# ВЛИЯНИЕ КОММУТИРУЕМЫХ БАТАРЕЙ КОНДЕНСАТОРОВ С ОЧЕНЬ БОЛЬШИМ БРОСКОМ ПУСКОВОГО ТОКА НА КОММУТАЦИОННЫЕ АППАРАТЫ

АВТОРЫ:

СМИТС Р.П.П.
KEMA TIC, НИДЕРЛАНДЫ

ВИГГЕРС Р.
KEMA TIC, НИДЕРЛАНДЫ

БАННИНК Х.
KEMA TIC, НИДЕРЛАНДЫ

КУИВЕНХОВЕН С.
KEMA TIC, НИДЕРЛАНДЫ

ЧАКРАБОРТИ С.
SCHNEIDER ELECTRIC,
ФРАНЦИЯ

САНДОЛАЧЕ Г.
SCHNEIDER ELECTRIC,
ФРАНЦИЯ

**Все большее количество конденсаторных батарей используется для контроля и управления качеством электроэнергии в сетях передачи и распределения. Вследствие колебания нагрузки коммутация конденсаторных батарей, как правило, представляет собой ежедневную операцию. Хотя значение коммутируемого тока, например нормального тока нагрузки, значительно ниже максимальной отключающей способности выключателей, ток переходного процесса после включения (так называемый бросок тока) является главной проблемой для выключателей. Часто очень высокие значения тока (бросок тока), протекающего в дуге предварительного пробоя при включении между контактами выключателя, могут повредить контактную систему. Стандарт МЭК на выключатели 62271-100 нормирует пик тока 20 кА при подаче питания на батарею (-и), включаемую (-ые) дополнительно к тем, на которые питание уже было подано, то есть при так называемом параллельном включении. В статье показано, что невозможно надежно обеспечить полный бросок тока при трехфазном включении в испытательных установках.**

Батарея конденсаторов на высоковольтной подстанции



## КОММУТАЦИЯ ЕМКОСТНЫХ НАГРУЗОК

В отличие от отключения тока короткого замыкания (КЗ) отключение емкостного тока представляет собой стандартную коммутационную операцию [1]. К обычным режимам, при которых отключается емкостный ток, могут быть отнесены:

1. Коммутация ненагруженных линий электропередачи или узлов местных станций. В этом случае нагрузка уже отключена (например, выключателем на удаленном конце линии), но из-за распределенной емкости воздушной линии передачи в системе продолжает протекать небольшой ток, который должен быть отключен выключателем станции.

2. Коммутация кабелей. Из-за относительно высокой емкости кабелей отключаемый ток имеет более высокое значение по сравнению с воздушными линиями передачи.

3. Коммутация конденсаторных батарей. Вследствие собственной сосредоточенной емкости конденсаторные батареи, как правило, потребляют гораздо больший ток по сравнению с ненагруженными кабелями или линиями, достигающий в условиях реальной эксплуатации нескольких сотен А. Что касается отключения тока, то режим коммутации конденсаторных батарей принципиально не отличается от режимов коммутации линий или кабелей. Основной отличительной особенностью является частота коммутаций: коммутация ненагруженных линий и кабелей является редким явлением, а коммутация конденсаторных батарей происходит очень часто, поскольку конденсаторные батареи применяются для обеспечения требуемой реактивной мощности в условиях чередования дневных и ночных нагрузок. Таким образом, принимая во внимание большое количество коммутаций, коммутационную способность выключателей конденсаторных батарей следует рассматривать на основе статистических оценок.

Что же касается включения конденсаторных батарей, то сосредоточенный характер емкости приводит к появлению очень непростого для выключателей явления – броска тока, то есть очень большого тока переходного процесса, создаваемого конденсаторной батареей. Так как волновое сопротивление конденсаторных батарей гораздо меньше волнового сопротивления кабелей и линий, то бросок тока конденсаторной батареи (и его последствия) представляет собой предмет особого внимания как для эксплуатации, так и для разработчиков коммутационной аппаратуры.

Характерными особенностями коммутации емкостной нагрузки являются:

- ток опережает напряжение на 90 градусов, то есть когда ток равен нулю, напряжение источника питания близко к максимальному значению;
- емкостная нагрузка заряжена до напряжения, которое она имела при отключении тока, и сохраняет его как напряжение постоянного тока. Из этого следует, что восстанавливающееся напряжение имеет, по существу, форму 1-cosine при промышленной частоте [2];
- значение тока намного меньше значения номинального тока отключения (короткого замыкания) выключателя. Из этого следует, что даже в тех случаях, когда размыкание контактов происходит

ИНФОРМАЦИЯ

### ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА

Впервые была описана в 1802 г. русским ученым В. В. Петровым. Если напряжение выше 10 В при токе в цепи порядка 0,1 А и более, то при размыкании электрической цепи возникает электрический разряд в виде электрической дуги.

Электрическая дуга – частный случай четвертой формы состояния вещества – плазмы.

Присутствие свободных электрических зарядов обеспечивает проводимость электрической дуги. При значительных напряжениях и токах температура внутри дуги может достигать 15 тыс. °С, в результате чего плавятся контакты и токоведущие части.

При напряжениях 110 кВ и выше длина дуги достигает нескольких метров. Она представляет собой серьезную опасность, особенно в мощных силовых цепях.

Для минимального повреждения контактов необходимо погасить дугу в минимальное время, прилагая все усилия по недопущению нахождения дуги на одном месте (при движении дуги теплота, выделяющаяся в ней, будет равномерно распределяться по телу контакта).

## ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ

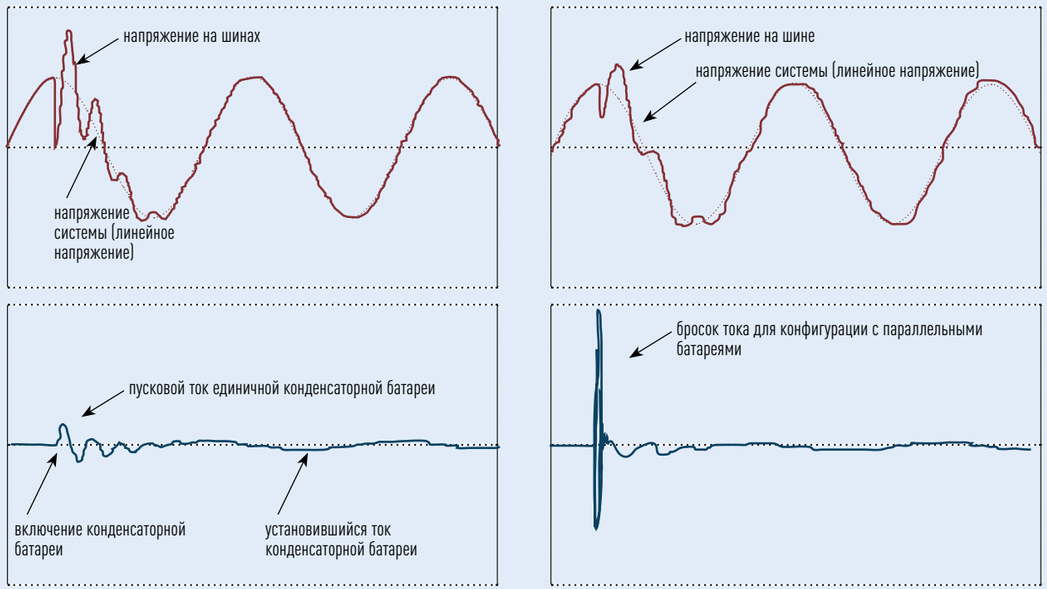



Рис. 1 Включение единичной конденсаторной батареи (слева) и включение конфигурации с параллельными конденсаторными батареями (справа). Вверху: переходное напряжение на шине; внизу: переходный ток, протекающий через выключатель

при значениях тока, близких к нулю, выключатель легко отключает ток (по крайней мере, в начальной стадии);

– число коммутаций конденсаторной батареи очень велико и может достигать 120 операций в год [3];

– при коммутации (включении) конденсаторной батареи сразу после подачи питания возникает значительный бросок тока.

Сочетание короткого контактного промежутка при значениях тока, близких к нулю, и высокого значения восстанавливающегося напряжения создает возможность повторного пробоя выключателя (то есть пробоя разомкнутого промежутка позднее одной четвертой цикла промышленной частоты после отключения тока). При повторном пробое внезапный выброс энергии, запасенной в нагрузке, может привести к повреждению контактной системы выключателя. Кроме того, повторный пробой может привести к росту напряжения [2] и при определенных условиях быть вредным для оборудования станции.

Пробой, возникающий при временах, меньших одной четвертой цикла промышленной частоты, после отключения, называется повторным зажиганием и может считаться безопасным явлением, присущим процессу отключения.

Как следует из статистических оценок, коммутация конденсаторной батареи представляет собой наиболее критическую операцию отключения емкостных токов. Вследствие возникновения броска тока выключатель может испытывать неблагоприятное воздействие, а из-за большого количества коммутационных операций очень высока вероятность повторного пробоя в течение его срока службы.

## ВКЛЮЧЕНИЕ КОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕИ

Включение емкостной нагрузки, как правило, сопровождается броском тока. При подключении сосредоточенной (незаряженной) емкости к источнику напряжения происходит внезапное изменение напряжения конденсатора (от нуля до определенного значения), du/dt имеет очень



большое значение, что приводит к возникновению очень большого тока. Бросок тока пропорционален волновому сопротивлению емкостной нагрузки. Поэтому через распределенные «емкости», например кабели и линии передач, имеющие относительно высокие волновые сопротивления, порядка десятков и сотен Ом, протекает относительно небольшой ток. Как правило, включение кабелей и линий не связано с броском тока и не создает никаких проблем для выключателя [4].

С конденсаторными батареями дело обстоит иначе. Волновые сопротивления конденсаторных батарей составляют только несколько Ом, что предполагает возникновение очень больших бросков тока при включении.

Проблемы, возникающие при броске тока в конденсаторных батареях, носят двоякий характер:

– коммутационное устройство: бросок тока возникает в момент предварительного пробоя, до соприкосновения контактов. Вследствие высокой частоты броска тока пиковые значения тока (как правило, в течение нескольких периодов) могут быть легко достигнуты во время дуги предварительного пробоя. При этом дугогасительное устройство испытывает значительные нагрузки. Это может привести к возникновению ударных волн в газе и повреждению внутренних деталей, например сопел элегазовых выключателей, что наблюдается время от времени. В вакуумных выключателях замыкание контактов при броске тока в условиях сильного дугового разряда приводит к свариванию контактов. Последующее размыкание приваренных контактов может привести к появлению микровыступов. При отсутствии либо небольшом дуговом разряде после размыкания контактов, недостаточном для выгорания этих «усов» (точечных контактов), может возникнуть проблема с выдерживаемым напряжением;

– система: в зависимости от топологии конденсаторной батареи на шинах электростанции могут возникать переходные напряжения, которые потенциально могут ухудшить качество поставляемой электроэнергии [5].

Жесткость режимов обоих переходных процессов в значительной степени зависит от топологии схемы конденсаторных батарей.

Обычно рассматривают два варианта:

– схема с единичной конденсаторной батареей. В этом случае включают единичную конденсаторную батарею, когда другие батареи не соединены с шинами. При упрощенном подходе можно допустить, что бросок тока протекает главным образом через реактивное сопротивление короткого замыкания цепи. Преимущество такой топологии заключается в том, что это реактивное сопротивление ограничивает бросок тока, а недостатком можно считать тот факт, что на напряжение шин оказывает серьезное

ИНФОРМАЦИЯ

### БРОСОК ТОКА

Конденсатор в сети переменного тока представляет собой стабильную нагрузку, вызывающую фазовый сдвиг между током и напряжением.

Длинные кабели и линии электропередач, обладающие емкостью, доходящей до 1 мкф/км, являются мощными емкостными нагрузками. Включение специальной емкостной нагрузки позволяет в ряде случаев компенсировать индуктивность нагрузки и стабилизировать напряжение.

В силу особенностей переходных процессов в сетях, содержащих емкостную нагрузку, процесс включения электропитания эквивалентен возникновению короткого замыкания. Образующийся при этом ток называется «броском тока».

При индивидуальной компенсации пик броска тока может превышать в 30 раз номинальный ток конденсатора, а при многоступенчатой компенсации броски пускового тока в 130 раз выше номинальных значений. Длительность этого замыкания тем больше, чем больше емкость нагрузки и выше сопротивление линии.

