростатических сил;
- застывание жидкого металла может вызвать изменения на поверхности контакта или высвободить растворенный газ.

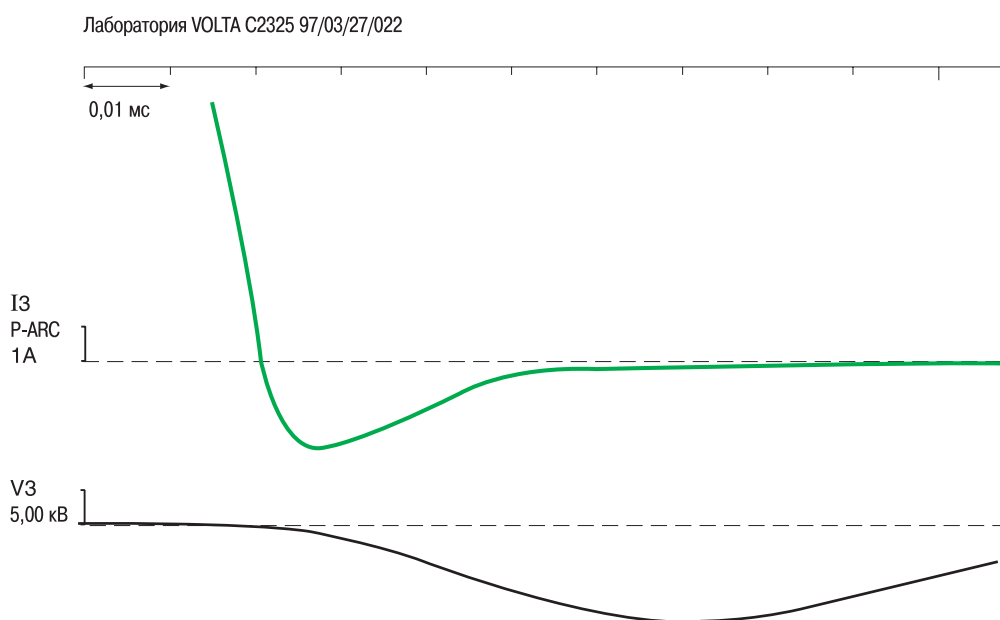


Рис. 8 : Послеразрядный ток особо большой продолжительности, примерно 40 мкс, испытание на предельную отключающую способность выключателя

Также случается, что когда вакуумный выключатель прошел испытание на предельную отключающую способность, после, казалось бы, успешного отключения, часто наблюдается запоздалый пробой диэлектрика (см. **рис. 9**), который может представлять собой:

- неустойчивое повреждение (продолжительностью несколько микросекунд), так как выключатель отключает ток высокой частоты, возникающий в результате разряда. Если неустойчивый пробой происходит в течение более четверти периода промышленной частоты

после прохождения тока через нуль, то это повреждение квалифицируется как неустойчивый пробивной разряд (NSDD) и объясняется недостаточным запасом прочности устройства (в связи с этим в соответствии со стандартом МЭК 60056 максимально допустимое количество NSDD за полную серию испытаний выключателя на отключающую способность составляет три пробоя);

- полный разряд, и в этом случае вновь возникает ток промышленной частоты после более или менее продолжительного периода отключения (порядка 0,1 - 1 мс).

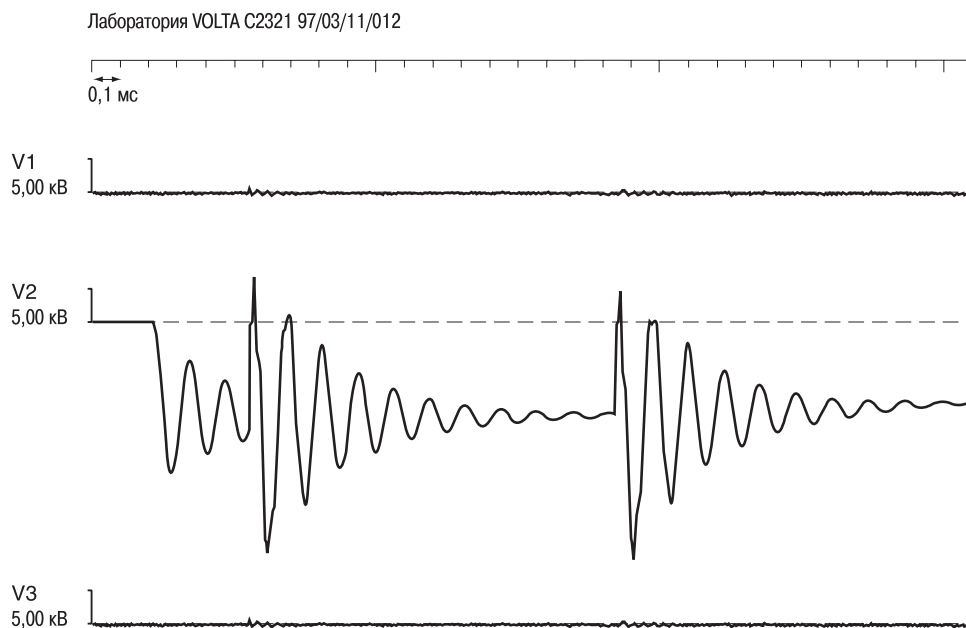


Рис. 9 : Пример запоздалого пробоя диэлектрика

2.4. Практическая разработка вакуумных выключателей

Выбор технологии отключения

В предыдущем разделе рассматривались необходимые условия успешного отключения. Эти условия практически всегда объединяются, если электрическая дуга остается в режиме рассеивания; это относится к отключению тока, не превышающего нескольких килоампер. Таким образом, для данных условий используются выключатели и контакторы с очень простыми торцевыми контактами. Когда дуга переходит в сфокусированный режим, энергия рассеивается на меньшей поверхности электрода и вызывает местный нагрев и значительное испарение. Если эта дуга остается неподвижной, отключение больше не обеспечивается.

Для преодоления сложностей, вызванных переходом электрической дуги в сфокусированный режим, используются два метода.

- Первый метод заключается в создании быстрого кругового движения сфокусированной дуги, чтобы энергия распределялась на большей части контакта, и нагрев

оставался ограниченным во всех точках: это достигается путем приложения радиального магнитного поля в зоне дуги.

- Второй метод состоит в том, чтобы предотвратить переход дуги в сфокусированный режим путем приложения аксиального магнитного поля: когда напряженность поля достигает значительной величины, дуга стабилизируется в режиме, определяемом как столб рассеивания, и не фокусируется, несмотря на то, что неподвижная дуга использует большую часть поверхности контактов, и нагрев в этом случае также остается ограниченным.

- Метод создания радиального поля →
Сфокусированную дугу можно сравнить с проводом, проводящим ток в направлении, параллельном оси контактов. Если к этому проводу приложено радиальное магнитное поле, то равнодействующая электромагнитная сила будет иметь азимутальное

направление и создаст вращение дуги вокруг оси контактов.

→
Поле B_r создается прохождением тока через контакты. Для достижения этого результата используются контакты двух конструктивных типов (см. рис. 10):

- контакты типа «спираль»;
- контакты в разрезе типа «колпачок» или «контрейт».

Обеспечение хорошей работы выключателей с радиальным полем обусловлено достижением приемлемой геометрии контактов и, в частности, ширины пазов для контактов типа «спираль»:

- если ширина пазов слишком большая, то дуга с трудом делает «скачок» с одной части контакта на другую, что может привести к тому, что дуга останется неподвижной в конце пути движения, и в результате произойдет перегрев части контакта (так как дуга окажется в сфокусированном режиме);

- если ширина недостаточная, паз может быть забит оплавленным материалом контакта, и из-за изменения в связи с этим пути прохождения тока радиальное поле исчезает, и дуга становится неподвижной. Будучи подвижной, вращающаяся дуга остается сфокусированной и, таким образом, оказывает энергетическое действие на часть электрода, который ее поддерживает, высокое давление в основании дуги вызывает выброс расплавленного материала контакта в виде капель. Этот процесс является эффективным средством ограничения нагрева остальной части электрода (или упрощения его охлаждения), поскольку

энергия дуги выносится вместе с расплавленным материалом, который конденсируется на окружающих стенках; в то же время этот процесс вызывает весьма значительную эрозию контактов.

→
■ Метод создания аксиального поля B_a
Когда плазма электрической дуги находится под действием достаточно сильного аксиального магнитного поля, электроны начинают двигаться по траекториям, идущим параллельно линиям поля, которые образуют спираль → вокруг оси, параллельной оси контактов, так как поле B_a действует в сочетании с азимутальным полем, созданным собственно током.

Положительные ионы плазмы, которые являются значительно более тяжелыми, не контролируются столь эффективно полем, но удерживаются электростатической силой, которая создается отрицательным пространственным зарядом электронов, улавливаемых аксиальным полем: под действием этой электростатической силы плазма остается в целом нейтральной. В результате удержание электронов переходит в удержание всей плазмы в столбе, соответствующем силовой трубке поля, принимаемой катодом: если эта трубка параллельна оси электродов, то основная часть плазмы, созданной катодом, поступает на анод. В этих условиях электрическая дуга сохраняет характеристики, присущие режиму рассеивания, но при значительно более высоком уровне плотности потока;

- напряжение дуги остается умеренным, так как плазма сохраняет свою нейтральность до подхода к аноду (явления «нехватки» ионов не наблюдается);

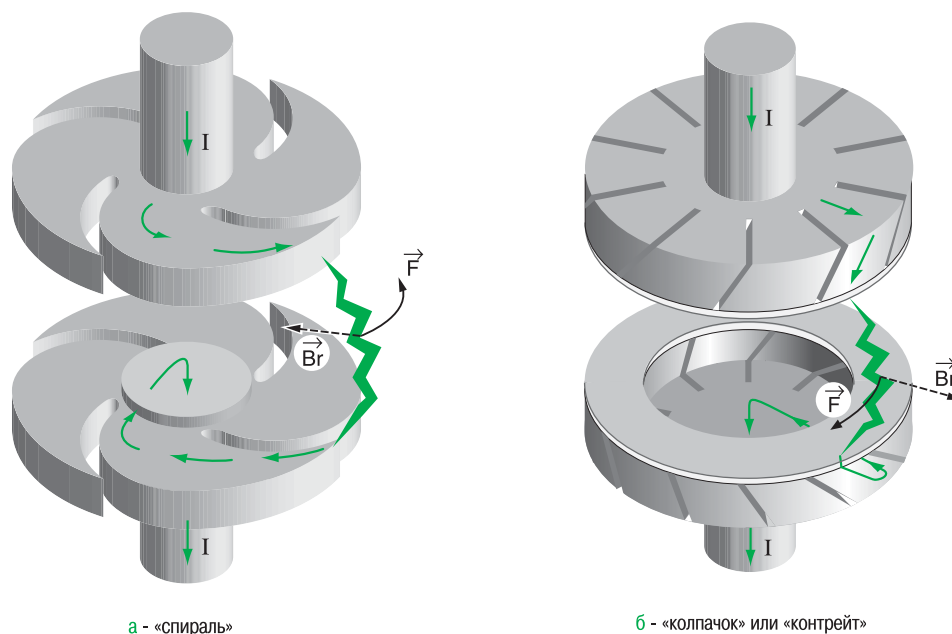


Рис. 10 : Конструкция контактов, используемых для создания радиального поля («спираль» и «контрейт»)

