

# II НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И РЕАЛИЗАЦИИ МЕЖДУНАРОДНЫХ ПРОЕКТОВ» (ПОДКОМИТЕТ В4 РНК СИГРЭ)

АВТОР:

О.В. СУСЛОВА,  
АО «НТЦ ЕЭС»

**В** рамках ежегодной международной специализированной выставки «Электрические сети России — 2017» 07.12.2017 г. состоялась II научно-практическая конференция «Опыт и перспективы применения силовой электроники и электропередач постоянным током для повышения надежности электрических сетей и реализации международных проектов». Мероприятие было организовано Подкомитетом РНК СИГРЭ В4 «Электропередачи постоянным током высокого напряжения и силовая электроника» при поддержке ведущего научно-технического партнера АО «НТЦ ЕЭС», Подкомитетом ПК-6

«Силовая электроника в электроэнергетике» ТК 016 «Электроэнергетика» при поддержке базовой организации ПАО «ФСК ЕЭС». В ходе конференции обсуждались вопросы развития системы стандартизации в области силовой электроники (СЭ) в электроэнергетике, опыт эксплуатации передач постоянного тока (ППТ) и вставок постоянного тока (ВПТ) и устройств FACTS в энергосистеме РФ, работы по реконструкции ППТ и ВПТ, перспективы создания сетей постоянного тока, развитие отечественной элементной базы для построения ППТ и ВПТ и устройств FACTS.

Ниже приводится обзор основных докладов.



Рис. 1  
Руководитель Подкомитета РНК СИГРЭ В4 О. Сулова

**Ольга Сулова**, руководитель Подкомитета РНК СИГРЭ В4, АО «НТЦ ЕЭС», в своем докладе представила обзор основных тенденций развития и применения ППТ и силовой электроники в энергосистемах, выполненный на основе анализа докладов, представленных в рамках тематического направления Исследовательского комитета В4 «Электропередачи постоянным током высокого напряжения и силовая электроника» на Международном colloquium комитетов СИГРЭ А3, В4 и D1 «Сети высокого напряжения постоянного и переменного тока — технологии будущего», проходившем в октябре 2017 г. в Канаде, г. Виннипег.

Одной из тенденций развития отрасли является широкое использование в энергосистемах ППТ на преобразователях тока с тиристорными вентилями в качестве высоковольтных передач электрической мощности на дальние расстояния в странах с протяженной территорией с повышением классов напряжения таких ППТ до 1100 кВ, а пропускной способности — до 11–12 ГВт. Также следует отметить разработку и внедрение многотерминальных ППТ на преобразователях тока напряжением  $\pm 800$  кВ. Другой тенденцией стало широкое использование в энергосистемах преобразователей

напряжения в составе кабельных и воздушных ППТ пропускной способностью до 1,4 ГВт при классах напряжения до 525 кВ.

Ведутся работы по совершенствованию схем модульных многоуровневых преобразователей напряжения (ММПН) и управлению ими с целью уменьшения потерь мощности, увеличения пропускной способности и классов напряжения, по созданию многотерминальных передач и сетей постоянного тока с применением преобразователей напряже-

ния, методов и средств их защиты при коротких замыканиях на стороне постоянного тока. Также следует отметить тенденцию использования ППТ и ВПТ, имеющих в составе преобразователи тока и напряжения, так называемых гибридных электропередач, в том числе многоподстанционных.

**Юрий Горюшин**, главный эксперт отдела комплексных программ департамента инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС», рассказал о текущей деятельности ПК-6 «Силовая электроника в электроэнергетике» ТК 016 «Электроэнергетика», который был создан в марте 2016 г. на базе ПАО «ФСК ЕЭС». В мае — июне 2016 г. был сформирован состав Подкомитета, куда вошли представители ведущих российских производителей силового оборудования, научно-исследовательских и проектных институтов, сетевых компаний. Также был сформирован перечень стандартов в сфере деятельности ПК-6 на национальном, межгосударственном и международном уровнях на базе МЭК, внесены предложения в программу национальной стандартизации на 2017–2018 гг.