## ЗАВИСИМОСТЬ ПОВТОРНОГО ЗАЖИГАНИЯ И ПОВТОРНОГО ПРОБОЯ ОТ СКАЧКА НАПРЯЖЕНИЯ

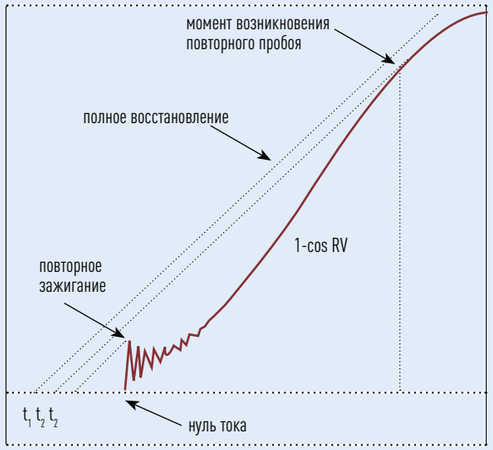



Рис. 2

## ВЕРОЯТНОСТЬ ПОВТОРНОГО ПРОБОЯ

| Класс C1: низкая вероятность повторного пробоя | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Режим испытаний | Давление | Ток | Операция | Скачок напряжения | Трехфазные испытания | | Однофазные испытания | |
| BC1 | Номин. | 40–160 А | O | <2% | 24 O | 6 O* | 24 O | 6 O* |
| BC2 | Номин. | ⩾ 400 А | BO | <5% | 24 BO | 6 O* | 24 BO | 6 BO* |
| Без предварительной подготовки | | | | | | | | |
| Допускается три повторных пробоя при условии повторения полной серии | | | | | | | | |

| Класс C2: очень низкая вероятность повторного пробоя | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Режим испытаний | Давление | Ток | Операция | Скачок напряжения | Трехфазные испытания | | Однофазные испытания | |
| BC1 | Миним. | 40–160 А | O | 2% | 24 O | 12 O* | 48 O | 12 O* |
| BC2 | Номин. | ⩾ 400 А | BO | 5% | 80 BO | 64 BO* | 120 BO | 84 BO* |
| Дополнительная подготовка – трехкратное отключение тока T60 | | | | | | | | |
| Допускается один пробой; отсутствие пробоя при повторении полной серии | | | | | | | | |

* - число испытаний, проводимых при минимальном времени горения дуги.

Таблица 1

влияние коммутационная операция, которая вызывает значительное изменение напряжения на шинах (рис. 1, слева). На шинах могут возникать большие переходные процессы, причем пик броска тока может составлять несколько кА при частоте до нескольких сотен Гц. В случае единичной конденсаторной батареи вследствие переходных напряжений на шинах процесс коммутации существенно воздействует на качество электроэнергии, причем преимущественно на системы электроснабжения, а не на выключатель; схема с параллельными батареями. В этом случае включение единичной конденсаторной батареи происходит, когда другие батареи уже подсоединены к шинам. Тогда бросок тока в основном проходит через соседнюю (-ие) батарею (-и). При этом он ограничен только распределенной индуктивностью схемы соединения конденсаторных батарей, но не питающей линией. Преимуществом такой топологии является практически неизменное напряжение на шине, несмотря на то что выключатель выдерживает очень большой бросок тока. На рис. 1 (справа) показан бросок тока, равный 20 кА (пиковое значение), при частоте порядка нескольких кГц. На практике пиковое значение броска тока может составлять до десятков кА при частоте несколько кГц. В случае топологии с параллельными батареями включение конденсаторной батареи влияет главным образом на выключатель и, в меньшей степени, на систему энергоснабжения.



Для уменьшения влияния броска тока часто применяются следующие меры:

1. Подключение реактора последовательно с конденсаторной батареей. Реактивное сопротивление реактора уменьшает бросок тока, а также ток при повторном пробое в случае его возникновения.

2. Использование синхронной управляемой коммутации. В этом случае стараются совместить включение с прохождением соответствующего напряжения каждой фазы через ноль, гарантируя тем самым отсутствие броска тока. Несмотря на широкое применение этого метода, он не обеспечивает уменьшение тока при повторном пробое, величина которого обычно превышает величину броска тока.

3. Использование нелинейных элементов, с помощью которых демпфирующий резистор включается в цепь только в период броска тока [6].

Нагрузки, возникающие при коммутации конденсаторных батарей, были предметом изучения рабочей группы СИГРЭ 13.04, а в настоящее время их исследованиями занимается рабочая группа СИГРЭ A3.26 («Коммутация конденсаторных батарей и ее влияние на работу оборудования»).

## НОРМИРОВАНИЕ

Нормативные требования к процессам коммутации конденсаторных батарей установлены в публикациях МЭК 62271–100 [8] и IEEE C37.09a [9].

## ТРЕХФАЗНЫЙ ПУСКОВОЙ ТОК В ДВУХ НИЖНИХ ФАЗАХ

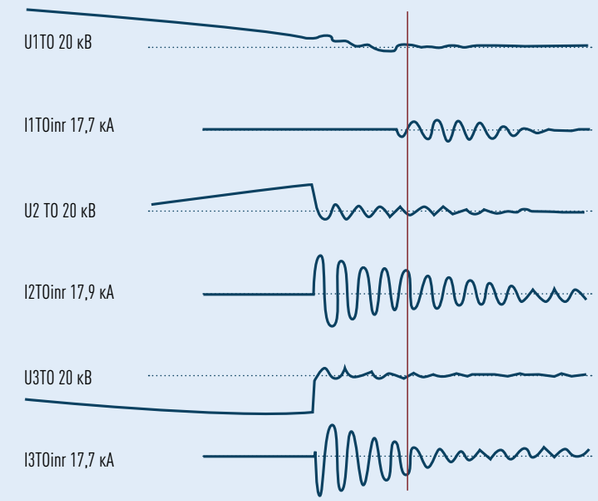



Рис. 3

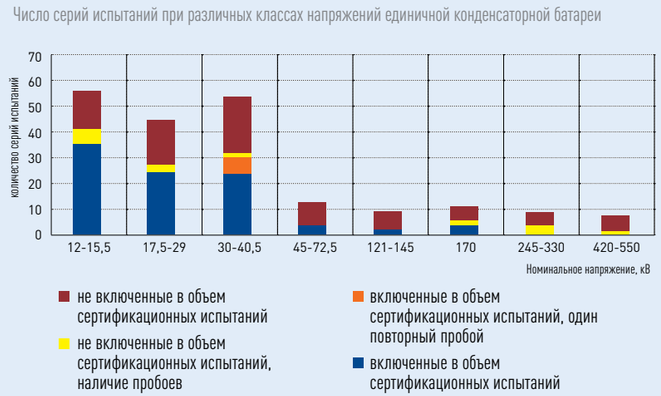
## СТАТИСТИКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

| Категория | Описание | Кол-во |
|---|---|---|
| I | Серия испытаний как часть сертификационных испытаний | 130 |
| II | Серия испытаний как часть сертификационных испытаний: имел место один повторный пробой | 10 |
| III | Испытания, по результатам которых сертификат не выдавался* | 132 |
| IV | Испытания, по результатам которых сертификат не выдавался*: многократные повторные пробои | 25 |
| V | Недостаточная информация для того, чтобы отнести к какой-либо из указанных выше категорий | 136 |
| | Общее количество серий испытаний | 433 |

* Сертификат, подтверждающий способность отключать емкостные токи, подразумевает также наличие сертификата на включающую и отключающую способности при токах КЗ. Отсутствие сертификата (категория III) может быть вызвано неудовлетворительным срабатыванием в режимах короткого замыкания, а не только несоответствием требованиям отключения емкостных токов.