□ на стремление к фокусировке дуги со стороны анода под действием эффекта Холла оказывает влияние аксиальное поле, заставляя электроны сохранять в основном параллельную оси траекторию;

□ если поверхность электродов и, в частности, анода, находящаяся под воздействием столба электрической дуги, является достаточной для прохождения тока, то плотность энергии и, соответственно, нагрев остаются ограниченными. Испарение материала контакта достаточно мало, для того чтобы природа плазмы не изменилась в результате ионизации нейтральных частиц. Необходимы два основных условия, чтобы дуга осталась в режиме столба рассеивания, благоприятном для отключения:

→
□ Поле V_a должно быть достаточно сильным. Критическая напряженность аксиального поля, необходимая для предотвращения образования анодного пятна, вычисляется по экспериментально полученной формуле:

$$V_{a_{\text{crit}}} = 3,9 (I_p - 10)$$

(V_a в мТ, где I_p – пиковое значение тока в кА);

□ поверхность электрода должна быть достаточной для заданного значения тока: предельная плотность тока составляет порядка 17 А/мм^2 (формула Рентца). Фактически, этот предел плотности потока действителен только в первом приближении, и отключающая способность выключателей с аксиальным полем не изменяется прямо пропорционально поверхности контактов. В действительности, следует учитывать первоначальную сфокусированную дугу, образованную при размыкании контактов, и время, необходимое на то, чтобы дуга заняла всю свободную поверхность электродов: отключающая способность в зависимости от диаметра контактов изменяется примерно по $d^{1,4}$. Дуга в выключателе с аксиальным полем значительно менее подвижна, чем в выключателе с радиальным полем. Даже если плотность тока достаточно высокая,

чтобы вызвать плавление материала анода, выбросы остаются ограниченными. Как следствие, эрозия контактов меньше, чем при радиальном поле, но при этом расплавленный материал остается на месте и замедляет охлаждение поверхности электрода. В связи с этим, несмотря на то, что в принципе использование свободной поверхности контакта представляется более эффективным в аксиальном поле, чем в радиальном, это не всегда подтверждается и, в частности, для тока большой силы и при слабом напряжении можно добиться в радиальном поле более высокой отключающей способности для данной поверхности, хотя и за счет создания значительной эрозии.

Существуют различные способы создания аксиального поля между контактами, используя ток отключения:

□ витки обмотки, расположенные за контактами (см. **рис. 11**);

□ магнитопровод для прохождения азимутального поля, созданного подводами тока и для выпрямления в аксиальное поле в зоне между контактами;

□ витки обмотки с внешней стороны колбы выключателя, охватывающий зону между контактами (см. **рис. 12**). В целом, путь, который проходит ток для создания аксиального поля достаточной силы в пространстве между контактами, длиннее пути, необходимого, чтобы создать локальное радиальное поле. Таким образом, для заданного объема сопротивление контактов меньше в случае создания радиального поля, что является преимуществом при использовании выключателей большого номинала.

Напротив, части контактов в радиальном поле более подвержены воздействию, чем контакты в аксиальном поле и, следовательно, их использование представляется менее предпочтительным с точки зрения учета диэлектрических свойств; то есть аксиальное поле дает больше преимуществ, в случае применения при высоких напряжениях.

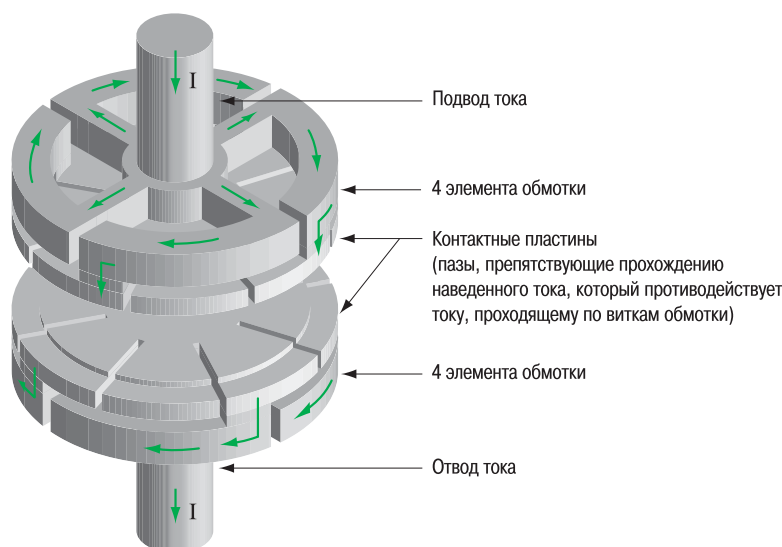


Рис. 11 : Пример контактов в аксиальном магнитном поле

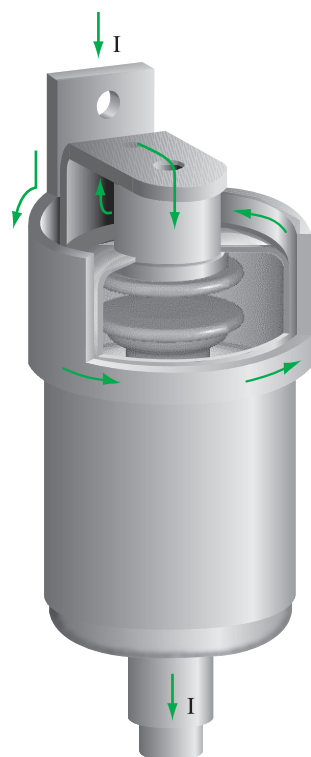


Рис. 12 : Выключатель с аксиальным магнитным полем, имеющий внешнюю обмотку

Таким образом, разработчик выбирает одну или другую технологию в зависимости от преимуществ для конкретного вида применения (см. **рис. 13**).

Выбор конструкции

■ Конструкция вакуумного выключателя
Вакуумный выключатель состоит из следующих компонентов (см. рис. 14).

На данном рисунке представлены:

□ два узла торцевых электрических контактов (так как в вакууме скользящие контакты приварились бы друг к другу); один контакт неподвижный, другой подвижный. В каждом контактном узле есть цилиндрический электрод, проводящий ток к контактным пластинам;

Характеристики:	Условия создания радиального поля	Условия создания аксиального поля
Постоянный ток большой силы	+++	+
Номинальное высокое напряж.	+	+++
Электрическая прочность	+	+++
Отключающая способность	++	++

Усл. обозначения: +++ = очень хорошо, ++ = хорошо, + = посредственно

Рис. 13

□ герметичный корпус с изолятором, обеспечивающим электрическую изоляцию между подвижным и неподвижным контактами;

□ экран, защищающий внутреннюю поверхность изолятора от конденсации паров металла, создаваемых электрической дугой;

□ металлический сильфон, обеспечивающий движение подвижного контакта без нарушения герметичности корпуса.

Речь идет об основных компонентах любого выключателя. Кроме того, в корпусе автоматических выключателей устанавливаются устройства, создающие магнитное поле (радиальное или аксиальное), необходимое для отключения мощной дуги.

Поэтому выбор конструкции выключателя касается, в основном, выбора экрана и устройств создания магнитного поля.

■ Конструкция экрана

При выборе экрана, главным образом, учитывается:

□ способ крепления, который определяет потенциал экрана: потенциал является неподвижным (при неподвижном электроде), если экран подсоединен к этому выводу выключателя, или плавающим, если экран закреплен в промежуточной точке изолятора без электрического соединения с одним или с другим контактом.

□ положение экрана внутри или снаружи корпуса выключателя (в последнем случае экран является частью корпуса и должен быть герметичным).

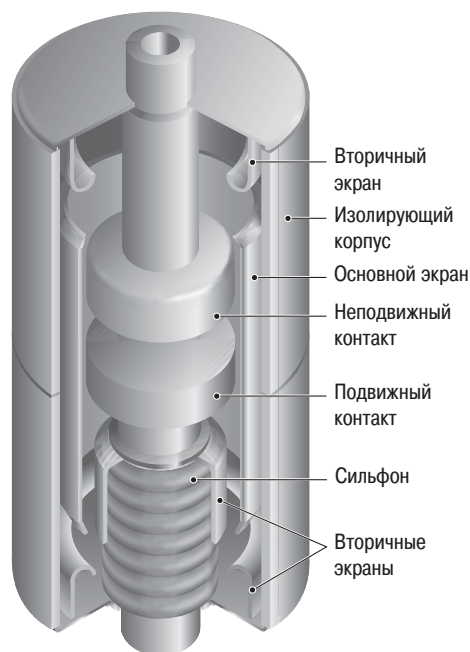


Рис. 14 : Конструкция вакуумного выключателя

Сочетание этих различных компонентов конструкции позволяет получить четыре возможных варианта конфигурации, которые все могут быть использованы в соответствии с выбранными характеристиками.

Обычно используются:

□ экран с неподвижным потенциалом, если нужен недорогой выключатель, и экран с плавающим потенциалом, когда необходимо обеспечить высокие рабочие характеристики;

□ внешний экран, если требуется компактный выключатель с небольшим диаметром, и внутренний экран – для простоты исполнения.

■ Устройства создания радиального или аксиального поля

Устройства, создающие радиальное поле, необходимое для вращения дуги, должны располагаться как можно ближе к дуге: поэтому эти устройства интегрируются непосредственно в конструкцию контактов внутри корпуса выключателя. В предыдущем разделе были описаны два наиболее распространенных варианта конструкции: это контакты типа «спираль» и типа «колпачок» или «контрейт». Выбор одного или другого варианта не изменяет конструкцию выключателя в целом.

Что касается выключателей с использованием аксиального поля, то здесь есть выбор между двумя типами архитектуры.

В действительности, устройство, создающее аксиальное поле (чаще всего это кольцевые витки обмотки вокруг оси, параллельной оси выключателя), может интегрироваться в конструкцию внутренних контактов, как в выключателях с радиальным полем, либо располагаться снаружи выключателя. В последнем случае речь идет об обмотке вокруг зоны размыкания контактов. Витки обмотки соединены последовательно с неподвижным контактом, и по ним проходит ток цепи. На **рисунке 15** представлена подобная конфигурация: следует отметить, что для уменьшения мощности, рассеиваемой в устройстве, обмотка состоит из трех соединенных параллельно элементов. Одним из недостатков этой конструкции является длина пути прохождения тока, чтобы создать аксиальное поле достаточной силы в большом объеме. В результате возникают значительные потери, которые, впрочем, не вызывают в обязательном порядке большой нагрев, поскольку витки обмотки в воздухе охлаждаются лучше (путем конвекции), чем витки, встроенные в контакты выключателей.

