

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

АВТОР:

О.В. СУСЛОВА,  
К.Т.Н.,  
АО «НТЦ ЕЭС»,  
РУКОВОДИТЕЛЬ  
ПОДКОМИТЕТА  
РНК СИГРЭ В4

Научно-практическая  
конференция подкомитета  
«РНК СИГРЭ» В4 и подкомитета  
«Силовая электроника  
в электроэнергетике» (ПК-6)  
ТК 016 «Электроэнергетика»



В рамках ежегодной международной специализированной выставки «Электрические сети России — 2016» 08.12.2016 г. состоялась 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, планирования, разработки и проектирования электропередач постоянного тока (ППТ), преобразовательной техники для энергосистем, устройств FACTS, общие проблемы внедрения силовой электроники в электроэнергетику РФ и пути их решения.

**Ольга Суслова**, ведущий научный сотрудник АО «НТЦ ЕЭС», руководитель подкомитета РНК СИГРЭ В4, представила обзор тенденций развития и применения ППТ и силовой электроники в энергосистемах, выполненный на основе анализа докладов сессии СИГРЭ 2016 г., в рамках деятельности исследовательского подкомитета В4. На сегодняшний день в мировой электроэнергетике расширяются области использования ППТ и СЭ. Например, помимо традиционного использования в качестве высоковольтных передач электрической энергии на дальние расстояния ППТ применяют для присоединения возобновляемых источников электроэнергии к системам переменного тока, в электрических

сетях средних классов напряжения. Разрабатываются и совершенствуются методы управления мощностью ППТ, которые связывают синхронно работающие части энергообъединения. Энергетики Китая сообщили о планах изменения структуры энергосистемы с синхронной на асинхронную с помощью вставок постоянного тока (ВПТ). Одной из основных тенденций стало использование преобразователей тока (ПТ) и напряжения (ПН) в одном объеме ППТ (ВПТ), создание так называемых гибридных ППТ. Это позволяет оптимизировать стоимостные характеристики электропередачи, систему фильтрации и компенсации реактивной мощности, компенсировать особенности ПТ, связанные с возможностью нарушения коммутации, потреблением реактивной мощности, невозможностью работы с сетью с низким отношением короткого замыкания (ОКЗ). Продолжаются исследования и разработки, направленные на оптимизацию структуры модульных многоуровневых преобразователей напряжения (ММПН), совершенствование алгоритмов управления, регулирования и защиты ММПН.

**Лев Травин**, начальник отдела ФГУП ВЭИ, секретарь подкомитета 22F МЭК «Силовая электроника для электрических передающих и распределительных систем», рассказал о текущей работе своего подкомитета и перспективных планах. В 2016 г. эксперты подкомитета опубликовали девять стандартов, в том числе четыре стандарта по проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока. Среди обновленных в 2016 г. публикаций можно назвать следующие: МЭК/ТД 60919-3, Обн. 1, Изд. 2.0: «Режимы работы электропередач постоянного тока высокого напряжения с преобразователями, ведомыми сетью» — Часть 3: «Динамические режимы»; МЭК 61803, Обн. 2, Изд. 1.0: «Определение потерь мощности

на преобразовательных подстанциях электропередач постоянного тока высокого напряжения с преобразователями, ведомыми сетью (на основе стандарта IEEE 1158-1991)»; МЭК 61975, Обн. 1, Изд. 1.0: «Установки постоянного тока высокого напряжения (ПТВН). — Системные испытания»; МЭК/ТД 62544, Обн. 1, Изд. 1.0: «Системы постоянного тока высокого напряжения (ПТВН). — Применение активных фильтров».

Целью подкомитета на двухлетний период является обновление следующих стандартов: МЭК 60633, Изд. 3.0: «Терминология для электропередачи постоянного тока высокого напряжения (ПТВН)»; МЭК 62747, Изд. 1.0: «Терминология для преобразователей напряжения (ПН) электропередачи постоянного тока высокого напряжения (ПТВН)»; МЭК 62751-2, Изд. 1.0: «Определение потерь мощности в вентилях преобразователя напряжения (ПН) для электропередачи постоянного тока высокого напряжения (ПТВН)» — Часть 2: «Модульные многоуровневые преобразователи»; РWI/TR 22F-11 Ed. 1.0: «Режимы работы электронных шунтовых компенсаторов реактивной мощности в высоковольтных системах переменного тока»; РWI/TR 22F-12 Ed. 1.0: «Работа универсального регулятора потоков мощности (УРПМ) в электрических системах».