Таблица 1

## ЧИСЛО СЕРИЙ ИСПЫТАНИЙ



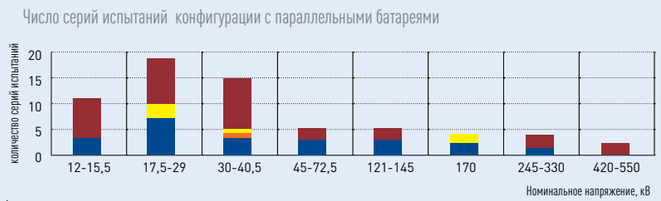




Рис. 4

Соответствующими руководствами могут служить документы СИГРЭ ТВ 305 [10] и IEEE Std. C37.12–2005 [11].

Требования к испытаниям кратко сформулированы в таблице 1.

Стандарты определяют различия между двумя классами выключателей по характеристикам отключения и включения емкостных токов:

– C1. Низкая вероятность повторного пробоя, подтверждаемая рядом испытаний, выполняемых в количестве, нормированном для однофазного и трехфазного режимов испытаний. В серии испытаний BC1 + BC2 допускается один повторный пробой; при двух пробоях разрешается повторение полной серии, но не более чем с одним дополнительным повторным пробоем;
– C2. Очень низкая вероятность повторного пробоя. В этом случае требуется большее число испытаний по сравнению с классом C1. В серии испытаний BC1 + BC2 допускается один повторный пробой, при этом необходимо повторение серии испытаний без пробоя. Кроме того, для моделирования процессов изнашивания выключатель должен выполнить три операции отключения при 60% номинального тока отключения (режим T60) [8].

Важным аспектом испытаний может служить точное воспроизведение скачка напряжения (столбец «Скачок» в таблице 1). Скачок напряжения – начальная (переходная) часть восстанавливающегося напряжения, возникающего в системе питания. Амплитуда скачка напряжения (ΔU, определяемая МЭК как изменение напряжения в% при коммутации) имеет вид:

$\Delta U \approx I_b/I_{sc} = Q/P$, (1)

где $I_b$, $I_{sc}$ – номинальный ток конденсаторной батареи и номинальный ток короткого замыкания соответственно; P – мощность КЗ в месте установки, а Q – мощность конденсаторной батареи. На рис. 2 этот скачок напряжения (в сочетании с восстанавливающимся 1-cos напряжением) показан вместе с тремя кривыми восстановления напряжения при условии увеличения напряжения пробоя в разомкнутом коммутационном промежутке.

Рис. 2 иллюстрирует зависимость вероятности повторного зажигания и повторного пробоя от скачка напряжения при разных временах горения дуги. Очень короткое время горения дуги (размыкание контактов после $t_3$) вызывает повторное зажигание; более длительное время горения дуги (размыкание в $t_2$) приводит к повторному пробою, а любое размыкание контактов ранее $t_2$, например в $t_1$, приводит к полному восстановлению напряжения. Следовательно, при более высоком значении ΔU вероятность повторного пробоя сравнительно мала. Это, в свою очередь, означает, что испытания на отключение емкостных токов должны проводиться при наличии достаточно мощного источника питания, даже при малом фактическом емкостном токе.

При конфигурации с параллельными батареями операция включения (B) должна выполняться при наличии схемы, обеспечивающей пиковое значение броска тока 20 кА при частоте 4250 Гц для всех номинальных напряжений.



## ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Получение нормированной величины пикового значения броска тока (20 кА при 4250 Гц) в испытаниях представляет собой серьезную проблему. Для получения очень большого броска тока при заданной частоте схема испытаний, обеспечивающая этот ток, должна иметь чрезвычайно низкое волновое сопротивление. Это подразумевает, что особенно при более низких номинальных напряжениях, при которых конденсаторная батарея имеет предельное зарядное напряжение, схема испытаний должна быть очень компактной с целью уменьшения до минимума паразитной индуктивности.

При низких номинальных напряжениях получение предельных значений броска тока, до нескольких десятков кА, согласно стандарту IEEE [12], невозможно. В ограниченном ряде случаев могут быть использованы синтетические схемы испытаний.

Для проведения трехфазных испытаний требуется наличие трех конденсаторных батарей, обеспечивающих броски тока. Тем не менее главная проблема создания трехфазных бросков тока заключается в недостаточной возможности управления моментами предварительного пробоя. В незаземленных системах конденсаторных батарей полные броски тока могут быть получены только после предварительного пробоя, по крайней мере, в двух фазах, при приложении к межконтактным промежуткам максимального межфазного напряжения.
В третьей фазе бросок тока всегда будет значительно ниже требуемого стандартами значения. На рис. 3 показаны результаты измерений, демонстрирующие последовательность прохождения броска тока при проведении трехфазных испытаний.

Поскольку предварительный пробой промежутков выключателя зачастую возникает в самый неожиданный момент и в значительной степени зависит от механических характеристик выключателя, испытания трехфазным броском тока считаются непрактичными.

В качестве компромисса между трехфазными и однофазными испытаниями KEMA разработала схему испытаний, генерирующую полный и управляемый бросок тока в одной фазе (режим отключения первой фазы), в то время как операция отключения выполняется в трехфазном режиме.

Преимущество однофазных схем состоит в реальном восстанавливающемся напряжении, так как при проведении однофазных испытаний напряжение источника питания должно быть повышенным (выраженным множителем, например $k_c$ = 1,4 [8]) для получения точной информации об условиях, возникающих в режиме отключения первого полюса. Недостаток однофазных испытаний заключается в наличии повышенного напряжения не только при отключении первого полюса, но и в течение всего процесса восстановления.

## СТАТИСТИКА ИСПЫТАНИЙ КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ

KEMA проанализировала результаты всех испытаний, проведенных в период с июня 2000 г. по февраль 2011 г., то есть результаты 433 испытаний оборудования на номинальное напряжение в диапазоне 12–550 кВ (полных испытаний в режимах BC1, BC2), 72 различных изготовителей и поставщиков. После детальной оценки для данного исследования были отобраны 297 серий испытаний по критериям полноты документации. Испытания были разбиты на пять групп.