Однако, наличие обмотки с потенциалом неподвижного контакта вокруг контактов выключателя, практически, ограничивает выбор для этого типа выключателей вариантом, имеющим экран с неподвижным потенциалом.

Можно было бы предположить, что наличие внешней обмотки является недостатком в смысле увеличения размеров выключателя за счет внешнего диаметра. В действительности, возможность использовать всю поверхность контактов, на которую действует относительно однородное аксиальное поле, создаваемое внешней обмоткой (а такой вариант не используется для контактов, имеющих встроенные витки) компенсирует этот недостаток, и размеры этих типов выключателей сходные.

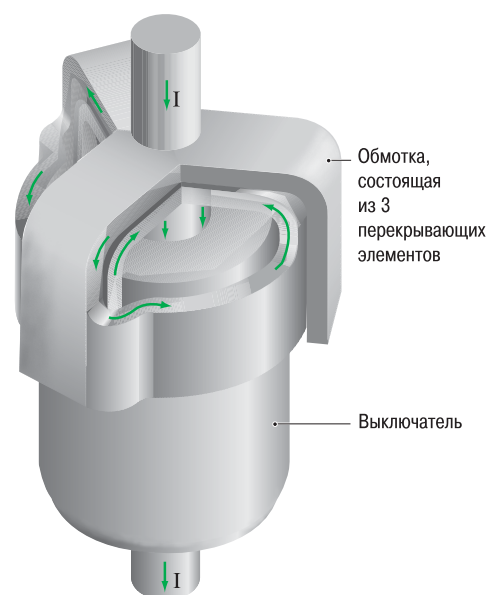


Рис. 15 : Пример обмотки, окружающей зону размыкания контактов, образованной тремя соединенными параллельно элементами

Основным преимуществом устройства для создания аксиального поля в виде внешней обмотки является возможность реализации компактного, простого и, следовательно, экономичного выключателя. Однако, недостатки, существующие в плане нагрева и прочности диэлектрика (в связи с использованием конструкции с неподвижным экраном), заставляют делать выбор в пользу устройств, встроенных в контакты (для создания аксиального или радиального поля) при высоком уровне напряжения (≥ 24 кВ) или номинальном токе большой силы (≥ 3150 А).

Выбор материалов и технологии производства

■ Выбор материалов и технологии производства вакуумных выключателей определяется следующими требованиями:

- обеспечение поддержания высокого вакуума ($< 10^{-3}$ мбар), необходимого для работы выключателя в течение его срока службы (30 лет);
- обеспечение устойчивости номинальных характеристик и, в частности, отключающей способности.

■ Выбор устройств, связанный с требованиями к качеству вакуума:

Любая оболочка в вакууме подвергается снижению уровня создаваемого вакуума, что связано с явлениями дегазации, возникающими, когда давление достигает достаточно низких значений.

Дегазация проявляется, прежде всего, на поверхности, что соответствует отделению молекул газа, поглощаемых стенками. Этот газ довольно легко и быстро удаляется под воздействием относительно умеренного нагрева (порядка 200 °С) стенок оболочки во время откатки.

Затем происходит объемная дегазация, соответствующая рассеянию в направлении поверхности металла, растворенного газа, например, водорода.

Чтобы избежать того, когда при дегазации, вызванном, в основном, массивными деталями, постепенно снижается уровень вакуума в колбе выключателя, важно следующее:

- использовать материалы с возможно наиболее низким содержанием газа (например, медь Cu-OFE без кислорода);

- производить высокую дегазацию этих материалов путем длительной откачки из колбы выключателя при достаточно высокой температуре (обычно в течение десяти часов при температуре примерно 500 °C).

Газ, связанный с металлом (в виде химических соединений) не чувствителен к дегазации, напротив, может высвобождаться под действием электрической дуги. Следовательно, необходимо, чтобы материалы, используемые для изготовления дугогасительных контактов, выработывались в вакууме для обеспечения возможно наиболее низкой концентрации газа.

Корпус выключателя должен быть полностью герметичным, чтобы избежать утечек и проницаемости в условиях эксплуатации. Для этого корпус выключателя изготавливается из металлических и керамических материалов: изоляторы из глиноземистой керамики вытеснили стеклянные, так как могут выдерживать более высокую температуру и, таким образом, обеспечивают лучшую дегазацию.

Соединение металлических частей корпуса выполняется с помощью сварки или высокотемпературной пайки.

Соединение керамики с металлом также осуществляется путем высокотемпературной пайки либо с помощью реактивной пайки, обеспечивающей непосредственное соединение с керамикой, или путем обычной пайки с предварительной металлизацией керамического материала (Mo-Mn + Ni).

Конечные операции пайки выполняются в печи в условиях вакуума для обеспечения дегазации материала. Все чаще спайка корпуса колбы выполняется также во время операции вакуумной пайки, что позволяет не производить операцию откачки.

С учетом требуемого уровня герметичности, чтобы обеспечить движение подвижного контакта, применяется одна технология - металлический сильфон. Как правило используется сильфон из аустенитной нержавеющей стали малой толщины (обычно 0,1 – 0,2 мм).

Методы присоединения сильфона и спаяных соединений к колбе должны быть тщательно изучены, чтобы обеспечить высокую механическую износостойкость, несмотря на неблагоприятное действие температурных циклов при операциях пайки.

Наконец, следует указать материалы, которые используются в малых количествах, но играют важную роль для создания и поддержания во времени высокого вакуума. Это газопоглощающие материалы (getterы) на основе металла (барий, цирконий, титан и т.д.), проявляющие высокую химическую активность в отношении большинства газов, используемых в корпусах вакуумных устройств. Getterы активируются в высоком вакууме под действием нагрева до температуры, достаточной для того, чтобы вызвать диффузию поверхностного пассивированного слоя в массу и

регенерацию активной металлической поверхности, способной поглощать молекулы газа, присутствующие в выключателе. Эта операция активации выполняется при откачке или при спайке корпуса выключателя путем пайки в вакууме; следует отметить, что именно благодаря использованию getterов удалось разработать этот последний метод, который является более технологичным по сравнению с откачкой, при том, что обеспечивается удовлетворительное качество вакуума.

■ Выбор контактного материала

Хороший контактный материал для вакуумного выключателя должен соответствовать определенным требованиям:

- быть хорошим проводником электричества, чтобы обеспечивать малое переходное сопротивление контакта;
- иметь хорошую механическую стойкость к повторяющимся ударам, которые испытывают контакты при замыкании;

- не образовывать твердых сварных соединений в случае включения под нагрузкой или при коротком замыкании, чтобы механизм отключения размыкал контакты, и чтобы разрыв цепи в зоне сварного соединения не вызывал дополнительного повреждения поверхности контактов;

- выделять малое количество паров металла во время фазы электрической дуги, чтобы обеспечить быстрое восстановление электрической прочности промежутка между контактами после отключения, для чего необходимо:

- более высокое давление паров;

- ограниченное выделение капель в фазе плавления материала;

- представлять хорошие диэлектрические характеристики во время фазы подачи напряжения TVR, для чего необходимо:

- иметь достаточно гладкую поверхность, без заметных шероховатостей (при низком показателе β);

- не иметь точек перегрева, создающих термоэлектронную эмиссию (в случае использования тугоплавких материалов, имеющих пониженную теплопроводность);

- не иметь свойства образовывать легко отделяемые частицы;

- обеспечивать поддержание устойчивых катодных пятен до момента, когда ток достигнет малых значений, чтобы минимизировать действие обрыва тока и перенапряжения, связанные с этим явлением, что создает, в частности, достаточно высокое давление пара.

Но порой эти многочисленные нужные качества оказываются противоречивыми. Поэтому необходимо находить приемлемый компромисс для конкретного вида применения в соответствии с выбором приоритетных свойств, а именно:

- для автоматических выключателей – восстановление электрической прочности диэлектрика после окончания периода горения дуги тока большой силы (хорошая отключающая способность);

- для контакторов – слабая эрозия и минимальный обрыв тока (электрическая износостойкость и уменьшение перенапряжений);

- для выключателей нагрузки – стойкость при сварке и электрическая прочность под действием повышенного напряжения (отсутствие повторного пробоя).

В настоящее время наибольший компромисс достигается при использовании композитов, и наиболее широко применяются следующие три группы материалов:

- для автоматических выключателей - CuCr;
- для контакторов – AgWC;
- для выключателей нагрузки и, в частности, для выключателей нагрузки, предназначенных для управления конденсаторами при повышенном напряжении – WCu. Композиты семейства CuCr зарекомендовали себя как лучшие материалы для автоматических выключателей и, похоже, в ближайшее время не будут вытеснены какими-либо другими материалами, несмотря на то, что исследования и разработки в этой области продолжаются. Используемые пропорции составляют 50 – 80 % для меди, остальной процент – для хрома. Высокое содержание меди благоприятно влияет на удельную электрическую проводимость (низкое переходное сопротивление контакта) и на удельную теплопроводность (хороший отвод энергии дуги). Высокое содержание хрома благоприятно влияет на стойкость при сварке и электрическую прочность под действием повышенного напряжения.

Содержание газа в контактном материале должно быть как можно более низким, так как при плавлении или испарении материала газ выделяется в пространство между контактами и препятствует отключению. Продолжительное действие в вакууме оказывается более благоприятным, чем предполагалось, поскольку хром, который конденсируется на стенках колбы выключателя, играет роль газопоглощающего материала и тем самым поглощает газ.

Наконец, следует отметить, что действие электрической дуги изменяет поверхностный слой материала и повышает его качества за счет:

- удаления с поверхности газовых включений и окислов;
- получения очень тонкого гранулометрического состава (оседание расплавленного хрома на матрице меди);
- гомогенизация материала.

Это действие иногда называют «кондиционированием по току» (по аналогии с «кондиционированием по напряжению» или формированием напряжения пробоя в соответствии с требованиями): в целом работа контактов и отключающая способность улучшаются после нескольких отключений.

3. Отключение в вакууме и возникновение перенапряжений в случае управления индуктивными цепями

Устройства отключения в вакууме (контакты, автоматические выключатели, выключатели нагрузки) способны вызывать перенапряжения при отключении индуктивных цепей (ненагруженные трансформаторы, двигатели без нагрузки или в фазе пуска). В силу особых свойств вакуума эти перенапряжения по своему характеру могут отличаться от перенапряжений, создаваемых в тех

же условиях устройствами отключения, в которых используется другая среда (воздух, элегаз, масло и т.д.). В целом, такие перенапряжения не создают проблем и не требуют принятия каких-то особых мер. Однако, для чувствительных электроприемников, например двигателей, рекомендуется использовать ограничители перенапряжений.