Лев Травин подчеркнул, что техническая политика секретариата ПК 22F состоит в том, чтобы максимально расширить комплексную стандартизацию всех видов изделий силовой электроники и противодействовать монополизму, что полностью соответствует технической политике МЭК в целом. Позиция компаний-монополистов объясняется их стремлением препятствовать другим компаниям производить и продавать на мировом рынке основное оборудование СЭ — высоковольтные вентили

и преобразователи. Энергетики многих стран (Россия, Китай, Индия, Бразилия) могли бы спроектировать и построить ППТ и ВПТ гораздо дешевле по сравнению с закупками «под ключ», приобретя все отдельные виды оборудования на мировом рынке. Однако электротехнические предприятия всех стран при отсутствии полного комплекта стандартов МЭК на высоковольтное преобразовательное оборудование не могут производить и продавать на мировом рынке отдельно высоковольтное преобразовательное оборудование высокого качества, а энергетические компании не могут его купить. В частности, несмотря на противодействия представителей компаний-монополистов в области преобразовательной техники (ABB, Siemens, Альстом), удалось обеспечить разработку полного комплекта стандартов МЭК на основное преобразовательное оборудование установок для электроэнергетики, а именно на тиристорные вентили для преобразователей и на преобразователи в целом для классических электропередач постоянного тока. Один из основных стандартов для электрических испытаний высоковольтных тиристорных вентилях для ППТ и ВПТ уже разработан и действует. Второй стандарт МЭК 60700-2, Изд. 1.0: «Тиристорные вентили для электропередач постоянного тока высокого напряжения». — Часть 2: «Терминология» разработан и вступил в действие в 2016 г. В планах на 2018 г. стоит разработка стандарта «Тиристорные вентили для высоковольтных электропередач постоянного тока». — Часть 3: «Основные предельные параметры и характеристики».

Участники конференции выразили мнение, что крупным российским сетевым компаниям необходимо привлекать высококвалифицированных специалистов к работе подкомитета ПК 22F МЭК и организовывать финансирование их участия

в деятельности подкомитета для получения результатов, необходимых для повышения конкурентоспособности российского электротехнического оборудования, расширения рынков для отечественной силовой электроники.

По мнению **Владимира Матисона**, директора департамента инжиниринга комплексных решений ООО «КомплектЭнерго», основными драйверами применения силовой электроники в электроэнергетике являются: рост требований к качеству электроэнергии и надежности электроснабжения; физический износ оборудования, опережающий темпы реновации в условиях ограничения инвестиций; усложнение структуры и управляемости электроэнергетических сетей, в том числе с вводом распределенной генерации; значительные потери электроэнергии при передаче и распределении.

На конференции были рассмотрены вопросы разработки и применения устройств поперечной компенсации на основе СЭ — СТАТКОМ, активных фильтрокомпенсирующих устройств (АФКУ), статических тиристорных компенсаторов (СТК), управляемых шунтирующих реакторов (УШР). Два последних устройства получили наиболее широкое распространение в российской энергетике.

**Александр Матинян**, начальник отдела АО «НТЦ ФСК ЕЭС», представил доклад о техническом проекте УШРТ (УШР трансформаторного типа) 500 кВ мощностью 180 Мвар, разработанном в 2012 г. АО «НТЦ ФСК ЕЭС». В работе показано, что УШРТ с расщепленными вентильными обмотками позволяет уменьшить ток подпитки и сократить среднестатистическое время горения дуги однофазного замыкания фазы ЛЭП на землю, а оснащение линии



Рис. 1  
Выступает начальник отдела  
ФГУП ВЭИ Лев Травников

электропередачи данным линейным УШРТ и релейной защитой линии, дающей возможность детектировать погасание дуги замыкания фазы ЛЭП на землю, позволит сократить время цикла ОАПВ, увеличить вероятность успешного АПВ и повысить надежность работы энергосистемы. Установлено, что быстродействия УШРТ достаточно для предотвращения возбуждения резонанса, потенциально возникающего в не-полнофазных режимах работы ЛЭП при степени компенсации зарядной мощности, близкой к 100%.