## ИСПЫТАНИЯ, В КОТОРЫХ ИМЕЛ МЕСТО ПОВТОРНЫЙ ПРОБОЙ И КСР

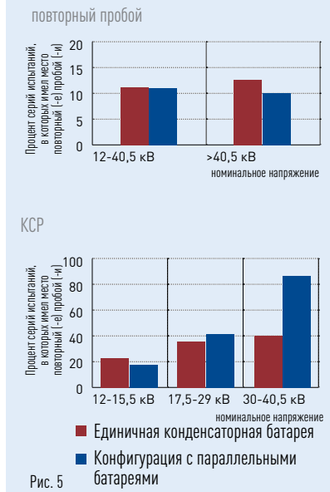



Рис. 5

Из 124 серий испытаний, зачтенных при сертификации и относящихся к испытаниям на отключение емкостных токов, 102 относятся к выключателям класса C2 (причем в 19 из них испытывалась конфигурация с параллельными батареями), а 22 – к выключателям класса C1 (в двух – конфигурация с параллельными батареями).

На рис. 4 показано распределение оборудования для категорий I–IV с единичной конденсаторной батареей и с конфигурацией с параллельными батареями по номинальному напряжению. В 35 сериях испытаний имел место один (или

## ТОКИ В ПЕРИОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПРОБОЯ

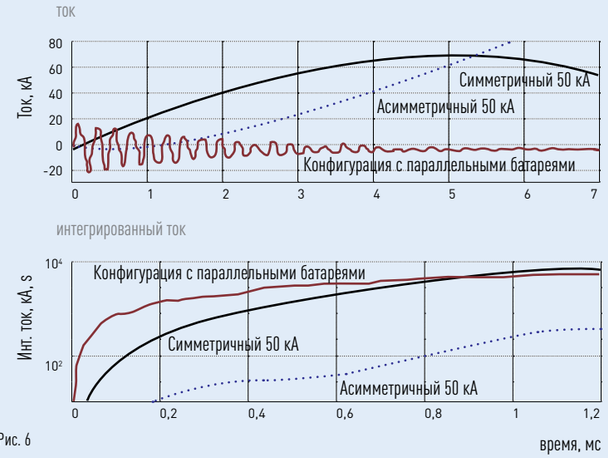



Рис. 6

более) повторный пробой, что составляет 11,3% всех испытаний, в отношении которых имеется достоверная информация. Было установлено отсутствие зависимости возникновения повторного пробоя от напряжения (среднего и высокого) и конфигурации конденсаторной батареи.

Данный вывод проиллюстрирован на рис. 5. Малое число испытаний для единичной конденсаторной батареи и конфигурации с параллельными батареями не позволяет сделать вывод о различии вероятностей возникновения в них пробоев.

В 74 сериях испытаний был выявлен один (или более) кратковременный самоустраняющийся разряд (КСР) (в 51 серии испытаний для единичной конденсаторной батареи и в 23 – для конфигурации с параллельными батареями). Все КСР имели место при испытаниях для номинального напряжения до 40,5 кВ включительно.

На рис. 5 показано количество испытаний, распределенных по трем диапазонам среднего напряжения, в которых имели место КСР. Из рисунка видно, что большое количество КСР имело место при испытаниях оборудования с конфигурацией с параллельными батареями в более высоком диапазоне среднего напряжения.

Так как большинство испытываемой коммутационной аппаратуры на напряжение до 40,5 кВ включительно является вакуумной коммутационной аппаратурой, то эти результаты подтверждают, что КСР представляет собой явление, свойственное исключительно отключению тока в вакууме. Никаких КСР не было выявлено в элегазовой коммутационной аппаратуре. Поскольку КСР имел место в 37% серий испытаний, можно сделать вывод о том, что это нередкое событие. Данный вывод подтверждает более ранние исследования [13], по результатам которых в 32% всех протоколов испытаний (включая протоколы испытаний на короткое замыкание), опубликованных в 1999 г., сообщалось о возникновении КСР.

## НАГРУЗКИ НА ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Бросок тока начинается в момент предварительного пробоя межконтактного промежутка выключателя. С этого момента возникает дуга предварительного пробоя и существует до момента гальванического контакта. В зависимости от частоты броска тока и длительности периода дуги предварительного пробоя в ней могут протекать очень большие токи. На рис. 6 показана энергия дуги (в предположении, что она пропорциональна интегралу тока по времени) при броске тока с пиковым значением 20 кА (по МЭК) и симметричном и несимметричном токе короткого замыкания 50 кА. Ясно видно, что энергия дуги и особенно скорость нарастания энергии очень велики при броске тока для конфигурации с параллельными батареями.

В элегазовых выключателях в условиях предварительного пробоя, сопровождающегося броском тока, скорость нарастания которого при конфигурации с параллельными батареями составляет порядка сотен А/мкс (по сравнению с несколькими десятками А/мкс при включении на ток КЗ), максимальной нагрузке подвергается контактная система. Наличие резко возрастающего тока приводит к быстрому нагреву и расширению газа в межконтактном промежутке. Последнее, в свою очередь, является причиной возникновения ударных волн. Координация изоляции между главными и дугогасительными контактами должна быть такой, чтобы при всех обстоятельствах предварительный пробой имел место только между дугогасительными контактами. Вследствие высокой частоты емкостного разряда скин-эффект смещает основание дуги к периферии неподвижного дугогасительного контакта, что приводит к неравно-



## ТОК АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

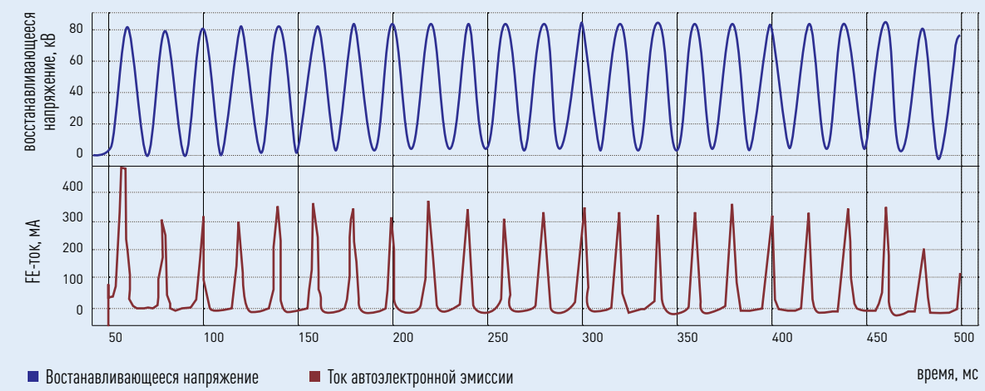



Рис. 7

мерной эрозии материала контактов. В результате после многих коммутационных операций контакт принимает коническую структуру, а не полусферическую, как после включения токов короткого замыкания [14]. Такая форма увеличивает вероятность предварительного пробоя между главными контактами. Это может привести к неправильной работе выключателя [15].