3.1. Явления, вызывающие перенапряжения

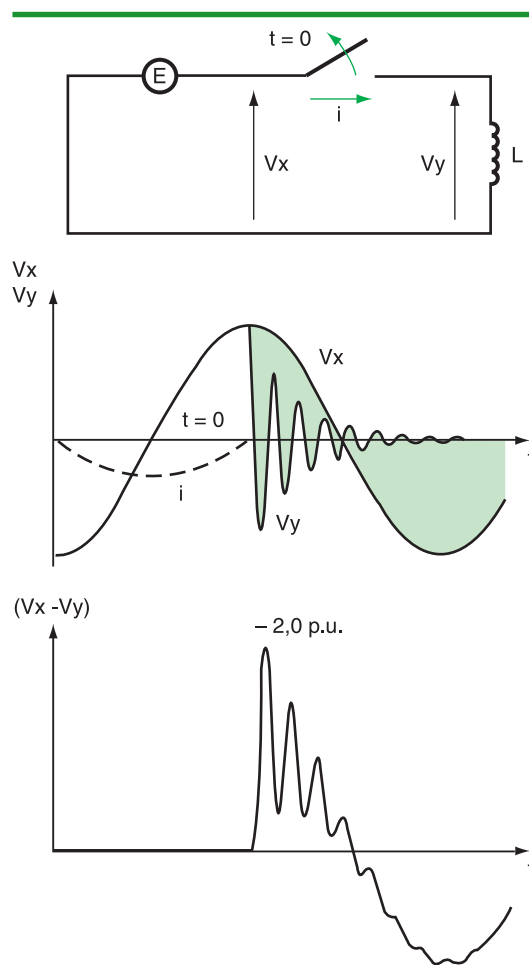
Перенапряжения при отключении в идеальных условиях

Даже если рассматривать теоретический случай совершенного отключения идеальным выключателем, определенный уровень перенапряжений возникает при отключении тока в индуктивной цепи. В действительности, значения напряжения на выходах различных элементов цепи должны достигать нового состояния равновесия, соответствующего состоянию отключения. Переходный режим относительно включенного состояния, предшествующего моменту отключения (прохождение тока через нуль) вызывает колебания вокруг нового состояния равновесия и создает перенапряжения по отношению к максимальному нормальному напряжению сети (см. рис. 16).

При трехфазном отключении в силу того, что отключение не производится одновременно по трем фазам, дополнительно возникает переходный режим, создающий перенапряжения. Например, в случае отключения тока короткого замыкания в сети без глухозаземленной нейтрали восстанавливающееся напряжение на выводах первого полюса отключения достигает примерно 2,1 – 2,2 р.у. (напряжение TVR в соответствии со стандартом МЭК) и 2,5 р.у. при отключении конденсаторной батареи с изолированной нейтралью.

Обрыв тока

Это явление, наиболее известное и наиболее распространенное, которое встречается во всех технологиях отключения, называется обрывом тока: преждевременное прерывание переменного тока перед его естественным прохождением через нуль. Это явление возникает, прежде всего, в автоматических выключателях, которые рассчитаны на отключение тока короткого замыкания при прерывании слабых токов. Если I_a является величиной тока обрыва, то есть тока, циркулирующего в индуктивной нагрузке L непосредственно перед отключением, то электромагнитная энергия, накопленная в нагрузке, передается в виде энергии электростатического поля в емкость C , расположенную на выводах нагрузки ($1/2 L I_a^2 = 1/2 C V^2$). Происходит повышение напряжения со стороны нагрузки, которое усиливает отклонение от состояния равновесия «цепь разомкнута» и увеличивает перенапряжения, связанные с отключением (см. рис. 17).



1 р.у. = максимальное номинальное напряжение между фазой и корпусом

$$= \frac{U_n \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Рис. 16 : Характеристика перенапряжений относительно максимального нормального напряжения сети при отключении индуктивной цепи

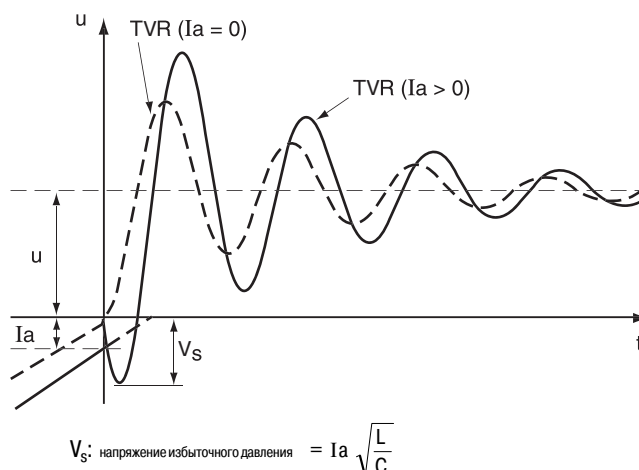


Рис. 17 : Перенапряжения, связанные с отключением цепи с обрывом тока

Таким образом, эти перенапряжения пропорциональны току обрыва и характеристическому сопротивлению

(полное сопротивление) $\sqrt{\frac{L}{C}}$ нагрузки.

В случае отключения в вакууме обрыв тока соответствует преждевременному погасанию последнего катодного пятна по причине его неустойчивости при слабом токе: эта характеристика зависит, в основном, от природы контактного материала. В таблице (см. **рис 18**) указаны средние значения тока обрыва для нескольких обычно используемых материалов.

На практике, при значениях тока обрыва в несколько ампер, характерных для материала CuCr, никаких проблем с оборудованием не возникает. Напротив, при использовании чистой меди ток обрыва достигает повышенных значений, что, наряду с другими факторами, подтверждает невозможность применения материала такого состава.

Многократное предварительное или повторное зажигание

Между контактами происходит зажигание дуги, когда приложенное напряжение превышает электрическую прочность промежутка. Это явление неизбежно, если этот промежуток очень маленький (в конце включения и в начале отключения).

Таким образом, предварительное зажигание при включении происходит систематически, если коммутационная операция выполняется под напряжением: временной интервал между предварительным зажиганием и моментом, когда контакты соприкасаются (время тлеющего разряда перед зажиганием дуги) зависит от скорости включения и величины напряжения, приложенного в момент сближения контактов.

Повторное зажигание при отключении возникает только тогда, когда время дуги (временной интервал между размыканием контактов и отключением тока) мало: в этом случае промежуток между контактами достаточный, чтобы выдержать напряжение TVR, и происходит повторный пробой диэлектрика.

Материал	Средний ток обрыва	Макс. ток обрыва
Cu	15	21
CuCr	4	8
AgWC	1	1,1

Рис. 18 : Средние значения тока обрыва для нескольких обычно используемых материалов (Cu, CuCr, AgWC)

При предварительном или повторном зажигании колебательный разряд сосредоточенных емкостей вызывает ток высокой частоты (HF) (порядка десятков кГц), проходящий между контактами, с наложением на ток промышленной частоты, который устанавливается постепенно (так как до зажигания был нулевым). Эти явления неизбежны и характерны для всех типов выключателей. Особенностью вакуумных выключателей является их способность отключать ток HF, вызванный зажиганием, тогда как с помощью других типов выключателей, в целом, не представляется возможным произвести такое отключение по причине большой зависимости di/dt в момент прохождения тока через нуль.

В результате отключения тока HF новое напряжение TVR создается между контактами, расстояние между которыми всего лишь немного изменилось, поскольку эти явления возникают за короткое время относительно продолжительности движения контактов, что вызывает, соответственно, новое зажигание и повторение тех же явлений (см. **рис. 19**). Происходит многократное последовательное зажигание, связанное с возникновением волн напряжения с амплитудой, изменяющейся в зависимости от изменения расстояния между контактами:

- при включении амплитуда последовательности перенапряжений линейно уменьшается до смыкания контактов;
- при отключении амплитуда возрастает, пока промежуток между контактами, наконец, не станет достаточным, чтобы выдерживать восстанавливающееся напряжение, которое, из-за возникновения скачка напряжения, всегда больше напряжения,

соответствующего нормальному отключению. Таким образом, последовательности перенапряжений с крутым фронтом, вызванные явлениями многократного зажигания, всегда ограничиваются стойкостью пространства между контактами, которое играет роль

разрядного промежутка. Однако это ограничение, в действительности, эффективно только при включении, и, наоборот, при отключении полученные значения могут быть повышенными (см. [рис. 20](#)).

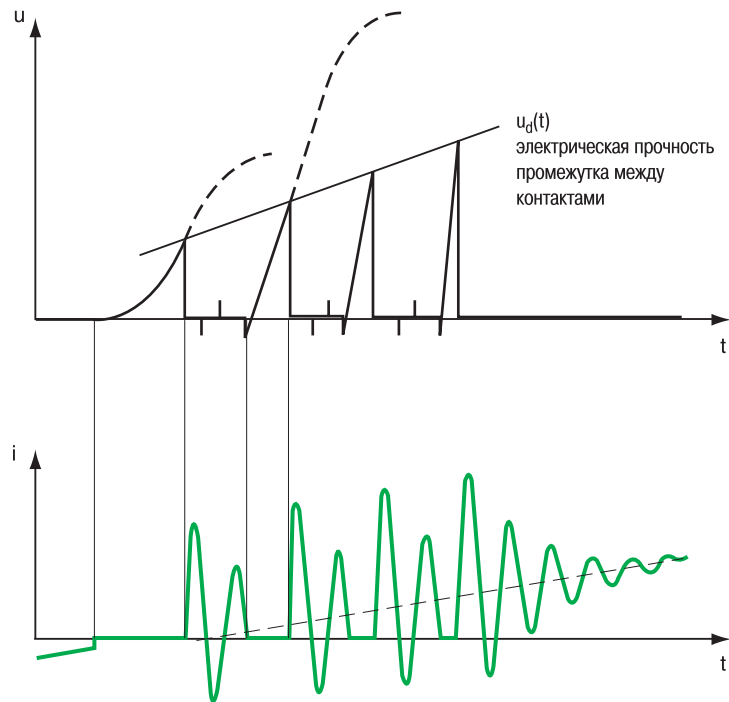


Рис. 19 : Последовательное многократное зажигание в зависимости от волн напряжения с изменяющейся амплитудой