**Виктор Чуприков**, генеральный директор ООО «АВД-Электро», рассказал о предложенных специалистами его компании стратегиях совместного управления УШРП (УШР, управляемый подмагничиванием) и СТК, установленных на одной подстанции. Особенностью схемы подстанции является то, что компенсирующие устройства имеют подключение к разным точкам: УШРП подключается непосредственно к шинам 220 кВ, а СТК — к третичной обмотке АТ 10 кВ. При использовании предложенных стратегий обеспечивается корректная параллельная работа в установившихся и переходных режимах двух устройств с различным быстродействием (время реакции СТК составляет порядка 30 мс, а УШРП — не менее 400 мс даже в режиме форсировки). Также Виктор Чуприков представил результаты моделирования работы УШРТ в переходных режимах, которые продемонстрировали его эффективную работу при использовании специальных алгоритмов регулирования.

**Станислав Гусев**, генеральный директор ООО «НПП ЛМ Инвертор», рассказал о разработанных специалистами его компании АФКУ. Силовая схема АФКУ имеет модульную многоуровневую структуру, реализованную посредством последовательного соединения

полномостовых модулей. Высокая эквивалентная частота модуляции обеспечивается совместным действием модулей при низкой частоте модуляции каждого модуля. Тем самым обеспечивается широкая полоса пропускания частот, необходимая АФКУ для одновременного осуществления симметрирования и фильтрации. Низкая частота модуляции отдельного модуля обеспечивает малый уровень потерь мощности. АФКУ можно эффективно использовать для фильтрации высших гармоник, симметрирования напряжений, например, в питающих сетях тяговых подстанций железной дороги, электродуговых печей, буровых установок, промышленных и военных объектов, изолированных энергорайонов. ООО «НПП ЛМ Инвертор» освоил серийное производство АФКУ. Опытный образец многомодульного активного фильтра ММАФ-16К-600 мощностью 16 Мвар установлен на ПС 220 кВ «Сковородино». В 2015 г. изготовлены и поставлены заказчику — ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» — активные фильтры АФС-10-1800-УХЛ4 и АФД-10-3600-УХЛ4.2. В 2016 г. на рудник «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский никель»» отгружено активное фильтрокомпенсирующее устройство АФС-6-2400, выполненное по схеме многоуровневого преобразователя напряжения.

Участники конференции обсудили перспективы применения в энергосистеме РФ устройств для управления продольной компенсации (УПК) различного вида. УПК имеют два основных назначения: повышение пропускной способности линий электропередачи переменного тока высокого и сверхвысокого напряжения, что без строительства новых линий позволяет обеспечить необходимые перетоки между энергосистемами; перераспределение потоков активной мощности в параллельных связях высоко-

вольтных сетей переменного тока, что позволяет выровнять загрузку сетей и уменьшить потери при передаче электроэнергии.

**Владимир Фокин**, главный научный сотрудник АО «НТЦ ФСК ЕЭС», в своем докладе отметил, что УПК широко применяются в сетях переменного тока напряжением 400 кВ и выше в энергосистемах Западной Европы, Южной и Северной Америки, Индии и Китая. В энергосистемах России к настоящему времени применение УПК весьма ограничено. В докладе проанализированы некоторые причины, сдерживающие применение УПК в высоковольтных сетях 500 кВ ЕЭС России и рассмотрены технические предложения по более широкому использованию этих устройств. Представлена блочно-модульная структура построения управляемого (УУПК) и неуправляемого (НУПК) продольного компенсатора, разработанная специалистами АО «НТЦ ФСК ЕЭС».

**Дмитрий Панфилов**, научный руководитель ОАО «ЭНИН», представил малогабаритное устройство продольной компенсации (МУПК) для ВЛ 220 кВ, опытно-промышленный образец которого разработал ОАО «ЭНИН» совместно с АО «НТЦ ФСК ЕЭС». Основными эффектами применения МУПК являются: перераспределение мощности между параллельно работающими линиями; симметрирование фаз; повышение пропускной способности, устойчивости и надежности работы линий; уменьшение потери энергии. Его достоинства заключаются в простоте монтажа на ВЛ (установка без нарушения целостности провода) и мобильности.