В ряде случаев во время обязательного визуального осмотра контактов после испытаний конфигурации с параллельными батареями были обнаружены отверстия в соплах высоковольтных выключателей, несмотря на отсутствие повторных пробоев [16]. Такие отверстия могут препятствовать повышению давления при отключении тока короткого замыкания.

Вакуумные выключатели не имеют отдельных главных и дугогасительных контактов. Поэтому дуга предварительного пробоя возникает на тех же самых контактах, которые должны выдерживать напряжение в отключенном положении. Большой ток предварительного пробоя при конфигурации с параллельными батареями вызывает локальное плавление контактов и часто их приваривание при касании. Механизм контактов должен быть разработан с учетом возможности отрыва приваренных контактов, но остатки приваренных материалов могут привести к образованию неровностей поверхности и увеличению напряженности электрического поля. Если эти микро-шероховатости не удаляются в достаточной степени при горении электрической дуги отключения, они приведут к снижению электрической прочности контактного промежутка. Таким образом, увеличение отключаемых токов и времени горения дуги ослабляет негативный эффект, связанный с наличием остатков приваренных материалов.

Приваривание (слипание) контактов после включения ведет к остановке испытаний. Также высокая вероятность КСР, наблюдаемая при испытании конфигурации с параллельными батареями нагрузки (рис. 5), может быть объяснена нарушением диэлектрической целостности, вызванным предварительным пробоем и последующим привариванием контактов.

В настоящее время рассматриваются два механизма образования пробоя в вакууме: 1) пробой, вызванный автоэлектронной эмиссией; 2) и пробой, вызванный воздействием заряженных частиц. Исследование механизмов пробоя показывает, что главной причиной повторного пробоя являются микрочастицы, оторвавшиеся от выступов, образовавшихся при размыкании приваренных контактов [17, 18]. Таким образом, можно утверждать, что электронная эмиссия не может служить единственной причиной пробоя в вакууме.

## ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА ПОЛЕВОЙ ЭМИССИИ В ВАКУУМЕ

Отключение емкостных токов – широко распространенный, но и один из самых сложных режимов коммутации вакуумных выключателей, поскольку коммутация меняет поверхность контактов самым неблагоприятным образом [19].

# КУМУЛЯТИВНАЯ КРИВАЯ ТАЭ В ТРЕХ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ. ЦИФРАМИ ПОКАЗАНА ДОЛЯ ИСПЫТАНИЙ С ПОВТОРНЫМИ ПРОБОЯМИ

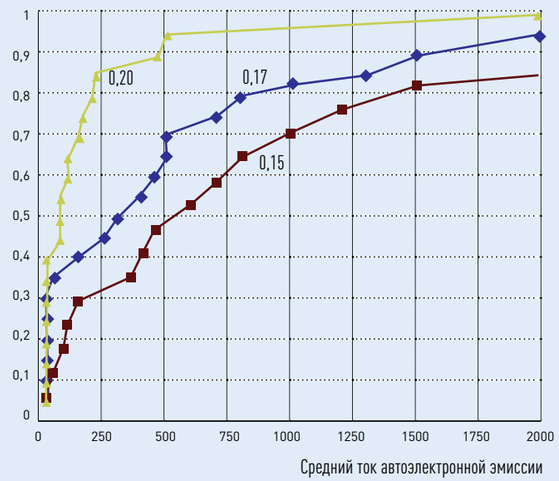



Рис. 8

Для понимания влияния бросков тока на топологию поверхности (и связанного с ними воздействия на электрическую прочность) вакуумных выключателей был разработан метод измерения тока автоэлектронной эмиссии в процессе восстановления напряжения после отключения емкостного тока, в том числе и полного броска тока, нормированного МЭК [20]. Ток автоэлектронной эмиссии (ТАЭ) возникает в результате приложения электрического поля сверхвысокой напряженности, обеспечивающего «прохождение» электронов через поверхностный потенциальный барьер металла. Сверхвысокая напряженность электрического поля является следствием локальной топологии поверхности из-за наличия острых граней, неровностей, выступов, пустот, трещин и т. д.
На практике в вакуумных выключателях были выявлены коэффициенты усиления поля в диапазоне 600–1000, даже при отсутствии бросков тока при включении [20].

## ИЗМЕРЕНИЕ

Метод, первоначально разработанный для исследовательской лаборатории, был адаптирован для использования в лаборатории высоких мощностей KEMA. Поэтому обработка исходных аналоговых данных в режиме реального времени была заменена цифровой обработкой данных в автономном режиме, а система сбора данных была адаптирована для использования в электромагнитно загрязненной среде при любом потенциале датчика измерения тока. Нижний предел измеряемого ТАЭ – 30 мкА. Следовательно, в случае повторного пробоя система измерения способна работать в динамическом диапазоне, превышающем девять десятичных разрядов, то есть от 30 мкА до 50 кА. На рис. 7 представлена распечатка типичных измерений. Обратите внимание на очень быстрое уменьшение ТАЭ при незначительном понижении восстанавливающегося напряжения в конце кривых, описывающих экспоненциальную зависимость ТАЭ от приложенного напряжения [21].

## ИСПЫТАНИЯ

В исследованиях было задействовано девять опытных образцов вакуумных дугогасительных камер различной конструкции и с различными контактными материалами (в трех идентичных выключателях). Все испытания проводились в однофазной схеме, обеспечивающей емкостный ток 400 А при номинальном напряжении 36 кВ, с учетом требований стандарта МЭК для конфигурации с параллельными батареями (пиковое значение тока 20 кА при 4250 Гц). Все вакуумные дугогасительные камеры были предварительно испытаны при 60% значения тока короткого замыкания в соответствии с требованием для выключателей класса С2.

