



Некоммерческое партнерство «Российский национальный комитет Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения» (РНК СИГРЭ)

109074, Россия, г. Москва, Китайгородский проезд, дом 7, стр.3. ОГРН 1037704033817.  
ИНН 7704266666 / КПП 770501001. Тел.: +7 (495) 627-85-70. E-mail: [cigre@cigre.ru](mailto:cigre@cigre.ru)

## ОТЧЕТ

об участии в 45-й Сессии CIGRE и работе Исследовательского Комитета  
А3 «Высоковольтное оборудование» CIGRE,  
25-29 августа 2014 года, Париж (Франция)



Отчет подготовил:

Иванов Валерий Павлович,

член CIGRE с 2006 г., наблюдательный член Study Committee CIGRE А3 “High Voltage Equipment” от РНК СИГРЭ с 2012 г., заместитель начальника Научно-исследовательского центра «Высоковольтное коммутационное оборудование» ФГУП ВЭИ (Москва)



Контактные данные:

E-mail: [ivanov@vei.ru](mailto:ivanov@vei.ru)

Тел. +7 (495) 361-96-40

Дата отчета:

28.10.2014

Москва,  
2014 год

## Оглавление

1.	Вступление	3
2.	Сессия докладов	4
3.	Предпочтительная тема 1 «Оборудование для удовлетворения меняющихся условий сети»	5
3.1.	Шунтирующие реакторы и коммутация шунтирующих реакторов	5
3.2.	Высоковольтные выключатели постоянного тока	6
3.3.	Измерительные трансформаторы	8
3.4.	Выключатели ультравысокого напряжения	9
3.5.	Разъединители	9
3.6.	Ограничители тока	10
4.	Предпочтительная тема 2 «Управление продолжительностью срока службы и старением оборудования передачи и распределения»	11
4.1.	Управление жизненным циклом оборудования	11
4.2.	Управляемая коммутация	12
4.3.	Выключатели	15
5.	Предпочтительная тема 3 «Воздействие экстремальных условий эксплуатации на оборудование передачи и распределения»	19
6.	Материалы рабочих групп, рассмотренные на Сессии	23
7.	Заключение	24
8.	Приложение	25

## 1. Вступление

К сфере деятельности исследовательского комитета АЗ комитета относятся теоретические исследования, разработка, проектирование, эксплуатация высоковольтного оборудования, взаимодействие этого оборудования с другими компонентами системы в нормальных и аварийных режимах работы, испытаний и стандартизации оборудования, обеспечение качества, надежности, обслуживания и управления.

Деятельность ИК АЗ сфокусирована на следующих направлениях:

- Повышение надёжности ВВ оборудования.

- Исследования в области управления сроком службы стареющего существующего ВВ оборудования, выработки решений о реконструкции или обновлении компонентов подстанций или их замены, включая вывод из работы и ликвидацию старых подстанций, методов испытаний ВВ и УВН оборудования в экстремальных условиях. ИК должен разрабатывать соответствующие руководства и исходные документы для разработки стандартов в этой области.

- Применение новых и альтернативных технологий в ВВ оборудовании подстанций таких, как нетрадиционные измерители токов и напряжений, ограничители токов короткого замыкания, интеллектуальное управление коммутационным оборудованием и интеграция его в системы защиты и автоматики, новые типы внешней и внутренней изоляции.

- Развитие оборудования ультравысокого напряжения (УВН) и связанных с ним методик испытаний, стандартизация, вопросы связанные с влиянием на окружающую среду и др.

В последние годы особенно уделяется внимание разработкам и созданию оборудования для «умных» сетей и их внедрение на различных объектах электроэнергетики, снижение влияния энергетики на окружающую среду, снижение риска крупных аварий, повышение экологической и промышленной безопасности, ремонт, модернизация и продление срока службы оборудования, мониторинг оборудования и энергетических систем в режиме реального времени, опытно-конструкторские работы в области оборудования постоянного тока, информационные системы.

Председатель комитета Доктор Нироки Ито

Секретарь и Webmaster Френк Рихтор

Chairman: Dr. Hiroki Ito

Secretary and Webmaster: Frank Richter

## 2. Сессия докладов

На данной сессии к рассмотрению были предложены три предпочтительные темы, вопросы по которым объединены в следующие направления:

<b>Preferential Subject 1</b> <b>«Equipment to cater for changing network conditions»</b>	<b>Предпочтительная тема 1</b> <b>«Оборудование для удовлетворения меняющихся условий сети»</b>
AC and DC substation equipment to meet new demands	Оборудование подстанций переменного и постоянного тока, соответствующее новым требованиям
Equipment for future distribution systems	Оборудование для будущих систем распределения
New requirements for design, testing and equipment modeling	Новые требования к проектированию, тестированию и моделированию оборудования
<b>Preferential Subject 2</b> <b>«Lifetime management and ageing of T&amp;D equipment»</b>	<b>Предпочтительная тема 2 «Управление продолжительностью срока службы и старением оборудования передачи и распределения»</b>
Maintenance, monitoring and equipment diagnosis	Техническое обслуживание, контроль и диагностика оборудования
Influence of asset management practices, operating duty and stresses on reliability	Влияние методов управления основными производственными фондами, режимом работы на надежность
<b>Preferential Subject 3</b> <b>«Impact of extreme operating conditions on T&amp;D equipment»</b>	<b>Предпочтительная тема 3</b> <b>«Воздействие экстремальных условий эксплуатации на оборудование передачи и распределения»</b>
Environmental stresses e.g. temperature, humidity, earthquake, wind, heavy rain, altitude	Воздействие окружающей среды, например, температура, влажность, землетрясения, ветер, сильный дождь, высота
System stresses and over-stressing e.g. short-circuit current, temporary overvoltage, transient recovery voltage, uprating or higher operating voltages	Системные и чрезмерные нагрузки, например, токи короткого замыкания, временные перенапряжения, переходное восстанавливающееся напряжение, повышение рабочего напряжения, рабочее напряжение
Operational regime	Эксплуатационные режимы

Всего на сессии было представлено 27 докладов, 15 по первой предпочтительной теме, и по шесть по второй и третьей предпочтительным темам.

Специальными докладчиками были Антон Жансен из Нидерландов и Антонио Карлос Карвало из Бразилии.

### 3. Предпочтительная тема 1 «Оборудование для удовлетворения меняющихся условий сети»

Тенденции развития электроэнергетических систем (ЭЭС), тесно связанные с общим экономическим развитием, характеризуются устойчивым ростом электрических нагрузок и соответствующим увеличением генерирующих мощностей, усилением связей соседних ЭЭС и созданием крупных объединенных систем. Всё это приводит к изменению требований к электрооборудованию передачи и распределения электроэнергии и разработке нового оборудования. На эту тему было представлено 15 докладов:

- шунтирующие реакторы и коммутация шунтирующих реакторов (А3-101, 113);
- высоковольтные выключатели постоянного тока ВВПТ (А3-114);
- измерительные трансформаторы, включая ВВПТ, делители напряжения (А3-106, 107, 109, 111, 112);
- ультровысоковольтные (УВВ) выключатели (А3-104, 115);
- разъединители, в том числе УВВ (А3-102, 103, 110);
- ограничители токов короткого замыкания (ОТКЗ), включая устройства ограничения тока нагрузки (А3-105, 108).

#### 3.1. Шунтирующие реакторы и коммутация шунтирующих реакторов

В докладе А3-101 представлена новая конструкция сухих шунтирующих реакторов (Рис. 1).

Реакторы состоят из отдельных модулей и в каждой фазе собираются на нужное напряжение, устанавливаются один над другим и/или рядом и соединяются последовательно.

В эксплуатации находится образец на 345 кВ. Представлены расчёты магнитных полей, создаваемых реакторам, результаты их испытаний. В докладе отмечено преимущество новой конструкции, – гораздо меньшие, по сравнению с маслонаполненными реакторами, ёмкости обмоток на землю и, как следствие, крутые фронты переходных восстанавливающихся напряжений ПВН при коммутациях выключателем, вызванные повторными пробоями на расходящихся или сходящихся контактах выключателей и высокочастотные перенапряжения, не охватываемых МЭК 62271-110. В докладе приводятся также способы выравнивания напряжения последовательно соединённых модулей реакторов и методы снижения уровней коммутационных перенапряжений таких, как дополнительные конденсаторы и RC цепочки.



Рис. 1 Сухой шунтирующий реактор на 345 кВ, 20 МВА, 60 Гц, 3 фазы

**Доклад АЗ-113** также посвящен проблеме коммутации шунтирующих реакторов. Обсуждаются и сравниваются различные методы и способы коммутации, включая аспекты управляемой коммутации.