Рис. 2  
Главный эксперт отдела комплексных программ ПАО «ФСК ЕЭС» Ю. Горюшин

В 2017 г. выполнен перевод следующих девяти стандартов и технических брошюр МЭК для разработки ГОСТ Р с частичным применением:

- Терминология для электропередач постоянного тока высокого напряжения;
- Терминология для преобразователей напряжения в электропередачах постоянного тока высокого напряжения;
- Тиристорные вентили для электропередач постоянного тока высокого напряжения. Часть 1: Терминология;
- Установки постоянного тока высокого напряжения — Системные испытания;
- Электропередачи постоянного тока высокого напряжения — Применение активных фильтров;
- Электропередачи постоянного тока высокого напряжения — Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока. Часть 1: Общий обзор;
- Электропередачи постоянного тока высокого напряжения — Руководство по спецификации и проектированию фильтров

- гармоник на стороне переменного тока. Часть 2: Режимы работы;
- Электропередачи постоянного тока высокого напряжения — Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока. Часть 3: Моделирование;
- Электропередачи постоянного тока высокого напряжения — руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока. Часть 4: Оборудование.
- Утверждение стандартов в окончательной редакции запланировано на октябрь 2018 г.

В соответствии с запросом Минэнерго России ПАО «ФСК ЕЭС» разрабатывает проект национальной программы «Силовая электроника», в рамках которой будут представлены предложения по внесению поправок и изменений в существующие нормативно-правовые документы и разработке новых стандартов.

**Лев Травин**, начальник отдела ФГУП «ВЭИ», секретарь Подкомитета 22F МЭК «Силовая электроника для электрических передающих

и распределительных систем» в своем докладе рассказал о текущей работе своего Подкомитета и перспективных планах работы.

В 2017 г. эксперты Подкомитета опубликовали пять стандартов, в том числе:

- IEC 62927. Ed. 1.0: Вентили преобразователей напряжения (ПН) для статического синхронного компенсатора реактивной мощности (СТАТКОМ) — Электрические испытания;
- IEC/TR 60919-1. Ed. 3.2: Режимы работы электропередач постоянного тока высокого напряжения с преобразователями, ведомыми сетью. Часть 1: Установившиеся режимы;
- IEC 61954. Ed. 2.2: Статические тиристорные компенсаторы (СТК) — Испытания тиристорных вентиляей;
- IEC 62501. Ed. 1.2: Вентили преобразователей напряжения (ПН) для электропередачи постоянного тока высокого напряжения (ПТВН) — Электрические испытания;
- IEC/TR 62543. Ed. 1.2: Электропередачи постоянного тока высокого напряжения (ПТВН) с применением преобразователей напряжения (ПН).

Завершена разработка стандартов, публикация которых планируется в 2018 г., а именно:

- IEC 60633. Ed. 3.0: Терминология для электропередачи постоянного тока высокого напряжения (ПТВН) (проект для голосования);
- IEC 62747. Ed. 1.1: Терминология для преобразователей напряжения (ПН) электропередачи постоянного тока высокого напряжения (ПТВН) (проект для голосования);
- IEC 62751-1. Ed. 1.1: Потери мощности в вентилях преобразователей напряжения (ПН)



Рис. 3  
Начальник отдела ФГУП «ВЭИ»  
Л. Травин



Рис. 4  
Технический директор  
ООО «НПЦ Саурус Энерго»  
А. Дроздов

для электропередачи постоянного тока высокого напряжения (ПТВН). Часть 1: Общие требования;

- IEC 62751-2. Ed. 1.1: Потери мощности в вентилях преобразователей напряжения (ПН) для электропередачи постоянного тока высокого напряжения (ПТВН). Часть 2: Модульные многоуровневые преобразователи (проект для голосования).

Ближайшей целью Подкомитета на двухлетнюю перспективу является разработка следующих стандартов:

- IEC 60919-1. Ed. 4: Режимы работы электропередач постоянного тока высокого напряжения с преобразователями, ведомыми сетью. Часть 1: Установившиеся режимы (регулирование и защита);
- PWI 22F-12. Ed. 1: Режимы работы мощных электронных шунтовых компенсаторов реактивной мощности в высоковольтных системах переменного тока;
- PWI 22F-13. Ed. 1: Работа унифицированных регуляторов потоков мощности в электрических системах;
- PWI 22F-14. Ed.1: IEC 60700-3 Ed. 1.0: Тиристорные вентили

для мощных электропередач постоянного тока высокого напряжения (ПТВН). Часть 3: Предельные значения параметров и характеристики.