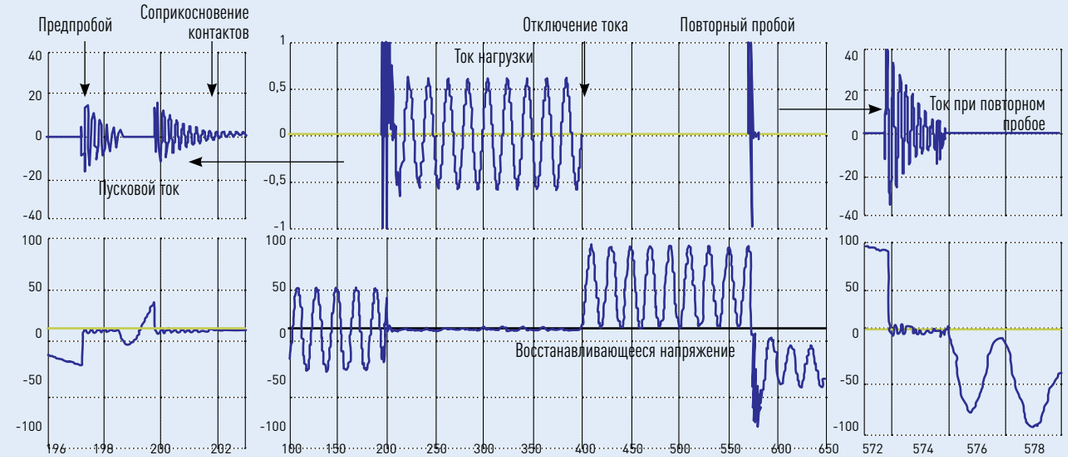
Контакты одной дугогасительной камеры приварились уже в ходе первых испытаний. В восьми других дугогасительных камерах при проведении 125 полных циклов включение-отключение (В-О) произошло 15 повторных пробоев. Максимальное значение наблюдаемого ТАЭ составляет 4 тыс. мкА. Как правило, первый пик ТАЭ значительно превышает последующие (рис. 7 и 10).

В одном случае ТАЭ появился только через 90 мс даже без повторного пробоя.

Анализ большого количества ТАЭ-сигналов не выявил взаимнооднозначного соответствия между средним уровнем ТАЭ в период восстановления напряжения и возникновением повторного пробоя. Имелись случаи, когда ТАЭ достигал значения 1100 мкА при отсутствии повторного пробоя, и случаи, когда значение ТАЭ было ниже порогового и при наличии повторного пробоя.



# ОДНОФАЗНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНФИГУРАЦИИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ БАТАРЕЯМИ




Ток (вверху), кА, и напряжение дугогасительной камеры, кВ (внизу). Слева: период предварительного пробоя, расширен. В середине: полный цикл. Справа: период повторного пробоя, расширен.

Рис. 9

Тем не менее статистический анализ результатов испытаний позволяет выявить различия в активности автоэлектронной эмиссии между дугогасительными камерами.

Для примера на рис. 8 показано распределение ТАЭ для трех различных дугогасительных камер (в одном и том же выключателе), имеющих одинаковую конструкцию, но различные контактные материалы. Как можно видеть, никакой зависимости между величиной ТАЭ и вероятностью повторного пробоя не существует.

## ВЛИЯНИЕ БРОСКА ТОКА

Во многих случаях вакуумный выключатель может отключать броски тока благодаря присущему вакууму свойству отключать токи с очень высоким di/dt. Это приводит к «бестоковому периоду» в течение предварительного пробоя. Несмотря на отсутствие дугового разряда, конденсаторная батарея вновь перезаряжается, и последующий пробой возникает при большем значении заряда. Результат измерений показан на рис. 9. В таких случаях бросок тока создает дополнительную нагрузку (большая энергия дуги) на дугогасительное устройство. Следует обратить внимание на повторный пробой при проведении этого испытания через 171 мс после нуля тока (рис. 9). При этом никаких предварительных признаков этого события со стороны повышенного ТАЭ не наблюдалось. Поскольку повторный пробой имел место вблизи максимума восстанавливающего напряжения, ток повторного пробоя (пиковое значение 39 кА) почти вдвое превышал значение броска тока.

Существует определенная зависимость между величиной броска тока и уровнем ТАЭ.

Во всех случаях при низком броске тока (пик менее 10 кА) имел место более низкий ТАЭ. Однако этого нельзя сказать об обратном: большой пусковой ток (20 кА) не обязательно приводит к высокому уровню ТАЭ. На рис. 10 показаны результаты типичных испытаний при малом и высоком значениях броска тока.

## КОНДИЦИОНИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ

Считается, что после размыкания контактов дуга емкостного тока оказывает положительный кондиционирующий эффект на поверхность контактов вакуумного выключателя [22, 23]. Как правило, поверхность становится более гладкой вследствие термического воздействия небольших активных пятен катода дугового разряда (точек основания электрической дуги). Чем выше номинальный емкостный ток и чем больше его длительность (время горения дуги), тем значительнее этот эффект. Больший емкостный ток подразумевает большее количество активных пятен

## ВЛИЯНИЕ БРОСКОВ ТОКА НА ТАЭ ПОСЛЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ ЕМКОСТНОГО ТОКА 400 А

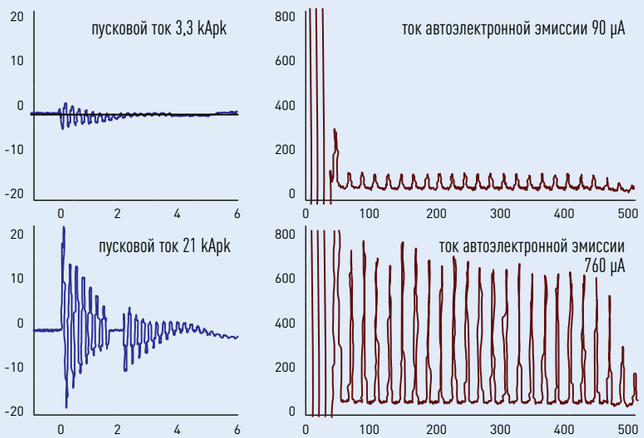



Рис. 10

Внизу: большой ток. Вверху: малый ток

катода, а более длительное время горения дуги означает, что большая площадь поверхности потенциально охвачена активными пятнами катода. Таким образом, неблагоприятное влияние разрывов мест приваривания на электрические характеристики до некоторой степени компенсируется.

Влияние длительности дугового разряда на ТАЭ может быть продемонстрировано соответствующими измерениями. На рис. 11 показаны кумулятивные кривые распределения ТАЭ для короткого времени горения дуги (< 3,3 мс), для умеренного времени горения дуги (3,3–6,6 мс) и для длительного времени горения дуги (> 6,6 мс). На основании статистического анализа было предложено выполнять кондиционирование с помощью дугового разряда при длительном времени горения дуги. Следует подчеркнуть, что при длительных временах горения дуги почти в 50% случаев значение ТАЭ остается ниже порогового значения измерений.