Предлагается создавать устройства специально для коммутации шунтирующих реакторов. Предложено новое коммутационное устройство на класс напряжения 360 кВ, предназначенное специально для коммутации шунтирующих реакторов и результаты его тестовых испытаний. Устройство состоит из двух последовательно соединённых выключателей на 245 кВ с малым временем отключения и со встроенным контроллером для управляемой коммутации, каждый из которых шунтирован ОПН.

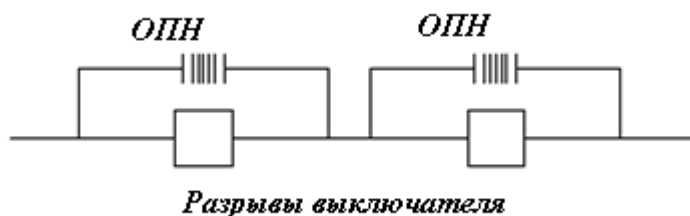


Рис. 2 Электрическая схема фазы выключателя

На рис. 2 показана электрическая схема фазы выключателя. Предлагается развивать такую концепцию коммутации шунтирующих реакторов как перспективную, для чего требуются дальнейшие технико-экономические исследования.

### 3.2. Высоковольтные выключатели постоянного тока

**Доклад АЗ-114** посвящён проблемам коммутации постоянного тока высокого напряжения. Представлены обзор и сравнение методов коммутации постоянного тока высокого напряжения, таких как активная, пассивная и гибридная коммутации.

Суть первого метода основана на искусственном снижении тока в электрической дуге отключения на контактах выключателя переменного тока до нуля путем разряда предварительно заряженного конденсатора током обратного направления относительно направления отключаемого тока с величиной амплитуды тока, превышающей отключаемый ток (Рис. 3).

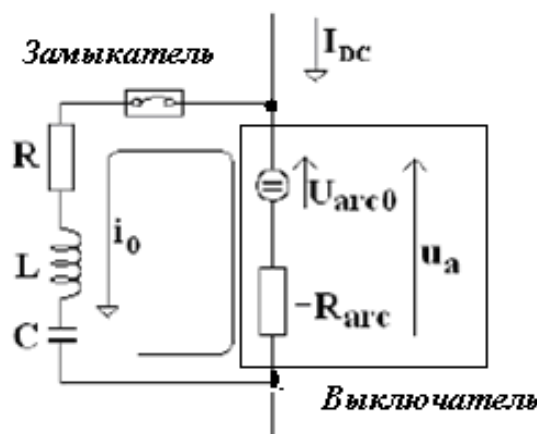


Рис.3 Упрощённая схема выключателя ПТ

Этот метод используется в основном в выключателях постоянного тока на основе вакуумных дугогасительных камер.

Второй метод аналогичен первому, только в LC цепи, подключаемой параллельно контактам выключателя, конденсатор предварительно не заряжен, и требуется замыкатель. В этом методе используется отрицательная вольт-амперная характеристика дуги отключения, которая приводит к отрицательному динамиче-

скому сопротивлению дуги. За счёт этого эффекта происходит раскачка тока в LC контуре до достижения амплитудой тока величины большей отключаемому, и отключение происходит в нуле тока дуги. Этот метод может применяться в газодутьевых выключателях.

Третий метод – использование гибридных схем, в которых параллельно контактам выключателя подключаются полупроводниковые ключи (Рис. 4).

При этом методе механический выключатель служит для длительного пропускания тока и перевода тока в полупроводниковый ключ, в котором и происходит прерывание тока через время, достаточное для набора необходимой электропрочности межконтактного промежутка выключателя. Размыкание контактов выключателя происходит практически без дуги. Снабберная цепь и поглотитель энергии служат для ограничения скорости роста и уровня напряжения.

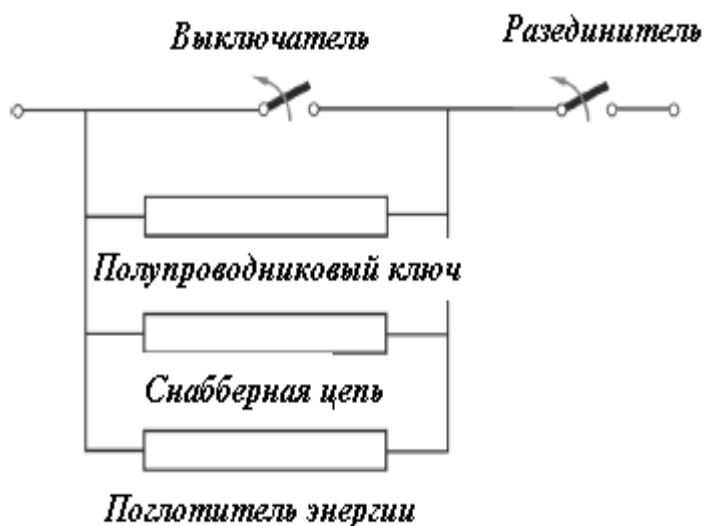


Рис. 4 Гибридный выключатель

При всех методах предусматривается уменьшение времени расхождения контактов выключателей до величин менее 10 мс, способность их дугогасительных промежутков выдерживать скорости роста восстанавливающегося напряжения  $dU/dt$  до нескольких кВ/мкс при скоростях спада тока до нуля  $dI/dt$  более 1 кА/мкс.

Вторая основная тема доклада – методы испытаний выключателей постоянного тока. Рассматриваются следующие испытательные схемы:

1) использование генераторов с пониженной частотой и прерывание тока вблизи его амплитуды;

2) использование индуктивного накопителя энергии (реактора) с зарядкой его от трёхфазного генератора, с подключением каждой фазы генератора к реактору в такой последовательности, чтобы ток в реакторе протекал в одном и том же направлении;

3) использование нулевого провода для получения квази постоянного тока, с включением каждой фазы генератора на короткое замыкание в определённой последовательности.

В 3-ем разделе представлены:

результаты численного моделирования процесса отключения постоянного тока элегазовым выключателем методом противотока с использованием динамической модели дуги отключения с отрицательной вольт-амперной характеристикой;

результаты тестовых испытаний при токах до 1 кА при напряжении до 245 кВ.

### 3.3. Измерительные трансформаторы

Пять докладов посвящены измерительным трансформаторам.

**В докладе АЗ-106** кратко представлены новые разработки измерительных трансформаторов напряжения ЕТН, основанных на ёмкостных делителях ЕД для прецизионного измерения в сетях постоянного тока на напряжение до 1000 кВ, а также результаты калибровки счётчиков электроэнергии основанных на этих измерительных преобразователях напряжения в ведущих лабораториях Европы и Японии.

**В докладе АЗ-107** представляется новая система, которая позволяет определить с минимальной ошибкой дефекты всех емкостных трансформаторов напряжения. Основой системы служит беспроводной Измерительный мост, который получает данные через WiFi для сравнения с эталоном. Это позволяет выполнять профилактическое обслуживание и диагностику ЕТН всех классов напряжения, находящихся под напряжением, без подключения каких-либо кабелей с помощью лёгкого портативного прибора, а также избежать ненужных рисков в отношении безопасности персонала.

**В докладе АЗ-109** представлены результаты испытаний трансформаторов тока ТТ новой конструкции с точки зрения экологической безопасности, надёжности и стойкости к экстремальным климатическим воздействиям (в частности электропрочность при воздействии соляного тумана и т.п.).

Внешняя изоляция ТТ выполнена из полимерных материалов, внутренняя изоляция элегазовая. Испытаниям подвергались изоляторы разных производителей, испытания проводились в институтах STRI (Ludvika, Швеция) и RSE (Милан, Италия). Испытания показали положительные результаты.

**Доклад АЗ-111** посвящён конструктивным особенностям ЕТН. В докладе представлены новые возможности измерения напряжения в электрических сетях высокого напряжения с очень высокой точностью в диапазоне частот, начиная от постоянного тока до нескольких кГц с помощью RC-делителей, используемых для измерения качества питания.

Описаны теоретические аспекты технических решений, которые объясняют преимущество такого рода технологии. Представлены результаты лабораторного тестирования оборудования на основе RC-делителей, подтверждающие заявленные характеристики.

