

# Опыт использования распределённых энергоресурсов в России и мире

➤ Основные тренды развития распределённых энергетических ресурсов и опыт их использования рассмотрели участники совместного заседания Научно-технического совета НП «НТС ЕЭС», секций «Активные системы распределения электроэнергии и распределённые энергетические ресурсы» и «Возобновляемая энергетика и гибридные энергетические комплексы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике.

В работе приняли участие представители АО «СО ЕЭС», ПАО «Россети», ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», АО «НТЦ ФСК ЕЭС», НИК С6 РНК СИГРЭ, ФГБУН «ИНЭИ РАН», ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», ФГБУН «ИРФЭ ОНЦ СО РАН», Комитета ВИЭ РосСНИО, ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ИСЭиЭПС ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», ФГБОУ ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева», ФГАОУ ВО «УрФУ», ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова», ФГБОУ ВО «Сибирский федеральный университет», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет», ООО НПП «ЭКРА», ООО «РТСофт-СГ» и другие.

Открывая заседание, председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределённые энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» д.т.н. **П.В. Илюшин** сообщил, что основной доклад

заседания «Обзор трендов развития и опыта использования распределённых энергетических ресурсов» подготовлен на основе докладов, представленных на 50-й сессии CIGRE, которая состоялась 25–30.08.2024 г. в Париже. П.В. Илюшин подчеркнул, что деятельность CIGRE вносит значительный вклад в развитие основных научных направлений мировой энергетики, позволяет научному сообществу рассматривать и обсуждать инновационные разработки и передовые идеи, которые должны в последующем внедряться в энергосистемы различных стран мира. Анализ и обобщение международного опыта по разным научным направлениям позволяют российским учёным, руководителями и специалистам знакомиться с наиболее интересными и перспективными разработками, которые могут быть успешно использованы в отечественной электроэнергетике.

В 50-й сессии CIGRE приняло участие более 4,5 тыс. делегатов из 120 стран мира, включая представителей энергетических компаний, научно-исследовательских организаций, регулирующих структур, производителей оборудования и материалов для электроэнергетики, проектных институтов и высших учебных заведений. В рамках Пленарной сессии были рассмотрены основные вопросы преобразования энергосистем, направления дальнейшего развития технологий и оборудования в отрасли, возможности и перспективы внедрения новых рыночных механизмов и систем автоматического управления.

С докладом «Обзор трендов развития и опыта использования распределённых энергетических ресурсов по состоянию на 2024 г.» выступил представитель РФ в SC С6 CIGRE, доцент кафедры «Автоматизированные электрические системы» УралЭНИИ



ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», к.т.н. **В.О. Самойленко.**

Доклад состоит из шести разделов.

**Раздел 1. Синтез систем автоматического регулирования с заданными свойствами для распределённых энергетических ресурсов на основе силовых преобразователей.**

Увеличение доли распределённых энергетических ресурсов с инверторами, в частности, работающими в режиме источника тока, приводит к ухудшению условий работы оставшейся синхронной генерации. Критическая доля источников с инверторами оценена примерно в 70% (рис. 1).

Электрозаправочные станции и зарядная инфраструктура считаются в перспективе даже более влияющими элементами энергосистем, чем источники на основе ВИЭ. Электрозаправочные станции в зависимости от настроек инвертора и контроллера заряда АКБ могут существенно влиять на характер переходных процессов в послеаварийном режиме. Наиболее благоприятный режим зарядки — неизменное напряжение, наименее благоприятный — с неизменной мощностью.

Во многих странах ведутся исследования по алгоритмам работы инверторов распределённых энергетических ресурсов в режиме источника напряжения.

Важной находкой исследователей из России является теоретическая возможность подбора уставок для алгоритмов искусственной инерции и демпферной клетки без превышения пределов термического импульса силового преобразователя и пределов мощности первичного источника (рис. 2).

Во многих странах выполняется тестирование разработанных алгоритмов с различными результатами. Например, результатами модельных и натурных испытаний подтверждено соответствие разрабатываемых функций техническому заданию. Однако на графиках имеются признаки бездействия системы управления накопителем энергии в одних случаях и неустойчивого регулирования в других.

Выявлены особенности работы накопителей энергии в режиме астатического регулирования активной мощности, например, вторичного. Также выявлена склонность к колебательным процессам и неадекватному отклику, что связано с особенностями цифровой обработки сигналов.