Планируется обновление следующих действующих публикаций МЭК:

- IEC/TR 60919-2. Ed. 2.1: Режимы работы электропередач постоянного тока высокого напряжения с преобразователями, ведомыми сетью. Часть 2: Аварии и коммутации;
- IEC 61803. Ed. 1.2: Определение потерь мощности на преобразовательных подстанциях электропередач постоянного тока высокого напряжения с преобразователями, ведомыми сетью;
- IEC/TR 62544. Ed. 1.1: Системы постоянного тока высокого напряжения (ПТВН) — Применение активных фильтров;
- IEC/TR 62757. Ed. 1.0: Меры пожарной безопасности для вентилях и вентилях залов преобразователей для электропередач постоянного тока, статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности и гибких электропередач переменного тока;
- IEC 62823. Ed. 1.0: Тиристорные вентили для управляемых бата-

рей конденсаторов последовательной компенсации — Электрические испытания.

В ходе обсуждения доклада было отмечено, что необходимо привлекать высококвалифицированных специалистов к работе Подкомитета 22F МЭК и организовать финансирование их участия в деятельности Подкомитета для получения результатов, необходимых для повышения конкурентоспособности российского электротехнического оборудования, расширения рынков для отечественной силовой электроники.

**Андрей Дроздов**, технический директор ООО «НПЦ Саурус Энерго» рассказал об особенностях эксплуатации вставки постоянного тока на преобразователях напряжения в условиях значительных искажений питающего напряжения. Он сообщил об основных результатах первых лет эксплуатации вставки постоянного тока на преобразователях напряжения (ВПТН), выполняющей функцию объединения несинхронных объединенных энергосистем (ОЭС) Востока и ОЭС Сибири на ПС 220 кВ Могоча. Ввод в работу ВПТН Могоча повысил надежность электроснабжения тяговых подстанций Забайкальского участка Транссибирской железной дороги и показатели качества электроэнергии (ПКЭ), что позволило обеспечить пропуск тяжелых поездов, отключить модульные электростанции, подпитывающие сети устройств автоблокировки, при этом значительно снизилось количество сбоев в работе устройств локомотивной сигнализации, уровни напряжений стабилизировались в пределах допустимых значений. Развитие железнодорожного сообщения привело к существенному изменению нагрузок, что потребовало проведения исследований возможностей ВПТН на основе трехуровневых преобразователей напряжения устойчиво работать в условиях сильных



Рис. 5  
Начальник отдела  
биполярных приборов  
ПАО «Электровыпрямитель»  
А. Гришанин

искажений питающего напряжения. Были уточнены и программно реализованы алгоритмы работы ВПТН, которые, учитывая ограничения существующего оборудования, повысили надежность работы как в режиме компенсации реактивной мощности, так и в режиме ВПТ. Показатели качества электрической энергии, в том числе по несимметрии и гармоническим искажениям напряжения, значительно улучшены. В некоторых особых режимах работы прилегающей сети 220 кВ мощности ВПТН недостаточно для полной компенсации искажений в сети. В этих режимах работает алгоритм ограничения мощности, применение которого совместно с другими мерами и выполненное уточнение программного обеспечения системы управления, повысили надежность ВПТН в фактически сложившихся условиях работы прилегающих сетей 220 кВ.

**Роберт Шульга**, ведущий научный сотрудник ФГУП «ВЭИ», в своем докладе выполнил анализ технических решений по построению неуязвимой многоподстанционной сети постоянного тока (МСПТ) напряжением до 20 кВ мощностью до 20 МВт, сообщил о возможности выполнения МСПТ с использованием ранее разработанных опытных образцов преобразователей, выключателей, кабелей и защитных устройств. В докладе показана целесообразность реализации пилотного проек-

та МСПТ для отработки алгоритмов управления и защиты, выбора типов оборудования и оценки надежности комплекса.