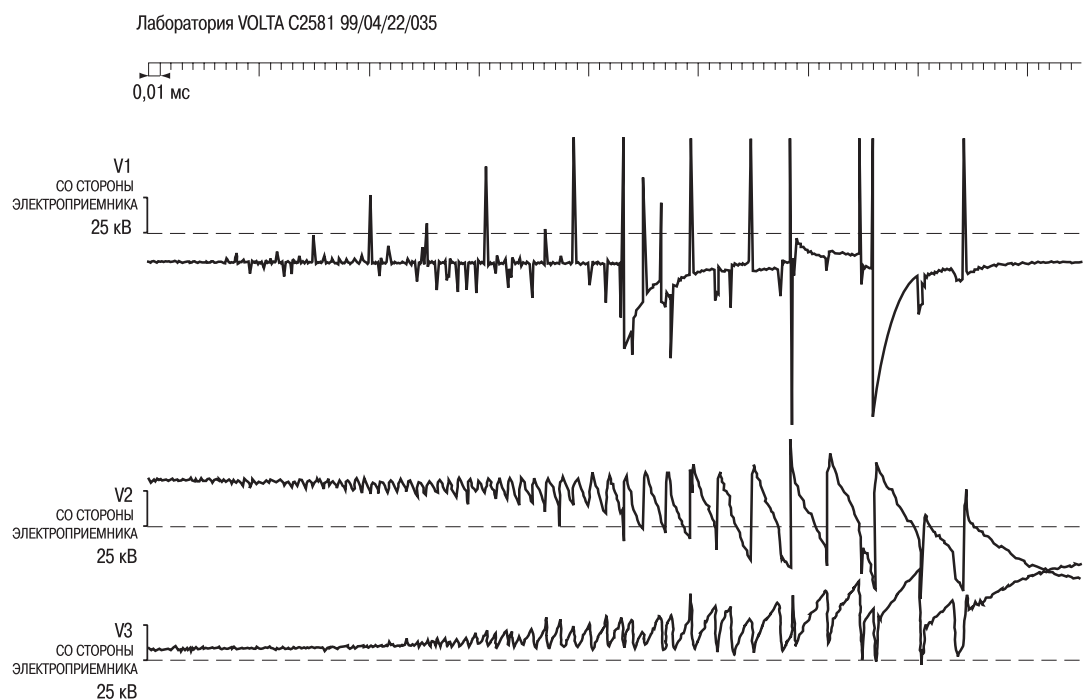


Рис. 20 : Явления многократного зажигания при размыкании контактов и отключении слабого индуктивного тока

Характеристики этих двух типов сходных явлений представлены в таблице на **рисунке 21**. Недостаток этих серий перенапряжений больше обусловлен их крутым фронтом, чем их амплитудой. В действительности, эти волны напряжения с кратким временем нарастания (порядка 0,2 – 0,5 мкс) не распределяются равномерно по обмоткам трансформаторов и двигателей, а воздействуют, в основном, на первые витки (см. **рис. 22**). В результате такие волны напряжения могут вызвать ухудшение состояния и ускоренное старение изоляции между этими витками.

Обрыв виртуального тока

В особых конфигурациях (редко встречающихся на практике), характеризующихся сильными емкостно-индуктивными связями между фазами цепи, явления многократного повторного зажигания в первой фазе, которая должна отключиться, вызывают не только заметные колебания тока HF в данной фазе, но также в соседних фазах, по которым в этот момент еще проходит ток довольно значительной силы, так как является удаленным от естественного нуля.

Если индуктивный ток HF достигнет амплитуды того же порядка, что и ток промышленной частоты, возникнет нуль тока («искусственный», но реальный, а не виртуальный...). Выключатель может сработать, чтобы отключить ток до его прохождения через естественный нуль. В подобных случаях значение тока обрыва вычисляется в десятках, даже в сотнях ампер, а связанные с током перенапряжения очень высоки. Предлагаемое решение вопроса состоит в том, чтобы сдвинуть заранее отключение одного из полюсов выключателя таким образом, что в течение временного интервала, когда может происходить многократное повторное зажигание, две другие фазы оставались еще включенными и, соответственно, нечувствительными к

наведенным помехам. На практике такое решение не применялось в силу проблем, которые оно создает (неравномерно распределение нагрузки между полюсами при отключении тока короткого замыкания), и исключительного характера явления.

Тип многократного зажигания	Периодичность	Амплитуда перенапряжений
Предварительное зажигание при включении	Систематически	Низкая
Повторное зажигание при отключении	Случайно	Высокая

Рис. 21 : Характеристики перенапряжения, связанные с явлением многократного зажигания

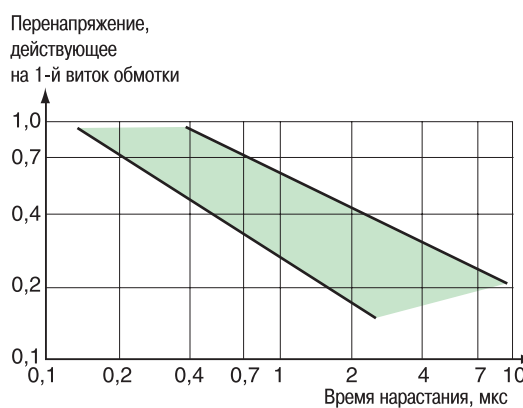


Рис. 22 : Процентное отношение величины перенапряжения, действующего на первый виток обмотки, к времени его нарастания

3.2. Меры защиты от перенапряжения

«Мягкие» контактные материалы

Контактные материалы (например, AgWC, CuBi), имеющие очень низкое значение тока обрыва, были разработаны для производства контакторов. Эта характеристика была получена в результате сочетания низкой удельной теплопроводности и высокого давления пара, чтобы создать устойчивые катодные пятна даже при очень малых значениях тока.

Эти характеристики противостоят отключающей способности: что приемлемо для контакторов, не подходит для автоматических выключателей. Кроме того, использование этих материалов представляется эффективным только для того, чтобы уменьшить перенапряжения, связанные с возникновением тока обрыва, который на практике не создает проблем, если не превышает нескольких ампер (как в случае с применением CuCr). Использование «мягких» контактных материалов не дает какого-либо улучшения по сравнению с обычными «твердыми» материалами (CuCr) в отношении явления многократного зажигания. В действительности, эти материалы также способны отключать ток, имеющий большое значение di/dt и характеризующийся меньшей

скоростью восстановления электрической прочности диэлектрика после размыкания контактов (см. **рис. 23**). В результате, последовательность перенапряжений с крутым фронтом не устраняется, а, напротив, имеет тенденцию сохраняться дольше, чем в случае использования материала, более эффективного при отключении.

Синхронизированное отключение

В качестве теоретического решения задачи устранения этих явлений многократного повторного зажигания можно было бы предложить осуществлять управление моментом размыкания контактов относительно волны тока, чтобы предотвратить кратковременное возникновение дуги. На практике в связи с этим возникают сложные проблемы обеспечения надежности по времени срабатывания механизма управления, тем более что такой вариант используется только в области очень высоких напряжений, когда эффект, который дает защита от коммутационных перенапряжений, оправдывает дополнительные расходы на оборудование. В области среднего напряжения более экономично применять устройства защиты от перенапряжений, когда требуется организовать защиту электроприемника.

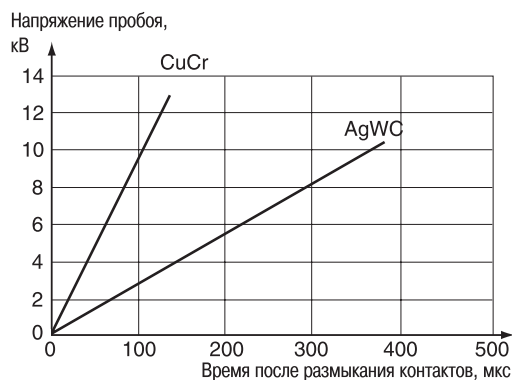


Рис. 23 : Изменение электрической прочности между контактами с момента их размыкания в зависимости от материала их изготовления

Устройства защиты, ограничивающие перенапряжения

Как указывалось выше, наиболее серьезное действие оказывает многократное зажигание, захватывая, главным образом, первые витки обмоток трансформатора или двигателя. Эти два типа электроприемников должны рассматриваться отдельно.

В действительности, трансформаторы рассчитаны на то, чтобы выдерживать механическое напряжение в диэлектрике, создаваемое грозовыми импульсами, которые являются перенапряжениями с крутым фронтом, и, таким образом, обеспечивают должный уровень изоляции первых витков обмотки. Однако, отключаемый индуктивный ток имеет малую силу (ненагруженный трансформатор), и связанное с ним перенапряжение остается ограниченным. Как правило, нет необходимости предусматривать какую-либо особую защиту трансформаторов, управляемых с помощью вакуумных выключателей, возможно, за исключением случаев применения сухих трансформаторов с массивным диэлектриком, более чувствительных, чем масляный трансформатор.

Двигатели имеют меньшую электрическую прочность, чем трансформаторы, тогда как отключаемый ток может быть большим (отключение в фазе пуска или блокировки ротора) и, соответственно, возникают серьезные перенапряжения. Как правило, рекомендуется устанавливать защиту на выводах двигателя независимо, какое устройство управления - контактор или автоматический выключатель - и какой контактный материал используются. В качестве защитных устройств могут применяться конденсаторы, уменьшающие крутизну фронта нарастания перенапряжения, резистивно-емкостные цепи (схемы RC) (обычно C порядка 0,1 – 0,5 мкФ и R – от 10 до 50 Ом) и/или разрядники ZnO.

4. Основные области применения отключения в вакууме

В таблице на **рисунке 24** указаны свойства вакуума, используемого в качестве среды отключения для электрооборудования.

Область применения	Характеристики	Преимущества	Недостатки
Отключающая способность	Очень быстрое восстановление электрической прочности	Отключение тока повреждения при больших значениях di/dt TVR	Отключение тока HF в случае повторного пробоя: создание перенапряжений, необходимость защиты в некоторых сетях
	Низкое напряжение (энергия) электрической дуги	Высокая электрическая износостойкость	Нет ограничивающего действия по низкому напряжению
	Способность произвести отключение даже без смещения контактов	Отключение тока в случае зажигания между разомкнутыми контактами (в какой-то степени компенсирует недостаточную надежность электрической прочности)	
Электрическая прочность	Зависит от состояния поверхности электродов и наличия частиц		Внутренняя электрическая прочность, ограниченная по высокому напряжению и изменяющаяся во времени
	Зависит от непосредственно предшествующей фазы дуги		Электрическая прочность после случайного отключения: риск повторного зажигания после емкостного отключения, если выключатель не адаптирован к применению
Прохождение тока	Некомпенсированные торцевые контакты		Необходимость создания большого давления нажатия контактов, чтобы предотвратить отталкивание под действием электромагнитной силы
	Контакты в вакууме	Постоянное переходное сопротивление контакта (нет окисления и нет ухудшения работы при отключении)	Тенденция к сраиванию при включении
	Те же контакты для отключения и прохождения установившегося тока		Большое переходное сопротивление контактов: значительное рассеяние тепла при больших номинальных значениях
Среда отключения	Вакуум $< 10^{-3}$ мбар	Отсутствуют продукты разложения, и нет воздействия на окружающую среду	Невозможность постоянного контроля состояния вакуума: для периодической проверки диэлектрика необходимо отключить оборудование

Рис. 24 : Свойства вакуума, используемого как среда отключения

Таким образом, преимущества и недостатки технологии отключения в вакууме обуславливают приоритетное использование этого метода в некоторых областях применения электрооборудования. Ниже дается описание различных видов применения, которые систематизированы следующим образом:

- по уровню напряжения;
- далее по функции или по типу коммутационной аппаратуры;
- наконец, по типу нагрузки, управление которой необходимо обеспечить.