В связи с этим наблюдается постепенный переход от стандартных ПИД-регуляторов к дискретным (в т.ч. нейросетевым) регуляторам. Дискретная логика, как и стандартная, подразумевает «мёртвые зоны», зоны гистерезиса и задержки на время постоянного регулирования распределённого энергетического ресурса. Предусмотрена логика для выбора мощности

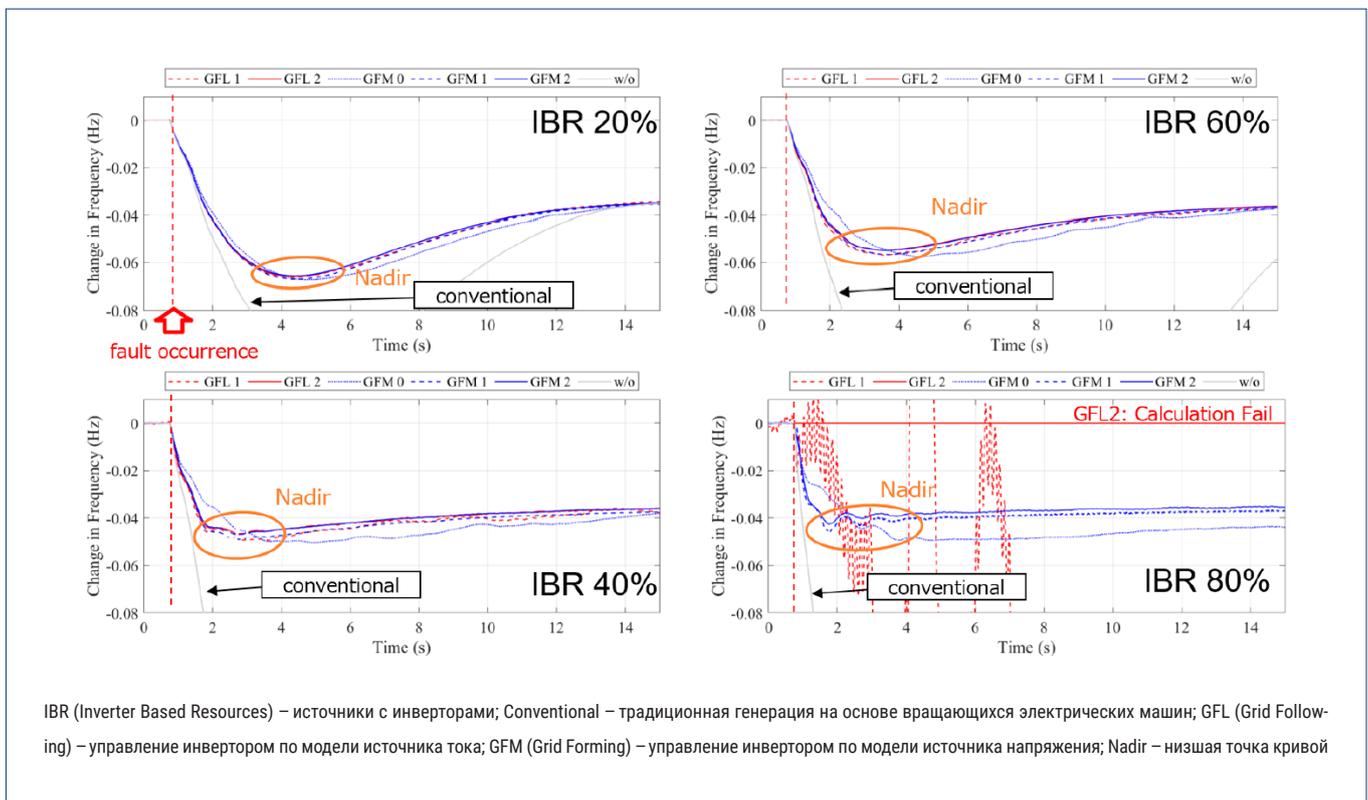


Рис. 1. Исследования критической доли распределённых энергоресурсов с силовыми преобразователями в Японии