**Алексей Гришанин**, начальник отдела биполярных приборов ПАО «Электровыпрямитель», представил результаты исследования современной элементной базы отечественной силовой электроники для высоковольтных тиристорных вентилях модернизируемого Выборгского преобразовательного комплекса. Он привел характеристики мощных высоковольтных тиристорных нового поколения производства ПАО «Электровыпрямитель», которые могут быть применены взамен ранее применявшихся тиристоров Т273-1250-42. Использование тиристоров Т283-1600-60 с увеличенным значением блокирующего напряжения позволяет существенно снизить количество последователь-

но соединенных тиристоров в венти-  
ле, а за счет увеличения диаметра кристалла повысить токовую нагрузку при сохранении требуемых динамических параметров. Также он рассказал об исследованиях тиристорных вентилей в составе блока вентилей ПС 400 кВ. Преимуществами применения данных тиристорных являются: низкие статические и динамические потери; минимальные разбросы зарядов обратного восстановления для последовательных соединений; низкие времена выключения; устойчивость к лавинным перегрузкам и др. Надежность тиристорных подтверждена проведением испытаний на безотказность. Учитывая опыт и производственные возможности ПАО «Электровыпрямитель» в области силового полупроводникового приборостроения, показано, что при выполнении энергетических проектов по инновационному развитию и модернизации линий и вставок электропередач постоянного тока необходимо учитывать номенклатуру выпускаемой им продукции, не уступающей по качеству зарубежным аналогам.

**Максим Пешков**, заместитель начальника Центра качества электроэнергии АО «НТЦ ФСК ЕЭС», рассказал о разработке блока тиристорных вентилях на современной отечественной элементной базе с автономной системой охлаждения



Рис. 6  
Заместитель начальника Центра  
качества электроэнергии  
АО «НТЦ ФСК ЕЭС» М. Пешков

для ПС 400 кВ Выборгская. К настоящему времени преобразовательное оборудование комплектных высоковольтных преобразовательных устройств (КВПУ 1-3) ПС Выборгская находится в работе более 30 лет и исчерпало свой ресурс. К недостаткам старой конструкции блока вентиляного преобразовательного моста (БВПМ) относятся: ненадежные и неремонтопригодные гидравлические соединения между элементами высоковольтного тиристорного модуля (ВТМ); течи в ВТМ, приводящие к выходу из строя нижестоящих модулей; устаревшая элементная база; невозможность замены всех элементов ВТМ непосредственно на БВПМ; стесненные условия работы персонала при обслуживании ВТМ на высоте. Разработанный БВПМ-М 800/120 имеет следующие технические особенности: габаритный размер БВПМ новой конструкции в два раза меньше в сравнении с БВПМ старой конструкции; все гидравлические соединения на БВПМ разъемные; из влажной зоны ВТМ (зоны, в которой возможно образование капельных течей деионизированной воды) вынесены все элементы, чувствительные к влаге; конструкция ВТМ обеспечивает защиту нижестоящих модулей от капельных течей; унифицированы опорная и подвесные конструкции ВТМ; обслуживание и ремонт БВПМ максимально упрощены.

БВПМ-М 800/120 имеет модульную конструкцию. В состав ВТМ входят: 12 ячеек силовых тиристоров (ТРС-ТЯ), объединенные в сборки; система передачи и распределения импульсов управления по ячейкам модуля; элементы, обеспечивающие распределение напряжения между последовательно соединенными тиристорами, демпфирование высокочастотных составляющих тока и напряжения при включениях и выключениях высоковольтного тиристорного вентиля (ВТВ), ограничение скорости нарастания и спада тока и напряжения на тиристорах; аппаратура системы управления, контроля, индикации отказов отдельных элементов ВТМ и устройств питания собственных нужд в ячейках ВТМ; система теплоотвода потерь, выделяемых в тиристорах.