Затем в данном разделе дается обзор видов применения по среднему напряжению

(СН: $1 < U < 52$ кВ) - среднее напряжение,
(НН: $U < 1$ кВ) - низкое напряжение,
(ВН: $U \geq 52$ кВ) - высокое напряжение.

Наиболее подробно рассматривается направление «СН», которое является основной областью применения технологии отключения в вакууме. Направления «НН» и «ВН» представлены более кратко, так как ограничения, присущие методу отключения в вакууме, позволяют использовать его только как крайний вариант: доминирующей технологией для сетей НН является разрыв дуги в воздухе, а для сетей ВН – отключение в элегазе.

4.1. Применение технологии отключения в вакууме в сетях среднего напряжения

Сети среднего напряжения используются, в основном, для распределения электрической энергии и представляют собой область применения между передачей энергии на большие расстояния, которая осуществляется по сетям высокого напряжения (ВН), и применением в сетях низкого напряжения (НН). Более низкие уровни напряжения области СН также используются для питания электроприемников очень большой единичной мощности области НН. Для сетей среднего напряжения основными типами используемой коммутационной аппаратуры являются выключатели нагрузки, разъединители, выключатели и контакторы (см. **рис. 25**).

Выключатели нагрузки представляют собой простые и относительно экономичные устройства, предназначенные для нормальной эксплуатации электрических сетей; они управляются по команде оператора и обеспечивают включение или отключение тока в каком-либо звене энергосистемы. Они способны отключать как нормальный ток в цепи, в которую они включены, так и установившийся ток повреждения в результате короткого замыкания, произошедшего ниже выключателей нагрузки относительно источника электроэнергии.

Выключатели нагрузки общего применения, предназначенные для распределительных сетей СН, в которых частота коммутационных операций низкая, конструктивно имеют достаточно ограниченную электрическую и механическую износостойкость, обычно:

- сто отключений при I_n ;
- тысяча механических переключений.

Для особых видов применения некоторые типы выключателей нагрузки должны выдерживать более серьезные нагрузки, например:

- выключатели нагрузки для дуговых электропечей часто работают при больших значениях тока;
- выключатели нагрузки для конденсаторных батарей довольно часто срабатывают и должны выдерживать ток включения (высокой частоты и большой амплитуды).

Разъединители не являются, собственно говоря, отключающим устройствами, поскольку срабатывают без нагрузки (тем не менее, они должны обеспечивать отключение емкостного тока нулевой последовательности разомкнутых цепей). Разъединители используются, чтобы изолировать цепь от остальной сети и обеспечить безопасный доступ к этой отключенной цепи. Для этого разъединители должны обладать высокой электрической прочностью между контактами и конструктивно соответствовать требованиям обеспечения защиты от перехода через изоляционное расстояние даже в случае перенапряжения сети. Несмотря на выполнение этих требований безопасность лиц, работающих с оборудованием, обеспечивается полностью только тогда, когда звено сети, изолированное с помощью разъединителей, также имеет должное заземление. Разъединители часто используются вместе с выключателями, которые не производят секционирование энергосистемы, в основном, с автоматическими выключателями и контакторами. Выключатели нагрузки, напротив, чаще всего могут также выполнять разделение сети.

Тип коммутационного устройства	Определение по Международному электротехническому словарю (VEI)	Стандарт МЭК для сетей среднего напряжения (МТ)
Выключатель нагрузки	Коммутационное устройство, способное устанавливать, выдерживать и прерывать ток в нормальных условиях работы цепи, в том числе, работать по току в указанных в стандарте ненормальных условиях эксплуатации, например, в случае короткого замыкания (VEI 60050-441-14-10).	МЭК 60265-1
Разъединитель	Коммутационное устройство, обеспечивающее при отключении секционирование, соответствующее указанным в стандарте требованиям (VEI 60050-441-14-05).	МЭК 60129
Автоматический выключатель	Коммутационное устройство, способное устанавливать, выдерживать и прерывать ток в нормальных условиях работы цепи, а также устанавливать, выдерживать в течение указанного в стандарте времени и прерывать ток в ненормальных условиях эксплуатации, например, в случае короткого замыкания (VEI 60050-441-14-20).	МЭК 60056
Контактор	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 (VEI 60050-441-14-33).	МЭК 60470

Рис. 25 : Стандартные определения основных типов коммутационных устройств

Автоматические выключатели являются устройствами защиты, которые защищают сеть путем автоматического отделения поврежденных участков сети; они способны отключать максимальный ток короткого замыкания, который может возникнуть в месте, где они установлены. Таким образом, автоматические выключатели являются высокоэффективными коммутационными аппаратами, которые срабатывают по команде оператора или управляются каким-либо автоматическим устройством защиты в случае обнаружения повреждения. Эти выключатели должны иметь высокую надежность, так как от их хорошей работы зависит безопасность и эксплуатационная готовность сети.

Требуемая электрическая и механическая износостойкость автоматических выключателей больше, чем эта же характеристика для выключателей нагрузки, обычно составляет:

- 10 – 100 отключений тока короткого замыкания;
- 2000 – 10000 механических переключений и отключений при I_n .

Контакторы являются органами управления электроприемников, работающих в прерывистом режиме, в частности, электрических двигателей. Они представляют собой коммутационные аппараты с высокой коммутационной способностью, которые должны обеспечивать отключение тока перегрузки, превышающего номинальный ток (например, ток пуска двигателя или блокировки ротора), но не больше тока короткого замыкания, который отключается соответствующим устройством защиты (автоматический выключатель или предохранитель). Высокая механическая

и электрическая износостойкость контакторов обычно определяется сотнями тысяч коммутационных операций. Диаграмма, представленная на **рисунке 26**, иллюстрирует положение в соответствии с характеристиками четырех типов коммутационных аппаратов, описание которых дано выше. Одним из преимуществ технологии отключения в вакууме является обеспечение высокой отключающей способности и электрической износостойкости: именно в связи с этим данный метод прежде всего используется в автоматических выключателях и контакторах.

Применение автоматических выключателей в сетях среднего напряжения

Выключатель должен иметь высокую отключающую способность. Поэтому в вакуумных выключателях для данного вида применения используется технология создания радиального или аксиального поля. Оба метода позволяют обеспечить максимальную требуемую отключающую способность для среднего напряжения (до 63 кА); выбор между этими двумя технологиями зависит от их соответствующих преимуществ (см. рис. 13). Так же как и в элегазе, в среде вакуума, для данного вида применения, обеспечивается герметичное отключение, без каких-либо выбросов в окружающую среду, и технология предусматривает работу оборудования без технического обслуживания и высокую электрическую износостойкость.

Очень быстрое восстановление электрической прочности вакуума может являться преимуществом по сравнению с элегазом в особых видах применения, для которых скорость повышения напряжения TVR больше, чем

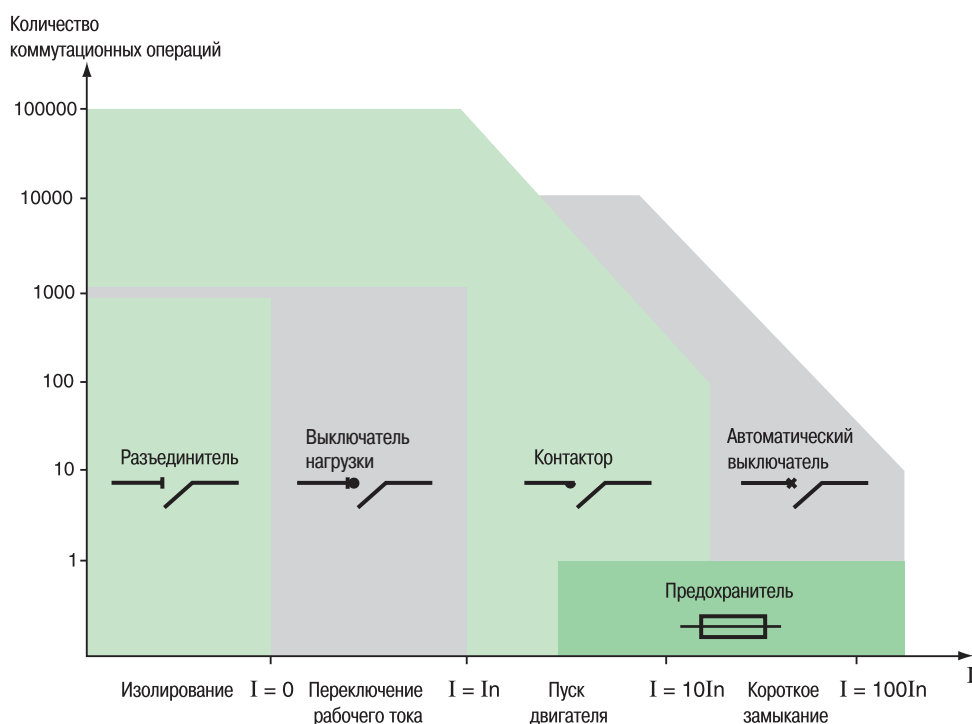


Рис. 26 : Положение соответствующих четырех типов коммутационных аппаратов в зависимости от тока отключения и количества выполняемых коммутационных операций