**В докладе АЗ-112** представлены новые решения для постоянно развивающихся распределительных интеллектуальных энергосистем (Smart Grid). В представленных решениях используются катушки Роговского (трансформаторы тока без магнитопровода) в качестве датчиков тока, высоковольтные RC делители напряжения в качестве датчиков напряжения, и многофункциональные цифровые реле, предназначенные для расширения технологии цифровой связи. Основное внимание уделяется конструкциям устройств с катушками Роговского, выполнен-



ных на основе печатных плат, поскольку они существенно влияют на эффективность работы релейной защиты и автоматики (РЗА).

Представлены результаты тестовых испытаний всей системы РЗА, выполненной по новой технологии. Результаты испытаний подтвердили, что защита на основе цифрового реле в совокупности с ТТ на основе катушки Роговского обладает достаточной точностью и надежно выполняет функции РЗА во всех типах распределительных систем.

### 3.4. Выключатели ультравысокого напряжения

Выключателям ультравысокого напряжения посвящено 2 доклада.

**В докладе АЗ-104** приводятся и обсуждаются результаты модельных исследований одного из основных параметров для выключателей – переходных восстанавливаемых напряжений ПВН – для типовых индийских энергосистем на напряжение 1200 кВ.

Моделирование осуществлялось с помощью программного обеспечения EMTP-RV. Для определения параметров ПВН при коммутациях проводились расчёты для различных режимов работы энергосистем и аварийных ситуаций (при коротких замыканиях в линиях, в условиях рассогласования фаз, при отключениях и включениях емкостных токов ненагруженных воздушных линий, при отключениях и включениях шунтирующих реакторов, др.).

**В докладе АЗ-115** кратко изложены результаты модельных исследований, выводы и рекомендации РГ А28 для IEC TC 17a, в предмет исследования которой входили явления, происходящие в коммутационном оборудовании сверхвысокого и ультравысокого напряжения. Полные результаты исследований были опубликованы от имени SC A3 CIGRE в Технической брошюре № 570, февраль 2014 года.

### 3.5. Разъединители

Разъединителям посвящено 3 доклада.

**В докладе АЗ-102** представлены результаты численного моделирования, тестовых и полномасштабных испытаний элегазовой изоляции в ультровысоковольтных КРУЭ при воздействии высокочастотных перенапряжений, возникающих при оперировании разъединителями.

**В докладе АЗ-103** приводятся результаты испытаний разъединителей типа пантограф при коммутации емкостных токов до 1 А в распредустройствах 400 кВ.

Дополнительные испытания вызваны тенденцией к возможному расширению подстанций и, следовательно, к увеличению емкостей шинопроводов и емкостных токов. Обсуждаются результаты испытаний и рекомендации в отношении возможности эксплуатации существующих разъединителей с воздушной изоляцией в случае увеличения емкостных токов до 1 А, т.е. гораздо больших, чем в рекомендациях МЭК 62271-305.

**В докладе АЗ-110** представлен альтернативный IEC 62271-102 метод испытаний шинных разъединителей КРУЭ в условиях протекания больших токов в параллельной шине. Предложенный метод предполагает использование LC-резонансного источника тока с регулируемой резонансной частотой и с большой начальной запасаемой энергией конденсаторов. Ток от источника пропускается через два параллельных сопротивления (импеданса), эмитирующих различные секции сборных шин. Испытуемый разъединитель устанавливается рядом с одним из сопротивлений. Представлены результаты тестовых испытаний разъединителей этим методом и предложения о целесообразности его применения.

### 3.6. Ограничители тока

По ограничению тока представлены два доклада.

**В докладе АЗ-105** обсуждаются возможности применения сверхпроводящих резистивных ограничителей тока короткого замыкания СП ОТКЗ в финских распределительных сетях высокого напряжения, в частности, в сетях 110 кВ региона Хельсинки. Представлены результаты численного моделирования токов КЗ. На их основе оценивается техническая и экономическая эффективность СП ОТКЗ, его основные параметры, предпочтительные места установки.

**В докладе АЗ-108** представлено устройство управления потоком мощности (Контроллер перегрузки линии OLC) для гибких систем передачи электроэнергии переменным током (FACTS) высокого напряжения для распределительных сетей Испании (в основном, класс напряжения 220 кВ), и описан принцип его работы.

Устройство сочетает в себе традиционное электрическое оборудование, выключатели и реакторы, систему управления, обеспечивающую контроль нагрузки линии и эффективную реакцию в течение нескольких секунд. Основной целью является улучшение гибкости систем передачи электроэнергии за счёт регулирования потоков мощности.

Устройство состоит из нескольких последовательно соединённых реакторов, каждый из которых шунтирован выключателем, включённых в разрыв линии передач и системы управления на базе микропроцессора с системой управления, основанной на концепции MACH™ (Рис. 5).

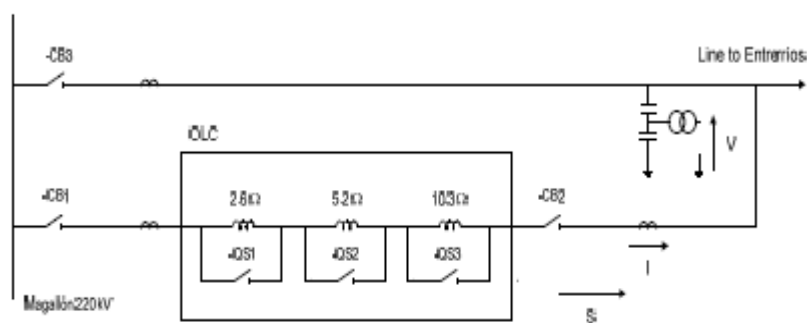


Рис. 5 Линейная диаграмма одной фазы OLC

Работа устройства основана на вариации значения сопротивления линии путем включения оптимального количества реакторов, которое вычисляется системой управления для достижения оптимального режима работы сети.

## **4. Предпочтительная тема 2 «Управление продолжительностью срока службы и старением оборудования передачи и распределения»**

Последнее десятилетие тема управления временем жизни и старением ВВ оборудования подстанции вызывает большой интерес для SC A3.

WG A3.29 рассматривает вопросы, связанные с ухудшением и старением ВВ оборудования, и WG A3.30 изучает перенапряжённое оборудование подстанции. Указанная тема обозначалась как предпочтительная на 43-й Сессии CIGRE (2010), на 44-й Сессии CIGRE (2012), на технических коллоквиумах SC A3 в Рио-де-Жанейро (2007), в Вене (2011) и Окленде (2013). На 45-й Сессии CIGRE 2014 г. эта тема снова определена как предпочтительная, и ей посвящено шесть докладов.

Доклад A3-206 посвящён проблемам и практическим решениям управления жизненным циклом высоковольтного оборудования, в целом. Три доклада посвящены выключателям – A3-201, A3-202 и A3-205. Управляемая коммутация рассматривается в докладах A3-203 и A3-204. В докладе A3-303 управляемая коммутация сравнивается с применением предварительного включения резисторов, и потому доклад обсуждался в рамках ПТ 3. Доклад A3-113 посвящён, главным образом, коммутации шунтирующих реакторов, и поэтому зарегистрирован в ПТ 1. Однако в нём также рассматривается применение управляемой коммутации, и поэтому он обсуждался также в ПТ2.

### **4.1. Управление жизненным циклом оборудования**

Доклад A3-206 посвящен процессам управления жизненным циклом оборудования в румынской распределительной сети компании Transelectrica SA. При управлении используются он-лайн мониторинг, оф-лайн измерения и экспертные оценки. На примере выключателя 420 кВ показано практическое применение этих методов при управлении.

В докладе объясняется техническое и нормативное определения конца жизни, которые берутся за основу процесса продления срока службы оборудования. При достижении срока службы или нормированного (паспортного) значения ресурса (полезная жизнь в докладе) оборудование по-прежнему может оставаться в эксплуатации, в зависимости от его состояния и производительности. Нормативные правила позволяют эксплуатировать это оборудование до выработки им физического (фактического) срока службы или ресурса. Для принятия решения о сроке дальнейшей эксплуатации в рамках этого процесса выполняется оценка остаточного ресурса.

Оценка осуществляется на основе он-лайн мониторинга данных, собранных с момента ввода оборудования в эксплуатацию, и на офф-лайн измерениях и испытаниях. Пример процесса продления жизни оборудования, представленный в докладе, является основой для эксплуатирующих организаций оборудования передачи и распределения. На основе экспертных оценок прогнозируется остаточный ресурс эксплуатируемого оборудования. Суть процесса решения: стоит ли продлевать жизнь оборудования по более высокой стоимости обслуживания или

запланировать его замену. На этом этапе учитывается экономическая сторона вопроса.