В ходе работы также будет изготовлен шкаф управления (ШУ) вентилем, представляющий собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для управления, защиты и сигнализации ВТВ, составляющих блок вентиля преобразовательного моста БВПМ-М-800/120 для КВПУ на ПС 400 кВ Выборгская. ШУ осуществляет следующие функции:

- прием сигналов интервалов проводимости от комплекса управления и регулирования

- преобразовательного блока (КУРБ-Р) и формирование импульсов управления на тиристорные ячейки ВТВ блока вентиля;
- контроль исправности тиристорных ячеек вентиля БВПМ, подачу предупредительного сигнала и команды на отключение при исчерпывании избыточности тиристорных ячеек;
- контроль исправности блоков управления тиристорных ячеек вентиля, подачу предупредительного сигнала;
- контроль исправности собственного оборудования ШУ, подачу предупредительного сигнала;
- передачу диагностической информации в АСУ ТП. ШУ имеет оптические связи с блоками управления ТРС-ТЯ высоковольтного тиристорного вентиля БВПМ, находящимися на высоком потенциале, и электрические связи с КУРБ-Р. Конструкцией ШУ БВПМ предусматривается возможность установки дополнительных блоков и модулей с целью перевода под его управление остальных двух БВПМ моста КВПУ. Обмен данными между функциональными модулями ШУ, построенного на архитектуре п-ТСА, осуществляется защищенным последовательным цифровым кодом, что обеспечивает высокую помехозащищенность системы. Каждый элемент системы осуществляет контроль исправности модулей, с которыми он взаимодействует. Резервирование всех элементов и возможность горячей замены любых функциональных модулей ШУ обеспечивает высокую надежность системы в целом. Также планируется провести комплексную реконструкцию системы охлаждения.



Рис. 7  
Начальник отдела АО «НТЦ ФСК ЕЭС» А. Матинян

**Александр Матинян**, начальник отдела АО «НТЦ ФСК ЕЭС», представил доклад о комплексном опробовании преобразовательной части

стенда для проведения ресурсных испытаний высокотемпературной сверхпроводящей кабельной линии (ВТСП КЛ) РП-9 — Центральная. Для электрической сети Санкт-Петербурга АО «НТЦ ФСК ЕЭС» реализует проект полного цикла по созданию передачи постоянного тока на базе двенадцатипульсных тиристорных преобразователей и ВТСП КЛ постоянного тока, связывающей ПС 220 кВ РП-9 и ПС 330 кВ Центральная. Основные параметры проекта таковы: передаваемая мощность 50 МВт, постоянное напряжение 20 кВ, длина кабеля 2,5 км. Преобразовательное оборудование и его система управления были изготовлены и раздельно испытаны в 2014 г. В рамках выполнения НИ-ОКР перед отгрузкой оборудования в Санкт-Петербург предусмотрено проведение испытаний ВТСП КЛ на полигоне АО «НТЦ ФСК ЕЭС» в кольцевой схеме работы ППТ. Для этого в 2016 г. на базе одного

трехфазного моста КВПУ, подключаемого к ПС АО «НТЦ ФСК ЕЭС», был создан стенд, позволяющий формировать испытательные токовые и потенциальные воздействия на ВТСП КЛ. На испытательном стенде реализовано раздельное управление тиристорными вентилями катодной и анодной групп, так называемая кольцевая трехпульсная схема, которая позволяет регулировать постоянный ток в диапазоне до номинального тока КЛ и обеспечивает потери в снабберных цепях вентиля не более номинальных (в отличие от шестипульсной схемы с одним преобразователем). Реализация трехпульсной схемы потребовала неглубокой модернизации системы управления КВПУ на время испытаний. Проведенное в апреле 2017 г. комплексное опробование позволило, во-первых, проверить корректность взаимодействия системы управления и регулирования защиты и автоматики (СУРЗА), ШУ

и ВТВ и, во-вторых, испытать ВТВ при токах до 2200 А и номинальных потерях в снабберных цепях.

**Алексей Сурма** представил доклад «Силовые полупроводниковые приборы АО «Протон-Электротекс» для высоковольтных вентилях электропередач и вставок постоянного тока». АО «Протон-Электротекс» выпускает сегодня ряд тиристорных, адаптированных для работы в высоковольтных последовательных сборках. Тиристоры имеют таблеточное конструктивное исполнение, изготавливаются на базе полупроводниковых элементов диаметром 80, 90, 100 мм. По сравнению со стандартными тиристорами — аналогами массовых серий — тиристоры, адаптированные для эксплуатации в последовательных сборках, имеют ряд преимуществ: редуцированный заряд обратного восстановления; малый разброс заряда обратного восстановления; слабая температурная зависимость заряда обратного восстановления; увеличенная «мягкость» обратного восстановления. Улучшить характеристики обратного восстановления позволило применение таких технологий, как создание р-эмиттера с управляемым коэффициентом инжекции, прецизионного протонного и электронного облучения. Кроме того, оптимизация топологии тиристорной структуры и применение методов протонного и электронного облучения позволили минимизировать время выключения ( $t_q$ ) для тиристорных, адаптированных для работы в высоковольтных вентилях. Все тиристоры имеют значения  $t_q$  в диапазоне 250–400 мкс, тогда как для их «стандартных» аналогов характерны значения 400–800 мкс. Важным направлением совершенствования конструкции мощных тиристорных, которое позволяет увеличить их надежность, является применение компонентов самозащиты, интегрируемых в кремниевую