предусмотрено стандартами МЭК 56 и ANSI C37-06 (например, в случае использования автоматического выключателя, подсоединенного непосредственно к вторичной обмотке трансформатора большой мощности). В подобных случаях, которые бывают не часто, так как нормированное напряжение TVR охватывает подавляющее большинство видов применения, вакуумные выключатели реже подвергаются выходу из строя, чем выключатели SF₆. Поскольку отключение в вакууме происходит без подвода энергии извне, вакуумным выключателям требуется меньше энергии для работы, чем выключателям SF₆ с автосжатием. Что касается выключателей SF₆ с вращающейся дугой или с автокомпрессионным методом гашения дуги, то в этом типе устройств, промежуток меньше. Однако это преимущество нивелируется недостатком, присущим вакуумным выключателям, в которых используются только торцевые контакты. В действительности, для этих контактов требуется более высокое усилие сжатия контактов, чтобы предотвратить отталкивание и сваривание контактов при включении в случае повреждения: требуемое усилие сжатия контактов для каждого полюса составляет порядка 2000 Н для выключателя на 25 кА и 6000 Н для выключателя на 50 кА. Это требование позволяет увеличить энергию управления включением и усилить конструкцию полюсов, которые должны выдерживать постоянные нагрузки в замкнутом положении. В то же время, несмотря на высокое усилие сжатия, использование торцевых контактов, изготовленных из CuCr, не позволяет добиться такого же слабого переходного сопротивления контактов, как в случае использования многопозиционных посеребренных контактов: таким образом, вакуумные выключатели имеют недостаток по сравнению с выключателями SF₆, выражающийся в более интенсивном рассеянии тепла при больших значениях номинального тока (2500 А и более). Контакты вакуумного выключателя, защищенные от окисления, могут испытывать неограниченный нагрев в отличие от контактов других выключателей, но тепло, создаваемое выключателем должно отводиться в окружающую среду при соблюдении допустимых температурных пределов на соединениях и контактах; именно поэтому вакуумные выключатели большого номинала характеризуются тем, что имеют соединения и радиаторы особо большого размера. Независимо от их окружения, вакуумные выключатели также имеют ограничения по нагреву, не из-за материала, из которого они изготовлены, или технологии их изготовления (высокотемпературная пайка), но в силу свойств газа проникать через металлические стенки (например, в силфоне), которые начинают активно проявляться, что касается атмосферного водорода при температуре выше 200-250 °С. Следует сделать вывод, что технология отключения в вакууме хорошо подходит для применения в выключателях общего назначения в сетях среднего напряжения и отвечает всем обычным требованиям и характеристикам по напряжению, номинальному току и отключающей способности. Для специальных видов применения, например для управления индуктивной или емкостной нагрузкой должны приниматься особые меры предосторожности или лучше использовать другие технологии.

Применение контакторов в сетях среднего напряжения

В данном случае речь идет о применении, особенно хорошо адаптированном к технологии отключения в вакууме, который, кроме того, занимает доминирующую позицию на этом направлении. В действительности, отключаемый ток находится в диапазоне, где токи легко прерываются дугой в вакууме в режиме рассеивания, с использованием контактов простой конфигурации и изготовленных из материалов, имеющих небольшой износ, то есть обладающих прекрасной электрической износостойкостью. Усилие сжатия контактов может быть слабым, поскольку номинальный ток небольшой, и ток повреждения ограничивается соответствующими предохранителями, кроме того, материал контактов имеет очень слабую свариваемость и, следовательно, обладает определенной способностью к отталкиванию.

Напряжение питания двигателей среднего напряжения, значения которого находятся в нижней части диапазона СН (обычно 7,2 кВ), позволяет устанавливать небольшой ход контактов (порядка 4 мм) и использовать компактные контакторы с большой механической износостойкостью, которые особенно хорошо подходят для устройств с электромагнитным управлением.

Все эти преимущества обуславливают успешное применение технологии отключения в вакууме при использовании контакторов в сетях среднего напряжения. Однако, не следует забывать о риске возникновения перенапряжений при отключении индуктивных цепей (двигатель в фазе пуска, вакуумный трансформатор), что свойственно отключению в вакууме, и учитывать необходимость использования соответствующей защиты (см. раздел 3). Эта проблема, общая для всех типов вакуумных выключателей, требует особого внимания при обеспечении управления двигателями, которые являются электроприемниками, чувствительными к перенапряжениям.

Применение выключателей нагрузки и разъединителей в сетях среднего напряжения

Технология отключения в вакууме, которая позволяет использовать автоматические выключатели и контакторы в сетях среднего напряжения, является также методикой, которая может применяться для обеспечения более простых требований, а именно, в выключателях нагрузки. Однако применение этой технологии в таком направлении имело ограниченный успех. В действительности, выйти на невысокие рабочие характеристики, в целом, можно, используя более экономичный метод отключения в воздухе или в элегазе. И, прежде всего, функция прерывателя часто связана с функцией разъединителя, которая успешно обеспечивается с помощью технологии отключения в воздухе или элегазе, но не в вакууме. Поэтому соединение вакуумного выключателя с обычным разъединителем делает это решение неконкурентноспособным. Невозможность обеспечить секционирование с помощью вакуумного выключателя объясняется нарушением соответствия напряжения установленным нормам в результате ухудшения состояния поверхности контактов под действием механических и электрических операций. Это нарушение не позволяет гарантировать электрическую прочность, которой без особых трудностей

удалось добиться при приведении в соответствие с нормами по напряжению нового выключателя. Кроме того, невозможность постоянно контролировать целостность диэлектрической среды в вакуумном выключателе также является фактором, тормозящим его использование в качестве разъединителя.

В случае использования выключателя нагрузки включение на короткое замыкание оказывает неблагоприятное воздействие прежде всего на электрическую прочность между контактами, поскольку за этим включением не следует отключение, способное эродировать шероховатости, образовавшиеся в результате разрыва сварного соединения контактов при предварительном зажигании.

Чтобы избежать значительного снижения электрической прочности в случае последовательных включений при коротком замыкании, контакты выключателя нагрузки изготавливаются из материалов с очень слабой свариваемостью, таких как WCu, взамен CuCr, используемого для производства автоматических выключателей.

Для особых видов применения, требующих обеспечения большой электрической износостойкости оборудования (например, выключатели нагрузки для дуговых печей), отключение в вакууме является самой успешной технологией и широко используется, даже когда проблемы с возникновением перенапряжений, свойственных вакууму, в некоторых случаях вынуждают применять технологию SF₆ несмотря на более низкие показатели износостойкости.

Другим особым видом применения является выключатель нагрузки для конденсаторных батарей, функции которого могут обеспечиваться стандартным

выключателем SF₆, но для которого, при использовании вакуумной технологии, требуется специальный корпус. В действительности, электрический заряд конденсатора создает особо высокое восстанавливающееся напряжение на выводах выключателя. Поэтому электрическая прочность после отключения корпуса вакуумного устройства не является надежной, из-за возможности пробоя под действием частиц, генерируемых во время отключения (см. раздел 2).

Что касается параллельно соединенных конденсаторных батарей, включаемых отдельно, то риск повторного зажигания возрастает в силу действия тока большой частоты, создаваемого разрядом соседних конденсаторов на включенный конденсатор: этот ток включения определяет необходимость использования контактного материала с низкой свариваемостью, например, WCu, что несовместимо с применением вакуумного выключателя. Кроме того, чтобы избежать возможного прерывания высокочастотного тока включения во время фазы предварительного зажигания, из-за чего создается перенапряжение, оказывающее вредное действие на конденсаторные батареи, необходимо учитывать следующее: присоединение импульсных дросселей уменьшает частоту тока включения, увеличение скорости включения сокращает продолжительность предварительного зажигания.

Выводы: технология отключения в вакууме может использоваться для управления емкостными нагрузками, но другие методы и, в частности, методика SF₆ представляются более адаптированными к данному виду применения.

4.2. Применение технологии отключения в вакууме в сетях низкого напряжения

Технология отключения в вакууме, широко используемая в сетях среднего напряжения (СН) для обеспечения работы выключателей и контакторов, может таким же образом применяться и в сетях низкого напряжения (НН). Однако этот метод мало используется при таком уровне напряжения. В действительности, с одной стороны, с технологией отключения в вакууме конкурирует метод отключения в воздухе, который является более простым, более экономичным и лучше адаптированным, и, с другой стороны, недостатки отключения в вакууме, отмеченные при использовании технологии по среднему напряжению, больше проявляются при использовании по низкому напряжению.

Основной недостаток отключения в вакууме в сетях низкого напряжения при использовании выключателя обусловлен низким напряжением дуги, которое не может достичь или превысить напряжение сети, как в случае использования выключателя по методу отключения в воздухе; таким образом, отключение в вакууме не может ограничить ток повреждения до величины значительно меньше ожидаемого тока короткого замыкания. Это ограничивающее действие особенно полезно, так как позволяет избежать интенсивных электродинамических усилий, которые создавались бы ожидаемым током короткого замыкания, часто имеющим большую силу в

сетях НН (до 100 кА и больше). Это ограничивающее действие также облегчает естественный выбор выключателей, так как чем больше выражено это действие, тем меньше номинал выключателя. Кроме того, недостатки вакуумных выключателей, уже указанные для среднего напряжения, связанные с использованием торцевых контактов (большое усилие сжатия и большое переходное сопротивление контактов) сильнее проявляются в сетях низкого напряжения, в которых по цепи может проходить большой ток короткого замыкания (неограниченный ток), и для которых требуется использовать выключатели большего номинала, чем для сетей среднего напряжения.

Наконец, из-за высокой отключающей способности, необходимой для использования по низкому напряжению, вакуумные выключатели должны иметь значительно больший размер, чем устройства отключения в воздухе с меньшими номинальными характеристиками.

В силу этих различных причин использование вакуумных выключателей в сетях низкого напряжения ограничивается узкой областью применения в соответствии со следующими характеристиками:

- отключающая способность: 75 кА;
- номинальный ток: 800 – 2500 А.

В связи с этим, несмотря на то, что отключение в вакууме не является менее затратной технологией по сравнению с отключением в воздухе, она представляет интерес в силу следующих причин:

- герметичное отключение, без каких-либо выбросов в окружающую среду;
- возможность использования в загрязненной атмосфере;
- более высокая электрическая износостойкость.

Что касается применения контакторов в сетях низкого напряжения, то недостатки вакуумных выключателей, указанные выше, больше не учитываются. Основные факторы, тормозящие развитие этой технологии в данной области, следующие:

- прежде всего разница в затратах в пользу обычного метода отключения в воздухе;
 - затем особенности вакуума, связанные с перенапряжением, возникающим при отключении, которые уже были представлены в разделе 3.
- Таким образом, в области низкого напряжения технология отключения в вакууме не может реально конкурировать с методом отключения в воздухе, за исключением особых случаев, когда герметичное отключение дает значительное преимущество.

4.3. Применение технологии отключения в вакууме в сетях высокого напряжения

В области высокого напряжения технология отключения в вакууме может рассматриваться только применительно к автоматическим выключателям: предпринимались различные попытки такого использования, но до настоящего времени особого успеха не имели. В действительности, представляется, что характеристики отключения в вакууме не позволяют технологии отключения в вакууме на деле конкурировать с методом отключения в элегазе в сетях высокого напряжения. Первой трудностью, которую нужно преодолеть, является изготовление вакуумных выключателей, рассчитанных на достаточно высокое единичное напряжение. Если сейчас уже налажено широкое производство вакуумных выключателей, обеспечивающих отключение при напряжении 36 кВ, то для отключения при 52 кВ часто требуется использовать два последовательно соединенных выключателя. На сегодняшний день максимальный уровень напряжения, на который рассчитан и имеется в продаже автоматический выключатель с одним прерывателем на каждый полюс, составляет 72,5 кВ.