На конференции также обсуждались вопросы разработки и применения в энергосистеме РФ оборудования для ППТ и ВПТ для энергосистем различных классов напряжения.

**Виктор Карпов**, заведующий лабораторией АО «НТЦ ФСК ЕЭС», представил доклад «Оборудование для передачи постоянного тока напряжением 20 кВ для распределительных сетей». В результате кооперации усилий отечественных электротехнических предприятий создано оборудование для ППТ 50 МВА напряжением 20 кВ для распределительной сети г. Санкт-Петербурге. Ключевой особенностью проекта является реализация ППТ на основе инновационных технологий высокотемпературного сверхпроводящего кабеля (ВТСП КЛ). Это дает возможность подробного исследования проблем, связанных с повышением надежности электроснабжения потребителей, ограничения значений тока короткого замыкания и регулирования перетоков мощности в городской сети при использовании ВТСП КЛ. Весь перечень электротехнического оборудования ППТ (в том числе и ВТСП КЛ) успешно прошел поэлементные испытания в соответствии с существующей нормативной базой. Создан испытательный стенд в виде трехфазной кольцевой схемы для проведения комплексного опробования основного оборудования ППТ. Данный стенд позволяет проводить полноценные испытания вентиляционной части комплекса электротехнического оборудования ППТ совместно с ВТСП КЛ и штатной СКО в режимах, приближенных к эксплуатационным.

**Роберт Шульга**, ведущий научный сотрудник ФГУП ВЭИ, в своем докладе рассмотрел структуру транспортных и распределительных сетей постоянного тока и их средств автоматизации на основе апробированных и успешно эксплуатируемых более 10 лет на Выборгской ВПТ комплексов управления и регулирования мощности (КУРМ) и комплекса управления, регулирования и защит преобразовательного блока (КУРБ). В докладе были приведены основ-

ные особенности аппаратной и программной реализации указанных комплексов, из которых особенно актуальны фазовая автоподстройка частоты и уникальная система мажорирования КУРБ, обеспечивающие надежность системы в условиях эксплуатации.

**Василий Мистрегази**, инженер ФГУП ВЭИ, рассмотрел функциональную структуру КУРБ и рассказал об особенностях построения и реализации на программном уровне важнейших системных и технологических алгоритмов комплекса. Основное достоинство КУРБ — комплексная реализация задач тактовой дискретизации, синхронизации с сетью фазоимпульсного управления вентилями блока, регулирования, защит и автоматики блока в виде единой тактовой программы управления в реальном времени с тактовой дискретой работы 6 эл. град. (333 мкс).

На конференции также были затронуты вопросы современного состояния и перспектив развития отечественной элементной базы для силовой электроники.

**Алексей Гришанин**, начальник отдела биполярных приборов ОАО «Электровыпрямитель», рассказал об основных характеристиках мощных тиристорных устройств нового поколения, выпускаемых в настоящее время ОАО «Электровыпрямитель» для нужд энергетики и электротехники. В докладе он привел параметры и характеристики приборов новых разработок — 4-дюймовых низкочастотных и импульсных фототиристоров с напряжением от 4,2 до 7,6 кВ, 5-дюймового 8,5 кВ тиристора, 2-дюймового сверхвысоковольтного 10 кВ тиристора, мощного 4-дюймового двунаправленного тиристора. Также А. Гришанин сообщил о том, что предприятие завершает разработку и приступает с 2017 г. к производству 5-дюймовых низкочастот-

ных тиристоров на ток до 3200 А, напряжением до 8500 В для линий передач и вставок постоянного тока. В настоящее время изготовлены и проходят всесторонние испытания в режимах, приближенных к эксплуатации в преобразовательном оборудовании ЛЭП ПТ, опытные образцы таких приборов. Планируется их использование для модернизации блоков тиристорных вентилях для ВПТ «Выборгская». Для этого готовится производственная линия с объемом выпуска 5-дюймовых тиристоров 1,5–2 тыс. шт. в год. На новой 5-дюймовой технологической платформе в будущем году запланированы также разработка и поставка по заказу китайских компаний 5-дюймового фототиристора с напряжением до 8000 В и двунаправленного тиристора с рабочим напряжением 6500 В.