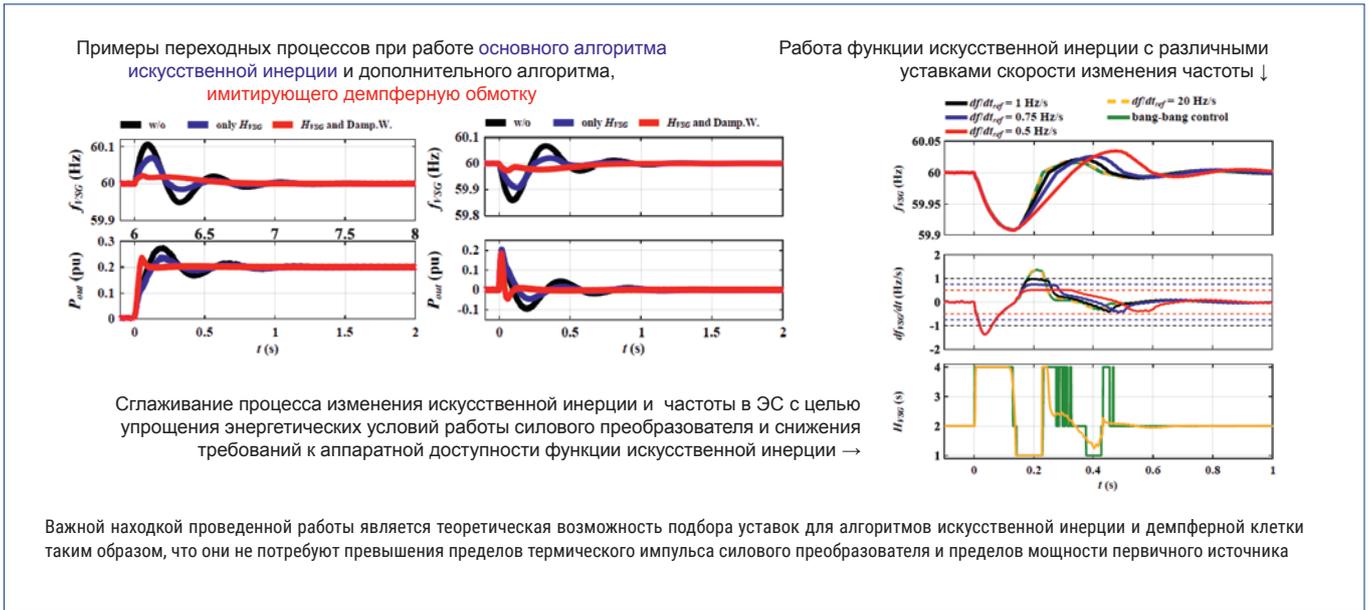


Рис. 2. Синтез адаптивной системы управления распределёнными энергоресурсами с преобразователями энергии на основе концепции виртуального синхронного генератора. Россия (ТПУ)

из статистического предела, последней уставки или мощности аварийного режима.

В ряде публикаций отмечается, что в микроэнергосистемах ожидаемая польза от малой искусственной инерции может быть даже меньше, чем в больших энергосистемах, в связи с высоким зашумлением сигналов и наличием мелких флуктуаций параметров режима (режим далёк даже от квазиустановившегося).

Отмечается, что доступная величина искусственной инерции, как правило, небольшая, часто околонулевая. В реальной энергосистеме это приведёт к тому, что система управления мощностью не сможет противостоять флуктуациям нагрузки в случае их наличия и синхронизировать энергорайоны.

В то же время большим преимуществом распределённых энергетических ресурсов с инверторами является возможность плавного чёрного пуска в нескольких микроэнергосистемах, снабжённых частотоведущими инверторами. Энергорайоны могут включать также источники с частотоведомыми инверторами. Полезным оказывается наличие управляемых нагрузок.

Для микроэнергосистем рассматриваются устройства типа SOP (Soft Operating Point) — многофункциональные вставки постоянного тока, выполняющие функции раздельного контроля перетоков активной и реактивной мощности между цепями, поддержания напряжения, устранения перегрузок и чёрного пуска. Инверторы в таких вставках способны переключаться с модели источника тока на модель источника напряжения или обратно.

Альтернативой работе инверторов в режиме источника напряжения служит усиление регулировочных свойств традиционной синхронной генерации.

Большие надежды по-прежнему возлагаются на внедрение гравитационных накопителей энергии взамен накопителей на основе аккумуляторных батарей. По данным публикаций наиболее сложно обеспечить не столько время отклика гравитационного накопителя, сколько статизм, т.к. процесс изменения мощности вблизи мёртвых точек груза нелинеен. Чувствительность («мёртвая полоса») накопителя — в пределах нормы.

Алгоритмы управления инверторами накопителей энергии не должны приводить к ускорению деградации аккумуляторных батарей. Разрабатываются алгоритмы распределения во времени долей участия в регулировании частоты накопителей энергии разных типов в составе гибридной системы накопления электроэнергии за счёт динамического изменения коэффициентов усиления, способствующие экономии ресурса накопителей энергии.

## Раздел 2. Повышение эффективности агрегации спроса, ценозависимого потребления электроэнергии и розничного рынка системных услуг.