## 4.2. Управляемая коммутация

В докладе АЗ-203 представлен краткий анализ и выводы 20-летнего опыта эксплуатации высоковольтных выключателей с установленными на них устройством управляемой коммутации (controlled switching device CSD) в сетях на различных уровнях напряжения от 120 kV до 735 kV и в экстремальных условиях окружающей среды: от -40°C до + 40°C.

Авторы показывают эффективность и проблемы использования управляемой коммутации для подключения шунтирующих реакторов (MSR), конденсаторов (MSC) и, совсем недавно, силовых трансформаторов.

Так декомпенсация дрейфа времени срабатывания сетевых выключателей может иметь значительные последствия для электросетей. Например, скачки тока и напряжения являются прямым результатом коммутации батарей конденсаторов или силовых трансформаторов в самый неподходящий момент. Кроме того, возможны повторные пробои, если шунтирующие реакторы отключаются слишком быстро, с малым временем горения дуги, тем самым нарушая прочность аппарата. Поэтому необходимо принимать контрмеры.

Первое устройство управляемой коммутации (CSD) в Гидро-Квебеке было успешно установлено на работающем выключателе более 20 лет назад. С тех пор CSD-технологии и функциональные возможности успешно развивались для применения в аппаратах управления тремя основными типами нагрузки: шунтирующими реакторами (MSR); конденсаторами (MSC); и, позже, силовыми трансформаторами. CSD введены в эксплуатацию более чем на 140 существующих выключателях (как старых, так и новых) в распределительной сети Гидро-Квебека на различные уровни напряжения от 120 кВ до 735 кВ, и в экстремальных условиях окружающей среды от - 40 °С до + 40 °С .

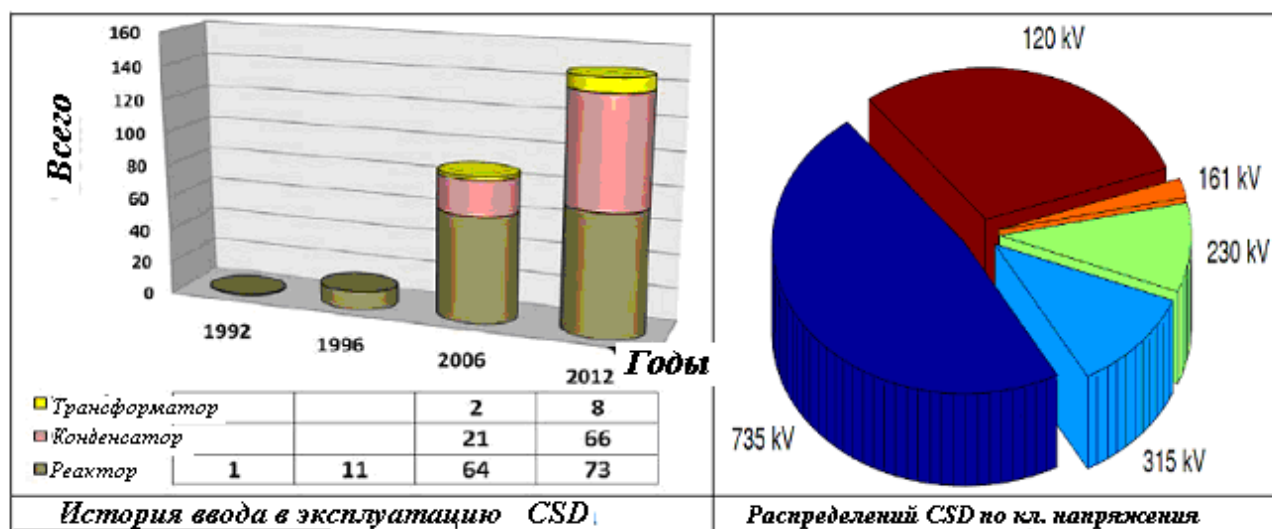


Рис. 6 Установленные устройства CSD в Гидро-Квебек

На рис. 6 показано количество установленных устройств CSD по годам в Гидро-Квебек и распределение общего количества установленных устройств по классам напряжения.

По мнению авторов, этот обширный опыт работы с CSD показал, что точный контроль крупногабаритных и тяжеловесных выключателей не только возможен, но и может продлить жизнь существующего оборудования. Он также показал, что CSD надежны и стабильны в течение длительного времени. Имея очень полезные функции мониторинга и сигнализации, CSD в состоянии идентифицировать нежелательные оперативные состояния достаточно рано, чтобы предотвратить более серьезные ситуации. В некоторых случаях при значительном разбросе времен срабатывания выключателя они играют важную роль в оказании помощи при определении причины неправильного функционирования.

Поэтому следует внимательно относиться к сигналам CSD. Были разработаны новые методы фильтрации ложных сигналов, не требующих применения каких-либо действий. Приведено несколько реальных примеров, показывающих, как коммутационные проблемы могут быть обнаружены, помечены как тревожные и проанализированы. В каждом случае сделанные выводы помогли оптимизировать методы работы и внесли свой вклад в развитие более сложных CSD.

В целом, техника управляемой коммутации является оптимальным решением для уменьшения влияния вредных условий коммутации, при условии, что CSD правильно введены в эксплуатацию, и выполняется их текущий мониторинг и обслуживание.

Авторы заключают, что два десятилетия работы с устройствами управляемой коммутации (CSD) доказали, что они являются элегантным и очень стабильным решением для смягчения влияния переходных процессов в сетевых выключателях. Тем не менее, собственно мониторинг оборудования имеет первостепенное значение, так как выключатель – механически сложный аппарат и может иметь разброс времен срабатывания, вызываемый широким спектром условий эксплуатации и неисправностей. Инновационные методы обнаружения неисправностей, применяемые в CSD, позволяют диагностировать нежелательный режим работы оборудования с большой точностью и достоверностью, и сигнализировать о необходимости технического обслуживания.

За многие годы в Гидро-Квебеке накоплены знания о поведении выключателя и разработаны надежные методы для дооснащения старых и новых выключателей от различных производителей системой CSD. Это ноу-хау также применяется к модернизации существующих CSD путем добавления новых функций и возможностей, увеличивающих производительность системы, оптимизирующих алгоритмы обнаружения неисправностей и улучшающих пользовательский интерфейс. Опыт также показывает, что каждый CSD должен быть введен в эксплуатацию корректно, с последующей периодической проверкой оперативных данных и сигналов неисправностей. Эти знания будут и далее укрепляться путем активного участия в новой рабочей группе WG A3.35, которая разработает рекомендации по вводу в эксплуатацию и порядку работы для проектов по управляемой коммутации на основе новейших знаний и передового опыта во всем мире.

Прогресс количества и разнообразия всевозможных применений управляемой коммутации в сочетании с неоспоримыми преимуществами их встроенных

функциональных средств мониторинга вполне может привести к созданию специализированной группы, посвященной управлению и долгосрочному наблюдению всех аспектов, связанных с управляемой коммутацией в крупных энергетических компаниях. Для небольших предприятий эта задача частично может решаться путем привлечения специализированной сервисной компании. Полученный в результате опыт, в свою очередь, позволит использовать CSD для повышения надежности подстанций, стабильности сети и качества электроэнергии.

**Доклад АЗ-204** представляет подробное описание квалификационных испытаний выключателей высокого напряжения, встроенных в КРУЭ 400 кВ, в режиме управляемой коммутации, как в лабораторных условиях, так и на эксплуатируемом оборудовании в реальном масштабе времени. Для этой цели выключатель оснащался point-on-wave (POW) контроллером.

Анализируются и обсуждаются результаты и эффективность применения управляемой коммутации. Акцент делается на 2 типа приложений, для которых национальной энергосистеме Великобритании требуется осуществление управляемой коммутации:

- 1) отключение шунтирующих реакторов с целью снижения коммутационных перенапряжений;
- 2) подключение емкостных нагрузок под напряжение с целью снижения амплитуды бросков тока.

Первая цель испытаний – проверка способности POW контроллера подавать сигналы на оперирование выключателя в точно заданные моменты времени и в определённой последовательности при различных условиях окружающей среды, проверка его на электромагнитную совместимость (EMV) в условиях работы в КРУЭ.

Вторая цель испытаний – привязка программного обеспечения контроллера к параметрической модели связанного с ним выключателя согласно МЭК 62271-302.

Третья цель испытаний – сопоставление работы POW контроллера совместно с выключателем в мощной лаборатории с полевыми испытаниями.