Участники конференции отметили, что на сегодняшний день рынок СЭ для энергосистем в России развит очень слабо по сравнению с аналогичным рынком за рубежом. Одним из факторов, сдерживающих спрос на устройства СЭ в электроэнергетике РФ, является отсутствие нормативной базы и правил, стимулирующих сетевые компании и потребителей к целесообразному внедрению новых технологий.

В ходе дискуссии специалисты отметили необходимость разработки стимулирующих мер, программ по развитию электроэнергетики России, в том числе для обеспечения производителей преобразовательного оборудования долгосрочными заказами.

Были названы факторы, тормозящие производство и внедрение СЭ и ППТ в РФ:

- ограниченные возможности многих предприятий по разработке и производству устройств СЭ для энергетики, требующих

- значительных вложений в исследование, опытные образцы и их испытания;
- разрозненность имеющихся ресурсов, хотя зарубежный опыт говорит о том, что такие задачи решаются в рамках крупных консорциумов, таких как, например, ABB, Siemens или FREEDM (5 университетов США, 2 европейских университета, 51 индустриальный партнер).

Было отмечено, что одним из направлений развития рынка СЭ в России могут стать преобразовательные устройства для присоединения к энергосистеме возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ).

**Юрий Крамской**, главный инженер по инверторному оборудованию СЭС и вторичным системам ООО «Солар Системс», рассказал о текущем состоянии преобразовательного оборудования при строительстве объектов генерации на основе ВИЭ и особенности их интеграции в элек-

трические сети. В 2013 г. был дан старт масштабному строительству электростанций, функционирующих на основе ВИЭ мощностью свыше 5 МВт (ВЭС, малые ГЭС и фотовольтаические солнечные электростанции (СЭС)). Запланированные в РФ объемы строительства в этой сфере до 2024 г. — 3,6 ГВт ВЭС и 1,5 ГВт СЭС, из которых уже введены в эксплуатацию более 70 МВт. Одно из основных требований к указанным проектам в РФ — обеспечение локализации производства компонентов, оборудования и материалов на территории страны. Существенный вклад в степень локализации проектов ВИЭ на данный момент может обеспечить промышленная сборка и приемо-сдаточные испытания преобразовательного оборудования на основе СЭ, являющегося ключевым элементом современных ВЭС (III и IV типов) и фотовольтаических СЭС, обеспечивающего связь между источниками энергии со специфическими характеристиками и стандартными электрическими сетями или нагрузкой, согласо-

вание параметров, управление генерацией и интеграцию таких объектов в энергосистему. В свете ожидаемого углубления требований к локализации перед российской наукой и промышленностью стоит задача разработки и освоения серийного производства всего спектра преобразовательного оборудования для ВИЭ.

В вузах и НИИ РФ ведутся исследования по разработке подходов к созданию математических моделей (в том числе в реальном времени) систем постоянного тока, преобразовательной техники для энергосистем, устройств FACTS.

**Руслан Уфа**, ассистент ЭНИН ТПУ, представил результаты разработки программно-технических средств всережимного моделирования в реальном ВПТ, позволяющих получить достаточно полную и достоверную информацию о процессах в элементах и ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы ВПТ и примыкающих энергосистем.

В докладе **Константина Токаря**, аспиранта ЮУрГУ (НИУ), рассмотрены особенности моделирования ППТ и ВПТ на базе преобразователей напряжения для расчета установившихся и аварийных режимов энергосистемы. Показана область ограничений преобразователей передачи и требованию по поддержанию нормируемого напряжения, определены условия работы преобразователя при значениях активной мощности выше номинальной.

В докладе **Нины Ярох**, младшего научного сотрудника ОАО «НИИПТ», обсуждались процессы возникновения крутильных колебаний, возникающие при взаимодействии между ППТ и расположенным вблизи нее турбогенератором (ТА), а также способы их подавления.



Рис. 2  
Выступает Александр Матинян  
(АО «НТЦ ФСК ЕЭС»)