Рис. 8  
Научный сотрудник АО «Протон-Электротекс» А. Сурма



Рис. 9  
Научный руководитель  
АО «НИИПТ» Н. Лозинова

структуру тиристорного элемента, что позволяет исключить выход из строя при возникновении несанкционированного режима работы. Также Алексей Сурма представил характеристики серии разрабатываемых Press-Pack IGBT-модулей. Предполагается, что эти изделия будут востребованы для комплектации мощных СТАТКОМов и вставок постоянного тока.

**Наталья Лозинова**, научный руководитель АО «НИИПТ», рассказала об опыте эксплуатации ПС «Выборгская» за последние 10 лет. В декабре 2016 г. исполнилось 35 лет со времени ввода в эксплуатацию первого преобразовательного блока Выборгского преобразовательного комплекса (ВПК), осуществляющего несинхронную электрическую связь Россия — Финляндия. Основу ВПК составляют четыре КВПУ пропускной способностью 350 МВт каждый и коммутационное устройство с автотрансформатором АТ-3 330/400 кВ, через которое обеспечивается выделение одного из энергоблоков Северо-Западной ТЭЦ (СЗ ТЭЦ) на параллельную синхронную работу с энергосистемой Финляндии. Три из четырех блоков введены в эксплуатацию в 1980-е гг., четвертый блок введен в эксплуатацию в 2001 г. Опыт разработки и эксплуатации

оборудования ВПК имеет ключевое значение как для развития техники постоянного тока в РФ, так и для организации работ по перспективной реконструкции вставки постоянного тока.

На протяжении многих лет в АО «НИИПТ» ведется работа по анализу аварийных отключений оборудования ВПК и разработке рекомендаций по повышению надежности его работы. Анализ материалов этой работы дает возможность оценивать эксплуатационную готовность и надежность ВПК, причем как текущую, так и ретроспективную, а также сравнивать значения этих показателей с мировыми аналогами, принимать меры к повышению характеристик надежности оборудования.

Технические решения, реализованные в ВТВ блоков ВПК, отвечают основным тенденциям мирового вентилестроения: модульность конструкции; световые системы управления и контроля; отбор мощности для собственных нужд на высоком потенциале вентиля; охлаждение деионизированной водой и др.

Ввод нового оборудования ПС Выборгская, связанный с перевооружением и увеличением мощности

ПС, в основном был завершен в 2003 г. Опыт эксплуатации показала удовлетворительную работу систем управления, регулирования и защиты, ее алгоритмы функционирования и уставки отработаны, в 2007–2008 гг. производились их минимальные корректировки. Например, было внесено изменение — предложенное разработчиком загроуление резервного канала защиты от нарушения коммутаций (ЗНК) для снижения вероятности ложного срабатывания защиты при работе выпрямителя с малыми углами включения. После внедрения этого усовершенствования в КУРБ всех КВПУ ложных срабатываний ЗНК не было.

Основной причиной кратковременных опрокидываний инверторных преобразовательных мостов являются помехи (наведенные в цепях управления «ложные» импульсы). Для защиты цепей управления от помех необходимо заменить проводниковые цепи на оптоволоконные.

С 2008 г. проводились работы по обеспечению режима реверса КВПУ4. Создано программное обеспечение КУРБ для реализации реверса (КУРБ-Р). В 2010 г. завершены системные испытания КВПУ4 в реверсивном режиме.