Авторы заключают, что в течение последних десятилетий благодаря значительному улучшению интеллектуальных электронных устройств, повышению их надежности и уменьшению стоимости становится перспективным применение управляемой коммутации по сравнению с традиционными методами, обычно используемыми для снижения влияния переходных процессов на электрическое оборудование. Успех управляемой коммутации основан на двух принципах:

- определение момента подключения или отключения нагрузки и источников, благоприятного для смягчения влияния переходных процессов;
- надежной оценки продолжительности операции управляемой коммутации при непредвиденных условиях эксплуатации.

### 4.3. Выключатели

В докладе АЗ-201 описан новый подход к определению точного момента электрического пробоя каждого дугогасительного промежутка (ДП) многоразрывных выключателей в течение коммутационных операций. Предложенная методика основана на неинвазивном измерении электромагнитной эмиссии, происходящей при пробое промежутка в каждом разрыве выключателя.

Поскольку полюс высоковольтного выключателя, как правило, состоит из нескольких последовательно соединенных дугогасительных промежутков, имеется проблема равномерного деления напряжения по каждому из них во всех режимах работы выключателя. При использовании выравнивающих конденсаторов полное напряжение на выводах полюса равномерно делится между последовательно соединенными ДП. Для гарантированно правильной работы все ДП в полюсе должны быть механически синхронизированы, что определено международными стандартами, такими как IEC 62271-100. Кроме того, распределение напряжения должно быть однородным, и каждый ДП в полюсе должен обладать одной и той же электрической прочностью.

Измеренные осциллограммы тока и напряжения не позволяют провести анализ процессов, проходящих в конкретном ДП полюса, например, определить точный момент нарушения изоляции каждого ДП, включая предпробой при включении выключателя и повторные зажигания при отключении.

Задержки между пробоями последовательно соединенных ДП являются важнейшим параметром для оценки состояния полюса выключателя. Точное измерение этих задержек позволяет оценить нагрузку на выравнивающие конденсаторы, которые могут подвергаться значительным переходным перенапряжениям, вызванным длинными задержками между электрическими пробоями, что может привести к ухудшению распределения прочности между ДП в полюсе и нежелательным множественным предпробоям. Предложенный подход позволяет определить ДП в полюсе, в которых пробой происходит преждевременно.

В докладе представлены результаты применения данного подхода для нескольких элегазовых выключателей колонкового типа и выключателей с воздушным дутьем, коммутирующих шунтирующие реакторы, шунтирующие емкости и фильтры гармоник. Также проведены расчеты переходных электромагнитных процессов с целью предсказать перенапряжения, вызванные большим разбросом времен пробоя.

По мнению авторов, разработана эффективная неинвазивная методика измерения точного момента электрического пробоя каждого промежутка в течение операции переключения. Эта новая методика успешно использована для измерения временных задержек между моментами пробоев в многоразрывных колонковых элегазовых выключателях, установленных в сети Hydro-Québec. Проблема изучена только для выключателей, имеющих по 2 разрыва на полюс, однако описанная методика может легко расширяться на большее количество разрывов в полюсе. Расширение знаний о реальных задержках пробоя разных промежутков в одном полюсе позволит улучшить понимание электрических нагрузок, которым подвергаются выключатели и выравнивающие конденсаторы, и объяснить преждевременные пробойи.

**Доклад АЗ-202** посвящён применению статистических методов для изучения надежности электрооборудования на примере маломасляных выключателей МОВ, принимая во внимание механические операции – модель «время ускоренного отказа» (accelerated failure time (AFT) model).

В докладе отмечается, что огромное количество маломасляных выключателей (МОВ) установлено в высоковольтных сетях по всему миру, и они продолжают эксплуатироваться. С учетом их длительной истории эксплуатации, можно точно оценить их надежность (или срок эксплуатации), принимая во внимание различные воздействия. Оценки срока жизни, основанные на статистических моделях и учитывающие количество механических операций, могут быть использованы для улучшения управления качеством все еще работающих МОВ.

Для использования статистических моделей срок службы МОВ должен быть хорошо задокументирован. Срок службы начинается с вводом в эксплуатацию и заканчивается списанием оборудования. Аппараты, все еще способные работать в момент исследования, как говорят, цензурированы справа (mat. стат.).

Срок эксплуатации может быть использован для моделирования срока жизни с использованием статистических методов, описанных в литературе по надежности/сроку службы. Эти методы следует предпочесть упрощенному методу, когда вероятность работоспособного состояния выключателя с заданным возрастом оценивается как количество работающих аппаратов этого возраста на момент исследования, деленное на первоначальное количество аппаратов этой возрастной группы, введенных в эксплуатацию. Статистические методы плюс к этому используют и данные из всех старших возрастных групп, чтобы получить оценку живучести аппарата. Кроме того, эти методы могут включать предсказывающие параметры, например, число операций, электрические и механические стрессовые воздействия, уровень напряжения, производитель и т.д.

Можно сначала использовать непараметрическую оценку выживаемости МОВ как функцию времени с момента ввода в эксплуатацию. Эта оценка также может быть использована для выбора параметрического распределения, необходимого для моделирования воздействия механических операций на время жизни с помощью модели ускоренного времени наработки на отказ (AFT).

Результаты применения AFT модели к данным Гидро-Квебек показывают, что среднегодовое количество механических операций оказывает статистически значимое влияние на срок жизни МОВ ( $p$ -value  $< 0,01$ ). Оценочные коэффициенты показывают на 8 % быстрее старение за каждые 25 дополнительных механических операций в год в течение жизни МОВ. Для МОВ, работающих 300 раз в год, это примерно соответствует 50 % вероятности отказа через 30 лет после ввода в эксплуатацию, а для срабатывающих 10 раз в год – в среднем через 60 лет.

AFT модель выводит кривую выживания конкретного аппарата, которая охватывает как увеличение вероятности отказа в течение долгого времени в прошлом, так и прогноз выживания в будущем. Эквивалентные интенсивности отказов и кривые надежности легко вычисляются, первая с помощью известной "ванна отказов", а вторая является вероятностью того, что устройство будет работать, по меньшей мере  $t$  лет. Эта более точная оценка вероятности отказа оборудования улучшает качество прогнозирования по управлению активами. Модель AFT мо-



жет быть использована в сочетании с параметрической моделью, работающей без учета данных по механике, для вычисления времени работы. Для каждого МОВ текущая оценка отказов по АФТ-модели сравнивается с рассчитанным по Вейбуллу возрасту, когда данная вероятность отказа достигается, т.е. его расчетный возраст. Расчетный возраст выключателей может использоваться для классификации на основе их надежности, и размещения их в матрицах риска, используемых для управления активами.

Описанная методика может применяться к другому оборудованию, на надежность которого влияют любые факторы (количество операций, область применения, уровень нагрузок, уровень напряжения, производитель и т.д.), при условии, что соответствующие данные есть в корпоративных базах данных. Принимая важные переменные факторы во внимание, можно обеспечить более точную оценку надежности.

По мнению авторов, их сообщение представляет собой инновационное применение статистических методов для изучения надежности электрооборудования, принимая во внимание механические операции. Аналогичная работа может быть проделана для других выключателей цепи, таких как элегазовые выключатели и выключатели с воздушным дутьем, а также других типов оборудования. Представленный метод может также использоваться при изучении других одиночных явлений, которые происходят один раз для любого аппарата, а для повторяющихся событий можно сделать обобщения.

Оценки интенсивности отказов, среднее остаточное время службы и оценка надежности, полученные с помощью данного метода, могут быть использованы лицами, принимающими решения для лучшего управления качеством продукции.

**В докладе АЗ-205** описан подход к продлению срока службы выключателей, в частности выключателей с воздушным дутьем. Обработаны примеры восстановительного ремонта выключателей, установленных в распределительных и передающих сетях. Для проверки влияния ремонта и небольших доработок в части производительности отремонтированные выключатели были вновь протестированы. Обсуждены результаты типовых испытаний, особый акцент сделан на влияние дуги в выключателях с воздушным дутьем на сеть. Высокое напряжение дуги, высокая последуговая электропроводность и шунтирующие резисторы (если применяются) создают воздушным выключателям репутацию надежных, что обеспечивается используемыми материалами, отключающей средой и конструктивным запасом.

Два типа автоматических выключателя были протестированы на соответствие паспортным данным и на работоспособность в нестандартных условиях, т.е. на действующий стандарт МЭК, который стал более строгим, чем в прошлом. Тем не менее, выключатели работают исправно. Далее выключатель среднего напряжения был протестирован на коммутацию токоограничительных реакторов с шунтирующими резисторами и без них. Несмотря на то, что высокочастотная составляющая восстанавливающегося переходного напряжения была демпфирована, без шунтирующих резисторов выключатель не смог отключить ток КЗ, ограниченный токоограничивающим реактором при максимальном напряжении.