## ВЫВОДЫ

- Большие броски тока, возникающие при включении конденсаторной батареи, когда другие, включенные параллельно, батареи уже находятся в работе, приводят к возникновению опасных воздействий на контактную систему выключателей.
- Элегазовые выключатели должны разрабатываться таким образом, чтобы они были способны выдерживать механические ударные волны, и с учетом неравномерности износа дугогасительных контактов.
- В ходе испытаний в KEMA повторные пробои были выявлены примерно в 10% всех испытаний конденсаторных батарей. Кратковременные, самовосстанавливающиеся пробои возникают исключительно в вакуумных выключателях и очень часто в случаях параллельных батарей с номинальными напряжениями более 30 кВ.
- Для вакуумных выключателей характерны опасные изменения микроструктуры контактов, вызванные их локальным привариванием в процессе включения при наличии броска тока. Автоэлектронная эмиссия сама по себе не может служить причиной повторного пробоя при отключении емкостных токов. Четкой зависимости интенсивности установившегося тока эмиссии от вероятности повторного пробоя не установлено.
- Что касается интенсивности тока автоэлектронной эмиссии, то различные выключатели и дугогасительные устройства ведут себя различным образом.
- Как следует из статистического анализа, при более длительных временах горения дуги при номинальном емкостном токе образуются токи автоэлектронной эмиссии меньших значений. Причина состоит в кондиционировании контактов дуговым разрядом.
- При бросках тока с пиковыми значениями менее 10 кА имеет место исключительно низкая интенсивность ТАЭ.



## ЛИТЕРАТУРА

1. CIGRE WG 13.04. Capacitive current switching – State of the art/Electra, No. 155, 1994. – pp. 33–63.
2. Greenwood A. Electrical transients in power systems. – John Wiley & Sons, 1991. ISBN 0–471–62058–0.
3. CIGRE WG A3.06. Final report of the 2004–2007 Int. enquiry of HV equipment, part 2 – Reliability of high-voltage $SF_6$ circuit breakers. CIGRE TB XX, A3–11 (SC) 13 IWD, 2011.
4. CIGRE SC 13. Circuit-breaker stresses when switching back-to-back capacitor banks/Electra, No. 62, 1979. – pp. 21–45.
5. CIGRE WG 36.05/CIRED 2 CC02. Capacitor switching and its impact on power quality/Electra, No. 195, 2001. – pp. 27–37.
6. Sabot A., Morin C., Guilliaume C., Pons A., Taisne J. P., Lo Pizzo G., Morf U. A unique multipurpose damping circuit for shunt capacitor bank switching. IEEE Trans. on pow. del., vol. 8, No. 3, 1993. – pp. 1173–1183.
7. CIGRE WG13.04. Shunt capacitor bank switching, Stresses and test methods (2nd part)/Electra, No. 183, 1999. – pp. 13–41.
8. IEC 62271–100 High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers Ed. 2.0, 2008.
9. IEEE C37.09a IEEE Standard test procedures for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical basis – Amendment 1: Capacitance current switching, 2005.
10. CIGRE Technical brochure 305 Guide for application of IEC 62271–100 and IEC 62271–1 – Part 2. Making and breaking tests, 2006.
11. IEEE Application guide for capacitance current switching for AC high-voltage circuit breakers, IEEE C37–012, 2005.
12. IEEE Std.13.06, IEEE Standard for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis – Preferred ratings and related required capabilities for voltages above 1000 V, IEEE PES, 2009.
13. Smeets R. P. P., Lathouwers A. G. A., Falkingham L. T. Assessment of non-sustained disruptive discharges (NSDD) in switchgear. Test experience and standardisation status. CIGRE Conference, 2004. – paper A3–303.
14. Silva F. da, Bak C., Hansen M. Back-to-back energization of a 60 kV cable network – inrush currents phenomenon. IEEE PES General meeting, 2010. – pp. 1–6.
15. Kasztenny B., Voloh I., Depew A., Wolete J., Pickett B., Signo-Diaz M., Meinardi J. Re-strike and breaker failure conditions for circuit breakers connecting capacitor banks. 61st Ann. Conf. for prot. relay eng., 2008. – pp. 180–195.
16. Smeets R. P. P., Lathouwers A. G. A. Capacitive current switching duties of high-voltage circuit breakers: background and practice of new IEC requirements, IEEE PES Winter meeting, Singapore, 2000. – paper nr. 2000 WM-690.
17. Kamikawaji T., Shiori T., Funahashi T., Satoh Y., Kaneko E., Ohshima I. An investigation into major factors in shunt capacitor switching performances by vacuum circuit breakers with copper-chromium contacts. IEEE Trans. pow. del., vol. 8, No. 4, 1993. – pp. 1789–1795.
18. Schlaug M., Dalmazio L., Ernst U., Godechot X., Kantas S., Triaire C. Late breakdown phenomena in vacuum interr upters. XXIIInd Int. symp. on disch. and elec. insul. in vacuum, 2008. – pp. 247.
19. Dullni E., Shang W., Gentsch D., Kleberg I., Niayesh K. Switching of capacitive currents and the correlation of restrike and pre-ignition behavior. IEEE Trans. on diel. and electr. insul., vol. 13, No.1, 2006. – pp. 65–71.
20. Koochack-Zadeh M., Hinrichsen V., Smeets R., Lawall A. Field emission currents in vacuum breakers after capacitive switching. IEEEE Trans. on diel. and elec. insul., vol. 18, No. 3, 2011. – pp. 910–917.
21. Davies D. K., Biondi M. A. Vacuum electrical breakdown between plane-parallel copper plates/Journ. of appl. phys., vol. 37, 1966. – pp. 2969–2977.
22. Slade P. G. The vacuum interrupter . Theory, design and application. CRC Press. ISBN 978–0–8493–9091–3, 2008.
23. Sandolache G., Ernst U., Godechot X., Kantas S., Hairour M., Dalmazio L. Switching of capacitive current with vacuum interrupters. 24th Int. symp. on disch. and elec. insul. in vacuum, 2010. – pp. 129.

## КУМУЛЯТИВНАЯ КРИВАЯ ТАЭ ДЛЯ ТРЕХ КЛАССОВ ГОРЕНИЯ ДУГИ

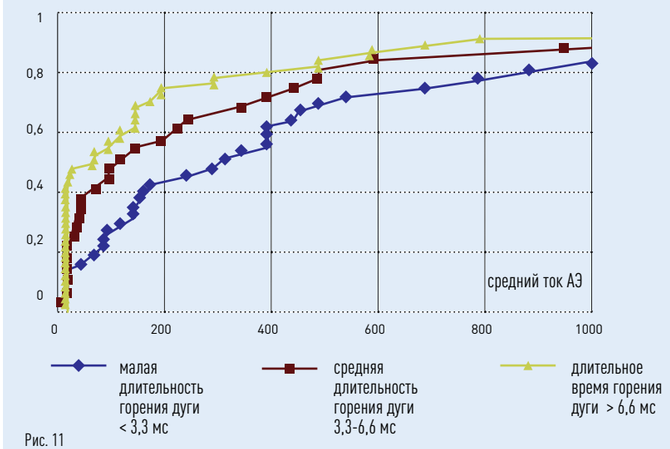



Рис. 11