В 2007 г. было три случая лавинного снижения напряжения на шинах 400 кВ и 330 кВ. В одном случае произошла самая тяжелая за отчетный год авария — сброс мощности 850 МВт (по причинам аварий в прилегающей сети переменного тока 330 кВ). В двух других случаях развитие аварии удалось предотвратить снижением мощности передачи. В связи с этим были исследованы режимы работы передачи Россия — Финляндия с большой мощностью для определения достаточности источников реактивной мощности и разработки мероприятий по пре-



### **ПОДКОМИТЕТ В4 РНК СИГРЭ «ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»**

Предметная область Подкомитета В4 включает следующий перечень изучаемых объектов, систем, процессов, явлений, тем, вопросов по различным аспектам функционирования и развития электроэнергетики:

- постоянный ток высокого напряжения: экономические аспекты использования, области применения, планирование, проектирование, эксплуатация, управление, регулирование и защита преобразовательного оборудования и преобразовательных комплексов в целом;
  - силовая электроника для высоковольтных систем переменного тока и улучшение качества электрической энергии: экономические аспекты использования, области применения, планирование, проектирование, эксплуатация, управление, защита, монтаж и тестирование;
  - развитие силовой электроники: разработка новых преобразовательных технологий для преобразовательных комплексов постоянного тока высокого напряжения, систем переменного тока и для улучшения качества электрической энергии
- Предметная область Подкомитета В4 определена решением Технического комитета РНК СИГРЭ от 29.05.2014 № 4.

дотвращению лавинного снижения напряжения. Также были проведены исследования для определения допустимой мощности передачи при снижении мощности короткого замыкания на шинах 400 кВ. В 2008 г. в алгоритмы функционирования регулятора мощности были внесены корректировки, направленные на снижение вероятности возникновения лавинного напряжения.

По требованию системного оператора были внесены изменения в алгоритм системы регулирования мощности в связи с необходимостью реализации алгоритма частотной разгрузки (АЧР).

Также система регулирования мощности ВПК корректировалась в связи с введением в состав ВПК СТАТКОМа мощностью 50 МВар. Системные испытания СТАТКОМа прошли в декабре 2011 г.

В 2013 г. было зафиксировано два случая аварийного отключения КВПУ защитой от зарегулированного режима при включении ненагруженных трансформаторов. Известно, что включение силовых трансформаторов под напряжение сопровождается возникновением броска тока намагничивания, имеющего медленно затухающий характер, величина которого зависит от многих факторов. Этот ток намагничивания вносит существенные искажения в коммутирующие напряжения, что приводит к работе преобразователей с большими углами включения и даже к нарушению коммутаций. После этого были разработаны мероприятия, повышающие надежность работы ВПК при включении ненагруженных трансформаторов. Рекомендованные мероприятия существенно различаются по возможности практической реализации и по стоимости. Представляется целесообразным проанализировать мероприятия, на-

правленные как на снижение токов намагничивания трансформаторов, так и на повышение устойчивости КВПУ к искажениям напряжения, с тем чтобы разделить предложения на простые и легко реализуемые, которые можно осуществить в процессе текущей эксплуатации, и на более сложные и дорогие, которые можно выполнить при реконструкции подстанции.

Хотя часть оборудования преобразовательной подстанции исчерпала свой ресурс и требует замены, характеристики ее надежности по-прежнему высоки. Эквивалентный поток отказов, приводящих к аварийному отключению КВПУ, по статистическим данным за последние 10 лет, составляет 4,9 в год. Основная причина вынужденных отключений КВПУ — течи охлаждающей жидкости в системе охлаждения вентилях, которая нуждается в совершенствовании.

Необходимо отметить, что с 2012 г. ВПК работает с неравномерным графиком нагрузки, что приводит к необходимости ежедневных многократных включений и отключений КВПУ. В 2014 г. было 1374 включения и отключения КВПУ (в 2013 г. — 1377). Несомненно, такой режим ухудшает условия работы оборудования.

Реконструкция ВПК намечена на ближайшее время. В ходе реконструкции планируется замена тиристорных вентилях, средств компенсации реактивной мощности, усовершенствование системы защит фильтровых конденсаторных батарей. Необходимо разработать и внедрить систему защиты, включающую в себя диагностику состояния конденсаторов, фиксирующую внутренние повреждения, в частности, перегорание внутренних предохранителей. Также планируется провести комплексную реконструкцию системы охлаждения.