Но это тяжелое испытание и для SF6 выключателей, но не для вакуумных выключателей.

В результате проведенных исследований авторы делают вывод, что для некоторых конструкций и применений целесообразно поддерживать старые воздушные выключатели, так как капитальные затраты равны нулю и эксплуатационные расходы и расходы на ремонт умеренные, в то время как производительность – отличная. Описанные выключатели прошли программу ремонта, и ожидаемый срок службы продлен еще на несколько десятилетий.

В заключении авторы утверждают, что относительно срока службы, исчисляемого десятилетиями, современные выключатели (элегазовые, вакуумные выключатели) гораздо дешевле, чем оборудование старых технологий (баковые выключатели, маломасляные, с воздушным дутьем, двойного давления SF6), благодаря размерам (количеством дугогасительных камер), рассеиваемой энергии, их оптимальной конструкции и т.д. Для самых мощных областей применения технология воздушного дутья сохраняет свое преимущество над современными альтернативами на протяжении многих лет. Примерами являются использование этой технологии на напряжениях 800 кВ и выше, а также генераторные выключатели и главные выключатели в лабораториях больших разрывных мощностей.

Выключатели с воздушным дутьем очень надежны с точки зрения используемых материалов, отключающей среды и конструктивного запаса прочности. Кроме того, их конструкция довольно проста, и они просты в обслуживании. Надежность, доступность и ремонтпригодность некоторых моделей выключателей являются превосходными. Проблемы, как правило, происходят с системой подачи воздуха, нежели с самими выключателями.

Как показано в докладе, в выключателях с воздушным дутьем дуга оказывает воздействие на цепь, которое поддерживает его надежную репутацию. Следует отметить следующие: (а) высокое падение напряжения на дуге, что оказывает ограничивающий эффект на ток короткого замыкания (особенно DC-компонент); (б) высокая последугловая проводимость сглаживает высокочастотные явления и, следовательно, смягчает крутые переходные перенапряжения, возникающие в реакторах, трансформаторах и коротких линиях; (в) при установке низкоомных шунтирующих резисторов уменьшается уровень коммутационных перенапряжений.

Тем не менее, воздушные выключатели обладают высоким током среза и могут возникать высокие перенапряжения при отключении малых индуктивных токов. В этом случае необходимы специальные меры предосторожности.

Воздушные выключатели очень шумны, а также производят внешние продукты горения дуги.

Отключение токов КЗ в цепях с токоограничивающими реакторами является проблемой для элегазовых выключателей, а воздушные выключатели с шунтирующими резисторами, равно как и вакуумные выключатели, могут справиться с этой задачей.

## 5. Предпочтительная тема 3 «Воздействие экстремальных условий эксплуатации на оборудование передачи и распределения»

Шесть докладов для ПТ 3 охватывают различные темы:

электрические и диэлектрические напряжения, не охватываемые стандартами (А3-301);

рекомендации по смягчению риска перенапряжения вследствие виртуального среза тока в вакуумных выключателях (А3-302);

предвключаемые резисторы для подключения конденсаторных батарей (А3-303);

сейсмостойкое оборудования подстанции (А3-304);

сильный снег и сильное загрязнение (А3-305);

мощный генераторный выключатель (А3-306).

**Доклад А3-301** описывает некоторые условия и режимы распределительных сетей сверхвысокого напряжения, при которых воздействующие напряжения на оборудование превышают нормы соответствующих международных стандартов. В частности приводятся примеры режимов и условий, при которых крутизна восстанавливающегося напряжения и уровни перенапряжений превышают нормированную МЭК кривую и нормированные значения уровней выдерживаемых напряжений. В связи с этим предлагается провести более тщательное исследование для выработки рекомендаций для корректировок соответствующих стандартов МЭК, направленных на повышение надежности и безопасности работы энергосистем.

**Доклад А3-302** посвящён проблемам связанными с коммутацией малых индуктивных токов вакуумными выключателями ВВ высокого напряжения, в частности возникающим перенапряжениям как при отключении, так и при включении индуктивной нагрузки. Приводятся результаты экспериментальных исследований и численного моделирования происходящих процессов при коммутациях ВВ, описаны факторы, типы нагрузок и конфигурации сети вызывающие эти перенапряжения. Предлагаются средства для снижения уровней перенапряжений и приводятся критерии при которых этих средств не требуется

Вакуумные выключатели используются с 1980-х годов в распределительных сетях для всех коммутационных целей. Хорошо известно, что при переключении индуктивных нагрузок вакуумные камеры могут производить высокочастотные переходные перенапряжения, нагружающие изоляцию трансформаторов и соответствующего оборудования. Поэтому следует тщательно оценивать частоту возникающих перенапряжений и разрабатывать методы смягчения воздействий таких перенапряжений. Лабораторные испытания с 900 кВа трансформатором при разной его нагрузке выявили влияние емкостного распределения обмоток на частоту электрических переходных процессов и актуальность возбуждения резонанса во внутренних обмотках. Разрушающие перенапряжения происходили только во время включения и отключения значительных токов нагрузки или во время прерывания пусковых токов. Обмотки трансформатора обычно выдерживают эти пе-

ренапряжения, если правильно разработаны и испытаны на соответствующие уровни грозового импульса. Явления повторного пробоя и высокочастотных перенапряжений наблюдались и в полевых условиях при отказе вакуумным выключателем в отключении 630 кВт нагрузки солнечных панелей. Формы измеренных переходных перенапряжений были подтверждены результатами моделирования с использованием ЕМТР / АТР, учитывающего переходные характеристики вакуумной камеры и параметры распределенной ёмкости трансформатора и соединительных кабелей с низковольтной стороны трансформатора. Явления перенапряжений могут быть связаны с возникновением виртуального среза тока, который является срезом тока промышленной частоты в соседней фазе, вызванным несколькими повторными пробоями в первой фазе. При коммутации без нагрузки перенапряжений не наблюдалось. Опасность повреждения оборудования во время коммутации индуктивной нагрузки зависит, среди прочего, от типа нагрузки и конфигурации системы. Множественные повторные зажигания дуги и перенапряжения могут возникать как при отключении, так и при включении тока, если время горения дуги мало и скорость нарастания восстанавливающегося напряжения высока.

Факторами риска являются низкая емкость связи между выключателем и трансформатором, плохое качество изоляции обмоток трансформатора, большое количество переключений и, конечно, высокий коммутируемый индуктивный ток. Средствами для снижения перенапряжений обычно являются RC-цепочки, которые уменьшают рост напряжения во время множественных пробоев.

**В докладе АЗ-303** представлено сравнение применения двух способов снижения уровня бросков тока при подключении незаряженных конденсаторных батарей под напряжение в сетях 145-420 кВ.

Первый способ – применение предвключаемого резистора, второй – применение управляемого включения, т.е. управлять выключателем таким образом, чтобы подача напряжения на конденсатор в каждой фазе происходила при напряжении источника питания, близком к нулю.

Обсуждается многолетний опыт применения обоих способов. Описаны достоинства и недостатки каждого способа. Приведено сравнение переходных процессов при использовании этих двух методов. Отмечено, что надо развивать оба способа.

**В докладе АЗ-304** рассматривается процесс проектирования сейсмостойкого оборудования по JEAG 5003 (Руководящие принципы для разработки сейсмостойкого электрооборудования), а также обсуждаются различные вопросы сейсмостойкости для высокого уровня сейсмических сил, когда некоторые сейсмические воздействия на ВВ оборудование намного выше, чем значения по требованиям JEAG 5003, например величина ускорение поверхности земли во время землетрясения.

Приводятся результаты анализа последствий Великого землетрясения в Восточной Японии 11 мая 2011 года. Отмечается, что во время этого землетрясения в основном было разрушено оборудование, изготовленное до введения норм и требований JEAG 5003, т.е. до 1980 г.

Предлагается ужесточить некоторые требования JEAG 5003, основываясь на выводах анализа последствий этого землетрясения.

**Доклад АЗ-305** описывает результаты подробного исследования надежности внешней изоляции из полимерных материалов изоляционных конструкций.

Представлены результаты полевых испытаний изоляторов ВВ элегазовых выключателей в условиях большого количества снега и сильного загрязнения и результаты обследования испытанных изоляторов на предмет их механической целостности в лабораторных условиях. Проведены оценки их надёжности в долгосрочной перспективе. Применение полых композитных изоляторов в диапазоне ультравысокого напряжения расширяется во всем мире из-за их улучшенных механических свойств, таких как хорошая гидрофобность, простая конструкция, взрывобезопасность, малый вес, механическая прочность при внутреннем давлении и на изгиб, простота обработки.