Достигнуто участие в агрегации спроса в 63% по количеству участников против 25% на момент старта программы. Потребители, выполнившие изменение мощности не менее чем на 10% от заявленной, пропорционально изменению награждаются бесплатными кВт·ч, если не превысили месячный норматив

потребления, либо скидкой на электроэнергию свыше месячного норматива.

В актуализированной концепции агрегации спроса ряда стран офисная и особенно промышленная нагрузки должны работать на экономику с максимальной производительностью без снижения мощности, вызванной агрегацией спроса. Под агрегацию спроса предполагается подключать только наиболее гибкие нагрузки, перерыв потребления мощности которых не ведёт к снижению ВВП страны.

Применение ценозависимого потребления позволяет регулировать напряжение на 0,5–0,7%. Регистрируется постепенный рост эластичности в установленные часы с низкой ценой на электроэнергию и снижение эластичности в часы с динамическим ценообразованием.

Опыт ряда стран показывает, что для достижения эффекта регулирования диапазоны изменения цен должны быть весомыми, а процедура — итерационной. Устанавливаются цены на набор и на снижение нагрузки. Выполняется сбор заявок от потребителей по всей сети. Выбираются потребители низкого напряжения на рассматриваемой трансформаторной подстанции (ТП), после чего в ходе итерационного процесса отбора и контроля выполнения заявок, а также контроля напряжения делается вывод о достаточности или недостаточности диапазона регулирования.

По результатам расчётов выявлено, что местные распределённые энергоресурсы за счёт регулирования реактивной мощности и напряжения позволяют на 3% сократить затраты на покупку электроэнергии за счёт снижения потерь, избежать отключения потребителей при снижении напряжения и при этом получают доход больше, чем электросетевые компании.

В настоящее время в ряде стран устанавливаются счётчики электроэнергии, которые умеют управлять нагрузками, зарядной станцией и фотоэлектрической генерацией потребителя, а также реагировать на соответствующие запросы со стороны энергосистемы.

Для частного использования оптимальными являются трехфазные зарядки переменного тока мощностью 3,7 кВт на фазу, обеспечивающие высокие функциональные параметры в сочетании с минимальным ухудшением параметров качества электроэнергии сети. Но перегрузка трансформаторных подстанций предвидится во многих электросетевых компаниях.

Наиболее пригодный для оптимизации потребитель с зарядной инфраструктурой — предприятие общественного электротранспорта. Интегральная оптимизационная постановка задачи предусматривает минимальную мощность депо и минимальную мощность на линии при заданных интервалах движения составов, поддержания резервов и наличии фото-

электрических систем. Особое внимание уделяется вопросу подготовки микроклимата в пассажирском салоне.

Мировой опыт показывает, что электробусы расходуют от 96–111 кВт·ч/100 км (город, с подготовкой микроклимата) до 179–235 кВт·ч/100 км (пригород, микроклимат от тяговой батареи). Электробус без выделенной линии расходует в 10 раз больше энергии, чем электромобиль, в то время как дизельный автобус расходует в 5–7 раз больше топлива, чем дизельный легковой автомобиль. Таким образом, выигрыш потребления энергии «от источника до колеса» (т.н. well-to-wheel) наблюдается только у общественного электротранспорта выделенных линий: электробусов, трамваев и метро.

### Раздел 3. Перспективное развитие энергосистем и распределительных электрических сетей

В большинстве стран мира научное сообщество приходит к выводу, что должны быть один или несколько агрегаторов распределённых энергоресурсов, децентрализованно стремящихся сбалансировать микроэнергосистему с помощью локальных рынков электроэнергии и системных услуг. Такая система самостоятельно может управлять своими балансами мощности и энергии, а также решать локальные режимные вопросы.

Для расчётов режимов в распределительных сетях среднего и низкого напряжения в связи с размерностью задачи и отсутствием точных параметров схемы замещения предлагается использовать дискретно-балансовые режимные модели. Такие модели позволяют без знания параметров схемы замещения электрической сети иметь примерное представление о режимах работы распределительной сети и влиянии на них распределённых энергоресурсов.

Чем больше величина электроотопления за счёт применения тепловых насосов, тем мощнее должна быть фотоэлектрическая станция, а также зарядные станции электромобилей, которые должны выступать буферным накопителем энергии как для нагрузок, так и для источников электроэнергии.

Агрегация спроса на электроэнергию, а также агрегация управления распределёнными по сети фотоэлектрическими станциями, позволяют снизить затраты на строительство или реконструкцию распределительных сетей приблизительно на 40%.