Выключатели, предназначенные для использования при напряжении 123-145 кВ, на настоящий момент, еще не прошли стадию изделий-образцов, в то время как в продаже имеются дугогасительные камеры SF₆, рассчитанные на единичное напряжение до 420 кВ. Решение, предполагающее последовательно соединить большое количество выключателей для достижения высокого напряжения, помимо проблем технического характера (распределение напряжения, обеспечение надежности и т.д.), не может заметно конкурировать с точки зрения экономичности с методом отключения в элегазе. Основным препятствием к использованию вакуумного выключателя при высоком единичном напряжении является «потолок» диэлектрической характеристики при высоком напряжении, составляющий примерно 500 кВ (см. рис. 4), что соответствует уровню стойкости к грозовому импульсу, который должен обеспечиваться для устройств, рассчитанных на 123-145 кВ. В настоящее время подобное техническое решение не рассматривается.

Кроме того, в случае использования вакуума при высоком единичном напряжении возникает проблема рентгеновского излучения, которое может создаваться выключателями при рабочем напряжении порядка сотни киловольт. Здесь речь идет об уровне напряжения, подаваемого на выключатели сетей среднего напряжения, для приведения их в соответствие с требованиями стандартов; эта операция выполняется в бронированных камерах, чтобы защитить операторов от действия рентгеновского излучения.

Что касается выключателей, имеющих диэлектрические характеристики, адаптированные для высокого напряжения, и которые уже приведены в соответствие с требованиями стандартов, то уровень излучения (в отключенном положении) должен был бы оставаться допустимым, но поскольку в процессе эксплуатации выключателей возможно возникновение частичного несоответствия требованиям, этот недостаток не может быть полностью устранен.

Таким образом, в силу физических ограничений технология отключения в вакууме может конкурировать с методом SF₆ только при наиболее низких уровнях напряжения области ВН и в случае неблагоприятных экономических условий. Для совершенно особых видов применения можно использовать в сочетании технологию отключения в вакууме и в элегазе, как, например, для автоматического выключателя постоянного тока на 250 кВ, в котором применяется вакуумный выключатель, соединенный последовательно с дугогасительной камерой SF₆. Это решение объединяет качества вакуума - отключение при больших значениях характеристики di/dt и начальной скорости нарастания напряжения TVR, и свойства элегаза - обеспечение стойкости в конце процесса повышения TVR. Что касается современных видов применения выключателей в сетях высокого напряжения, нельзя с уверенностью сказать, что решение комбинированного использования технологий может экономически конкурировать с вариантом применения только SF₆, даже если в техническом отношении подобное комбинирование является привлекательным, позволяя соединять свойства и качества каждой из технологий отключения.

5. Заключение

В заключение данного обзора следует сказать, что технология отключения в вакууме, в силу высоких показателей отключающей способности и электрической износостойкости, представляется, в целом, хорошо адаптированной к использованию в автоматических выключателях и контакторах сетей среднего напряжения. В то же время часто бывает предпочтительным использовать метод отключения в элегазе, когда прежде всего требуется обеспечить электрическую прочность, низкий уровень коммутационных перенапряжений или способность выдерживать установившийся ток большой силы.

Несмотря на то, что отключение в вакууме является полностью устоявшейся технологией, данный метод имеет значительный потенциал для дальнейшего совершенствования его параметров, в частности, то, что касается не так давно разработанной технологии создания аксиального поля. Таким образом, можно предположить, что работы по уменьшению размеров корпуса выключателя будут продолжены. Для этого необходимо стремиться к оптимизации использования поверхности контактов и повышению допустимой плотности тока. Для достижения этих целей в настоящее время исследования и разработки должны вестись по следующим основным направлениям:

- моделирование явления электрической дуги и ее взаимодействия с аксиальным магнитным полем;
- механизмы рассеивания и распределения энергии дуги на поверхности контактов;
- улучшение характеристик контактных материалов.

Чтобы расширить область применения технологии отключения в вакууме и эффективнее использовать свойства вакуума, разработчики оборудования ведут поиск новых решений и, в частности, изучают возможность комбинировать данную технологию с другими методами, например, с отключением в элегазе, используя в сочетании их преимущества. Этот подход уже применяется для оборудования некоторых типов ячеек сетей среднего напряжения с изоляцией газом, когда используются в сочетании свойства отключения в вакууме и свойства отключения в элегазе.

Другой путь, на данный момент мало изученный, это изготовление гибридных выключателей, объединяющих обе технологии отключения – в вакууме и в среде SF₆. Это решение, требующее больших затрат, тем не менее, могло бы быть востребованным в некоторых областях применения, если бы позволило эффективно сочетать преимущество обеих технологий.

Библиография

Технические Тетради Schneider Electric

- Технология отключения в сетях среднего напряжения. Техническая Тетрадь № 193. 1998 г. С. ТЕОЛЕЙРЕ

Прочие публикации

- Справочные материалы
- Отключение цепей. Теория и технология. 1984 г. ТОМАС Е. БРАУНИ. «Марсел Деккер», Инк.
- Вакуумные выключатели. 1994 г. АЛЛАН ГРИНВУД. ИИЭР (Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике)
- Руководство по изучению и технологии использования электрической дуги в вакууме. Основы теории и вопросы применения. 1995 г. РАЙМОНД Л. БОКСМАН, ФИЛИП ДЖ. MARTIN, ДЭВИД М. САНДЕРЗ. «Нойес Пабליкейшнз»
- Общие сведения по технологии отключения
- Применение выключателей (для отключения цепей). 1984 г. ЧАРЛЬЗ Л. ВАГНЕР. «Марсел Деккер», Инк.
- Изоляция в вакууме
- Влияние геометрии контактов и приведения в соответствие со стандартами по высокому напряжению на коэффициент усиления поля контактов вакуумных выключателей. «Электрика», № 38. 1989 г. Р.П.П. СМИТС, Х.Ф. РЕЙНДЖЕРЗ, В.М.К. ВАН ДЕН ХОЙВЕЛ, И.Х. ФУ.
- Изоляция в вакууме. D2540 и D2541. 1991 г. АННЕ ЦЕЙТОН-ФАКИРИС. «Инженерная техника»
- Электрическая дуга в вакууме
- Увеличение оболочки под низким давлением плазмы. Февраль 1971 г. Ж.Г. ЭНДРЮЗ, Р.Х. ВЕЙРИ. «Физика жидкостей»
- Отключение в вакууме (из материала «Отключение цепей»). 1984 г. КЛИВ В. КИМБЛИН, ПОЛ Г. СЛЭЙД, РОЙ Е. ВОУШОЛЛ. «Марсел Деккер», Инк.
- Физика отключения тока короткого замыкания с помощью вакуумных выключателей. Сборник АВВ, 5/1993 г. ЭДГАР ДУЛЛНИ.
- Измерения и моделирование в области нуля тока вакуумных выключателей для отключения тока большой силы. 1996 г. ДЖОАН КАУМАНЗ. ИИЭР, 17-й ИСДЕИВ-Беркли
- Последуговой пробой диэлектрика в вакуумных выключателях. Август 1999 г. СТИВЕН В. РОУ. Институт инженеров-электриков. Инженерный симпозиум по высокому напряжению, 22-27
- Аксиальное магнитное поле
- Взаимодействие электрической дуги в вакууме и аксиального магнитного поля. 1978 г. Х.К.В. ГАНДЛЭЧ. ИИЭР, 8-й ИСДЕИВ-Альбукерке
- Вакуумные выключатели с использованием аксиального магнитного поля на основе внешних катушек и башмаков. 1986 г. Х. ШЕЛЛЕКЕНЗ, К. ЛЕНСТРА, Ж.ХИЛДЕРИНК, Ж. ТЕР ХЕННЕПЕ, Ж. КАМАНЗ. ИИЭР, 12-й ИСДЕИВ-Шореш
- Токораспределение и магнитный профиль давления дуги в вакууме при создании аксиального магнитного поля. 1986 г. И. ИЗРАЭЛИ, Р.Л. БОКСМАН, С. ГОЛДСМИТ. ИИЭР, 12-й ИСДЕИВ- Шореш
- Влияние аксиального магнитного поля на развитие дуги в вакууме между размыкающими электрическими контактами. Март 1993 г. Б. ШУЛЬМАН, ПОЛ ДЖ. СЛЭД, Ж.В.Р. ХЕБЕРЛЕЙН. ИИЭР, отдел операций с комплектующими, гибридами и производственных технологий
- Оценка действия аксиального магнитного поля переменного тока, необходимого для предотвращения образования анодных пятен между размыкающими контактами во время дуги в вакууме. Март 1994 г. БРЮС ШУЛЬМАН, ДЖОН А. ВИНДАС. ИИЭР, отдел операций с комплектующими, компоновки и производственных технологий
- Технологический прогресс в разработке вакуумных выключателей с аксиальным магнитным полем. 1996 г. К. ВАТАНАБЕ, Е. КАНЕКО, С. ИАНАБУ. ИИЭР, 17-й ИСДЕИВ-Беркли
- Состояние электрической дуги в вакуумных выключателях с аксиальным магнитным полем, имеющих внешнюю катушку. 1998 г. ХАНСШЕЛЛЕКЕНЗ. ИИЭР, 18-й ИСДЕИВ-Эйнховен

- Контактные материалы
 - Контактные материалы для вакуумных выключателей.
1992 г.
Ф. ХЕЙТЦИНГЕР, Х. КИППЕНБЕРГ, К.Е. ЗЕГЕР,
К.-Х. ШРЁДЕР.
ИИЭР, 15-й ИСДЕИВ-Дармштадт
 - Успехи в разработке контактных материалов вакуумных выключателей для сетей высокого напряжения.
Март 1994 г.
ПОЛ ДЖ. СЛЭЙД.
ИИЭР, отдел операций с комплектующими, компоновки и производственных технологий
- Перенапряжения
 - Применение вакуумных выключателей и защита от перенапряжения (для отключения цепей).
1984 г.
ДЖОН Ф. ПЕРКИНС.
«Марсел Деккер», Инк.
 - Типы повторного зажигания после прохождения тока высокой частоты через нуль в вакуумных выключателях при использовании контактного материала двух видов.
1992 г.
Р.П.П. СМИТС, Т. ФУНАХАШИ, Е. КАНЕКО, И. ОШИМА.
ИИЭР, 15-й ИСДЕИВ-Дармштадт
 - Математическое моделирование режима работы вакуумных выключателей в условиях высокой частоты и сравнение с результатами измерений переходных процессов в энергосистемах.
1996 г.
Ж. ХЕЛМЕР, М. ЛИНДМАЙЕР.
ИИЭР, 17-й ИСДЕИВ-Беркли

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 «Сугас - 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