Обследования, проведенные CIGRE, оказали помощь для устранения озабоченности по поводу их надежности в долгосрочной перспективе.

**В докладе АЗ-306** представлены особенности режимов и условий работы мощных генераторных выключателей и новый метод их испытаний.

Представлены краткое описание мощного элегазового генераторного выключателя на номинальное напряжение 27 кВ и номинальный отключаемый ток 100 кА, а также результаты его полномасштабных испытаний с помощью оригинальной синтетической схемы испытаний. В этой схеме впервые применяется два контура напряжения, один из них для демонстрации способности выключателя продолжительно выдерживать возвращающееся напряжение промышленной частоты, чего, как правило, нет в синтетических тестах, а второй – для формирования требуемого переходного восстанавливающего напряжения.

Сверхбольшие генераторные выключатели часто устанавливаются между повышающим трансформатором и генератором на электростанции. Это конкретное место установки ставит особые требования в отношении электрических напряжений на них, устройства уязвимы в условиях отказа системного питания и генераторного питания. Эти нагрузки существенно отличаются от нагрузок на выключатели общего назначения: как максимум переходного восстанавливающего напряжения, так и чрезвычайно высокий ток короткого замыкания, возникающий в источнике питания сети при аварии.

В первой части доклада объяснены различные условия аварий и их типичные воздействия оборудование.

Во второй части дается краткое описание мощного элегазового генераторного выключателя на номинальное напряжение 27 кВ и номинальный отключаемый ток 100 кА и различных режимов его работы.

В третьей части описано полномасштабное тестирование генераторного выключателя с помощью синтетической испытательной установки, функциональная однолинейная схема которой показана на рис. 7.

В качестве источника тока используется 4 генератора, способные сформировать симметричный или ассиметричный ток КЗ до 300 кА. Для разделения ис-



## 6. Материалы рабочих групп, рассмотренные на Сессии

В рамках ИК А3 «Высоковольтное оборудование» четыре рабочие группы опубликовали или опубликуют свои технические брошюры в 2014 году.

Это:

- WG A3.24 «Simulating internal arcs and current withstand tests» (Имитация внутренней дуги и токовые испытания варисторов);
- WG A3.25 «MO varistors and surge arresters for emerging system conditions» (МО варисторы и ограничители перенапряжений для меняющихся системных условий);
- WG A3.27 «Vacuum switchgear» (Вакуумные распределительные устройства);
- WG A3.28 «Switching and testing of EHV&UHV equipment (TB570)» (Коммутация и тестирование СВН и УВН оборудования (TB570));

Другие РГ работают в следующих направлениях:

- WG A3.26 «Capacitor bank switching and impact on equipment» (Коммутация конденсаторных батарей и воздействия на оборудование);
- WG A3.29 «Deterioration and ageing of HV substation equipment» (Износ и старения оборудования подстанции ВН);
- WG A3.30 «Overstressing of substation equipment» (Перегрузки подстанционного оборудования);
- WG A3.31 «NCIT with digital output» (Нетрадиционные измерительные трансформаторы с цифровым выходом);
- JWG A3.32 «Non-intrusive condition monitoring for MV/HV switchgear» (Нон-интрузивные методы мониторинга СН/ВН коммутационного оборудования);
- WG A3.33 «Experience with equipment for series/shunt compensation» (Опыт работы с оборудованием последовательной и параллельной компенсации);
- JWG A3/B5.34 «Technical requirements and capability of state-of-the-art DC switching equipment» (Технические требования и возможности современного коммутационного оборудования ПТ);
- WG A3.35 «Guidelines and best practices for commissioning and operation of controlled switching projects» (Руководящие принципы и передовой опыт использования ввода в эксплуатацию и эксплуатация объектов с управляемой коммутацией).

## 7. Заключение

Темы докладов, представленных на сессии в рамках SC 3, вписываются в общемировую тенденцию – создание интеллектуальных электрических сетей. Работы в этом направлении ведутся в США, Японии, Индии, Китае. Евросоюз разрабатывает концепцию «Европейская электрическая сеть будущего». Россия тоже ведёт работы в этой области, и потому проблемы, поднятые на сессии, весьма актуальны и для Российских сетей.

Обращено внимание на тесную взаимосвязь изучаемых вопросов. Так, передача энергии на большие расстояния, что особенно актуально для России, сводится не только к разработке оборудования ультравысокого напряжения, в том числе постоянным током, и разработке методов его испытаний (ПТ 1), но и к модернизации существующего оборудования и внедрения средств, обеспечивающих его эффективную работу. К ним относятся:

- коммутационное оборудование;

- оборудование для компенсации реактивной мощности;

- коммутационное оборудование для переключений последовательных и параллельных компенсирующих устройств без перенапряжений и бросков тока;

- применение управляемой коммутации, цифровых измерительных трансформаторов, и т.д.

Применение управляемой коммутации в сочетании с преимуществами их встроенных функциональных средств мониторинга позволяют свести к минимуму броски тока и уровни перенапряжений при коммутациях, разгрузить тем самым сопутствующее оборудование от электромеханических стрессов, продлить срок его службы, в том числе продлить работу оборудования, отработавшего свой нормативный ресурс.

Представленный на обсуждение SC 3 материал, учитывая выше сказанное, представляет практическую ценность для разработчиков и эксплуатационных служб оборудования передачи и распределения электроэнергии.



## 8. Приложение

Перечень докладов, представленных на 45 сессию СИГРЭ по направлению SC A3 «Высоковольтное оборудование»

### PS 1: Equipment to cater for changing network conditions

- A3-101: High Voltage Dry-Type Air-Core Shunt Reactors (Сухие воздушные реакторы высокого напряжения).  
K. PAPP (Trench Austria GmbH, Austria); M.R. SHARP (Trench Limited, Canada); D.F. PEELO (Consultant, Canada).
- A3-102: Experiment and Simulation Research on VFTO in UHV GIS (Экспериментальные исследования и численное моделирование высокочастотных перенапряжений в газоизолированных распределительных устройствах ультро-высокого напряжения).  
Weijiang Chen, Hao Hu (State Grid Corporation of China, China);  
Zhibing Li, Lei Wang, Bin Han, Xianglian Yan, Hao Wang (China Electric Power Research Institute, China); Weidong Liu (Tsinghua University, China);  
Chengrong Li (North China Electric Power University, China).
- A3-103: Capacitive current switching capability of air-insulated high voltage pantograph disconnectors (Коммутационная способность воздушных разъединителей типа пантограф при отключении емкостных токов).  
B. RUSEK, C. NEUMANN, J. HAUDE, K. KLEINEKORTE (Amprion GmbH, Germany);  
R.P.P. SMEETS (DNV KEMA, The Netherlands).
- A3-104: Assessment of Transient Recovery Voltage for 1200 kV Circuit Breaker (Оценки переходных восстанавливающихся напряжений выключателей 1200 кВ).  
B.N.De Bhowmick, B.N.V.R.C. Suresh Kumar, S.B.R.Rao, Umesh Sen (Power Grid Corporation of India Limited, India); R.S. Shivakumara Aradhya, K.S. Meera, K. Santosh Kumar Patro (Central Power Research Institute, India).
- A3-105: Optimal allocation and assessment of superconducting fault current limiter in an urban meshed 110-kV subtransmission network (Оптимальное место установки и оценка эффективности сверхпроводящих резистивных ограничителей тока короткого замыкания в городских распределительных сетях 110 кВ).  
B.J.O. SOUSA, M. LEHTONEN (Aalto University, Finland); A. PIHKALA (Helsinki Energy, Finland).
- A3-106: New references for HVDC metering (Новые рекомендации для измерения в высоковольтных сетях постоянного тока).  
J. HÄLLSTRÖM, T. LEHTONEN, E-P. SUOMALAINEN (MIKES, Finland); A. BERGMAN, A-P. ELG, S. SVENSSON (SP, Sweden); S. DEDEOĞLU, A. MEREV (UME, Turkey); E. HOUTZAGER (VSL, The Netherlands);  
J. KLÜSS, T. NIEMINEN (Aalto University, Finland); W. LUCAS, J. MEISNER (PTB, Germany); C. WEBER (Trench, France).

- A3-107: Diagnosis of capacitive voltage transformers in service. New method to determine the accuracy of CVTs while in service, without physical references and with a light portable unit (Диагностика емкостных трансформаторов напряжения, в процессе эксплуатации. Новый метод точного определения ЕТН в процессе эксплуатации, без физических вмешательств с помощью лёгкого портативного прибора).

D. GONZALEZ, M. L. CORMENZANA (REE, Spain); U. ZATICA, A. GALLASTEGI (Arteche, Spain).
- A3-108: Overload Line Controller: New FACTS Series Compensation application based on Switched Series Reactors (Контроллер перегрузки линии: новая FACTS технология последовательной компенсации, основанное на переключении последовательно соединённых реакторов).

Inés Romero, Joaquín Martín (ABB Consulting); Richard Rivas, Lennart (ABB FACTS); Juan Carlos Sánchez (Wall REE, Spain).
- A3-109: Requirements for increasing safety and reliability: new design of Current Transformers and experience on multiple stress test on composite bushings (Требования для повышения безопасности и надёжности: новых конструкции трансформаторов тока и разнообразные стресс-тесты их полимерных изоляторов).

A. DI GIULIO, D. FALORNI, A. FRAIOLI, V. IULIANI (Terna Rete, Italy); M. SVANBERG (ABB, Sweden); M. GULLO (STRI, Sweden); P. CARDANO, (ALSTOM, Passoni e Villa, Italy); M. DE NIGRIS, G. PIROVANO (RSE, Italy).
- A3-110: Investigation of LC-Resonance Driving in Disconnecter Bus-Transfer Testing (Исследование LC-резонансного источника тока в испытаниях шинного разъединителя).

Andreas Ritter, Christian M. Franck (ETH, Zürich, Switzerland); Ulrich Straumann, Uwe Riechert (ABB Switzerland AG, Switzerland).
- A3-111: Dimensions of influence of RC-dividers on the measurement of power quality parameters in high-voltage transmission networks (Размеры влияния RC-делителей на измерение параметров качества электрической энергии в распределительных сетях высокого напряжения).

Erik SPERLING (PFIFFNER Instrument Transformers Ltd., Switzerland); Prof. Peter SCHEGNER (Technical University of Dresden, Germany).
- A3-112: Protection Devices and Solutions for Evolving Distribution Smart Grid (Устройства защиты и решения для развивающейся Smart Grid).

L. KOJOVIC (Eaton's Cooper Power Systems, USA); K. ARGIROPOULOS (Eaton's Cooper Power Systems, Greece).
- A3-113: Interrupter Technology for Switching Shunt Reactors Evolves as the Frequency of Switching Reveals Weaknesses in Traditional Designs (Технология переключений для выключателей шунтирующих реакторов, устраняющая недостатки частоты переключения в традиционных конструкциях).

J. ROSTRON, N. MCCORD, T. SPEAS (Southern States LLC, USA); F. THERBY (Coelme-Egic, France).
- A3-114: Modelling and Experimental Verification of DC Current Interruption Phenomena and Associated Test-Circuits (Моделирование и экспериментальная

подтверждение феномена коммутации постоянного тока и связанные с этим проблемы испытаний).

R.P.P. SMEETS, V. KERTÉSZ, A. YANUSHKEVICH (DNV GL – Energy, The Netherlands).

- A3-115: Modelling of and recommendations for UHV and EHV switching duties (Моделирование и рекомендации по УВН и СВН коммутаторам).

Anton Janssen, Denis Dufournet, Hiroki Ito, Uwe Riechert, Hiroki Kajino, Yoshiyumi Yamagata, Masayuki Kosakada, Sébastien Poirier, Jianbin Fan Zutao, Xiang Paulo Fernandez.

## **Preferential Subject 2: Lifetime management and ageing of T&D equipment**

- A3-201: Measurements of Dielectric Breakdown Delays between Series-Connected Interrupters of a HV Circuit Breaker (Измерение времен задержек электрического пробоя у последовательно-соединенных прерывателей в высоковольтном выключателе).

S. POIRIER\*, R. DOCHE, R. PATER, J. POIRIER (Hydro-Québec, Canada).

- A3-202: Impact of Mechanical Operations on Minimum-oil Circuit Breaker Reliability (Влияние механических операций на надежность маломасляных выключателей).

J.-F. BOUDREAU and R. DOCHE (Hydro-Québec, Canada).

- A3-203: Long-term Reliability of Controlled Switching Systems: Observations from Two Decades of Development and Experience (Надежность в долгосрочной перспективе управляемых систем коммутации: обзор двадцатилетнего опыта эксплуатации).

A. MERCIER, S. DE CARUFEL P. TAILLEFER (Hydro-Québec, VIZIMAX Inc. Canada).

- A3-204: Qualification Process of a GIS 400 kV SF6 High Voltage Circuit Breaker Controlled Switching Solution (Квалификационные испытания КРУЭ 400 кВ с выключателем высокого напряжения в режиме управляемой коммутации).

M. WALDRON (National Grid, United Kingdom); F. АЙТ-АБДЕЛМАЛЕК, A. FICHEUX, J-L. RAYON (Alstom Grid, Aix-les-Bains, France).

- A3-205: Life extension of well-performing air-blast HV and MV circuit breakers (Продление срока службы исправных выключателей с воздушным дутьем высокого и среднего напряжения).

Anton Janssen, Maarten van Riet (Liander, the Netherlands); René Smeets, Henk te Paske (DNV-GL (KEMA), the Netherlands); Mark Illsley (National Grid, United Kingdom).

- A3-206: ROMANIAN EXPERIENCE WITH LIFETIME MANAGEMENT OF HIGH VOLTAGE EQUIPMENT (Румынский опыт управления жизненным циклом высоковольтного оборудования).

I. HATEGAN, C. DIACONU (Transelectrica SA, Romania); A. VASILE, I. IONITA, C. MOLDOVEANU, E. MIHALCEA, V. BREZOIANU, S. ZAHARESCU, B. TOADER (Nova Industrial SA, Romania).

## **PS 3: Impact of extreme operating conditions on T&D equipment**

- A3-301: Stresses not covered by standards and overstresses applied to transmission Equipment (Напряжения и перенапряжения, не охватываемые стандартами, применительно к оборудованию распределительных сетей).

A. CAVALHO (ONS, Brazil); P.C. FERNADEZ (ELETROBRAS, Brazil); A. JANSSEN (Lian-der, Netherlands); S. NKOSI (ESKOM, South Africa).

- A3-302: Vacuum circuit breaker, switching interactions with transformers and mitigation means (Вакуумный выключатель, коммутационные операции с трансформаторами и средства смягчения последствий).

E. DULLNI (ABB MV Power Products Ratingen, Germany); J. MEPPPELINK (University of Applied Science Soest, Germany); L. LILJESTRAND (ABB Corporate Research Vesteras, Sweden).

- A3-303: Comparison of Short and Long Term Use of Synchronous Control versus Closing Resistor Switching Methods for Capacitor Switching (Сравнение краткосрочной и долгосрочной перспективе использования управляемой коммутации с использованием предвключаемых резисторов при подключении конденсаторных батарей).

N. MCCORD, J. ROSTRON, T. SPEAS (Southern States LLC, USA); F. THERBY (Coelme-Egic, France).

- A3-304: Study of seismic design and guideline of substation equipment based on the Great East Japan Earthquake (Изучение сейсмостойкости конструкций и требования для оборудования подстанции, основанных на последствиях Великого Землетрясения на Востоке Японии)

I. OHNO T. ITO H. NAKAKOJI T. KOBAYASHI (Tokyo Electric Power Co., Japan); H. SATO (Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan).

- A305: Investigation of composite insulators in extreme environments - Heavy snow and severe pollution (Исследование композитных изоляторов в экстремальных условиях - сильный снег и сильное загрязнение)

H. MIYAKAWA (Tohoku Electric Power Co., Japan); H. TAKADA (Hokuriku Electric Power Co., Japan); Y. ITO (Chubu Electric Power Co., Japan); M. TOYODA (Toshiba Corp., Japan); J. KIDA (Hitachi Ltd., Japan); H. KOYAMA (Mitsubishi Electric Corp., Japan).

- A3-306: Interruption Phenomena and Testing of Very Large SF6 Generator Circuit-Breakers (Явление обрыва тока и испытания сверхмощного генераторного элегазового выключателя).

R.P.P. SMEETS, L.H. te PASKE, S. KUIVENHOVEN, R. THOMAS (DNV GL – Energy, The Netherlands); V. ROYOT, P. ROBIN-JOUAN, J.M. WILLIEME, F. JACQUIER (Alstom Grid, France).