Наиболее высокие показатели развития распределённых энергетических ресурсов до 2030 г. будут в Еврорегии: государственные инвестиции и субсидии составят 231 млрд евро; наращивание мощности/выработки ВИЭ — 76/162% баланса; развитие накопителей энергии на основе АКБ — 70% суммарной

мощности нагрузки; стимулирование использования ВИЭ — 48 компаний со 100-процентным энергообеспечением от ВИЭ; не более девяти перерывов электропитания и коэффициент готовности распределительной сети не менее 99,6926 %.

Изменчивость погоды как относительно многолетних климатических норм, так и на коротких интервалах времени приводит к необходимости введения поправки на изменение мощности ВИЭ вслед за изменением климата при составлении программ перспективного развития на долгосрочную перспективу.

Ряд стран в Азиатско-Тихоокеанском регионе не планирует отказываться ни от ядерной энергии, ни от энергии углеводородов, в то же время постепенно повышая долю ВИЭ до 40 %.

#### Раздел 4. Оптимизация мощности, энергоёмкости и мест подключения накопителей энергии

Приведём пример повышения эффективности применения накопителя энергии. Седелный электротягач Tesla SemiTruck с запасом хода 800 км (АКБ 700–900 кВт·ч) и полуприцепом с 200-ми АКБ Tesla Powerwall (до 20 МВт·ч) в течение суток в нормальных схемах и режимах запасает энергию ВИЭ, а в ремонтных схемах и послеаварийных режимах перемещается между подстанциями (ПС) и сглаживает пики мощности, что в разы улучшает технико-экономическую эффективность проекта.

Мобильные накопители энергии всё чаще используются вместо дизель-генераторов в качестве резервных источников электроснабжения при проведении аварийно-восстановительных работ. По результатам оптимизации предаварийного размещения, места подключения резервных мобильных накопителей энергии, послеаварийной схемы, узлов и величин отключаемой нагрузки получена выгода накопителей при условии агрегации спроса или небольшого ущерба.

Энергетический роутер постоянного тока позволяет более экономично распоряжаться накопленной энергией ВИЭ, а также осуществлять централизованное регулирование реактивной мощности и напряжения, снижая размах его отклонения от номинала с 12 до 7 %.

Наличие сетевого накопителя энергии позволяет существенно сгладить провалы частоты в энергосистеме с 25 до 2,5 Гц при отключении основного источника, но не позволяет устранить их совсем: для этого нужны накопители энергии по схеме источника бесперебойного питания.

Во многих странах мира применяется квазидинамическое моделирование покрытия графика нагрузки накопителями с учётом потерь мощности. Расчёты по

коэффициентам спроса, использования, совмещения и др. не выполняются.

#### Раздел 5. Применение наук о данных (Data Science) в активных распределительных системах

В электроэнергетику постепенно продолжают внедряться системы поддержки принятия решений, в том числе при перспективном развитии. Одна из задач для таких систем — выбор мощности понижающего трансформатора в ТП. Простые модели лучше справляются с задачей, когда загрузка трансформатора измеряется в баллах, что приемлемо для задач оценки технического состояния оборудования и части задач перспективного развития, как замена трансформатора. Простые модели робастны к выбросам и пропускам данных.

С помощью кластеризации профилей потребления электроэнергии выполняется создание «балансового портрета», или же «типичного профиля потребления», которое используется для таких задач, как:

- расчёты квазидинамических электрических режимов при перспективном развитии;
- оценка пригодности потребителей для участия в агрегированном спросе;
- индивидуальные предложения на розничном рынке электроэнергии (квоты, «кэшбэк и скидки»).

Для оценивания состояния в распределительной сети рассматриваются различные модели. Наилучший из всех результатов показывают комбинированные модели на основе узловых напряжений и потоков в ветвях (рис. 3).

#### Раздел 6. Заземление и защита в активных распределительных системах

По-прежнему рассматривается применение полупроводниковых выключателей. Быстродействие полупроводникового выключателя не является фиксированной величиной и рассчитывается исходя из скорости нарастания тока в тиристоре 80 А/мкс. На отключение токов ~5 кА уходит около 60 мкс, что в 1000 раз быстрее современных силовых вакуумных выключателей 10 кВ.

Устройство синхронизированных векторных измерений (УСВИ) и мини-СМПП (система мониторинга переходных режимов) рассматриваются как неотъемлемая часть перспективных активных распределительных сетей. В докладах подчёркивается, что эффективность применения подобных устройств в значительной мере ограничена эффективностью цифровой обработки сигналов на входе.

В сетях с индуктивным и резистивным заземлением сопротивление заземления микроэнергосистемы меняется в разы при параллельной и автономной

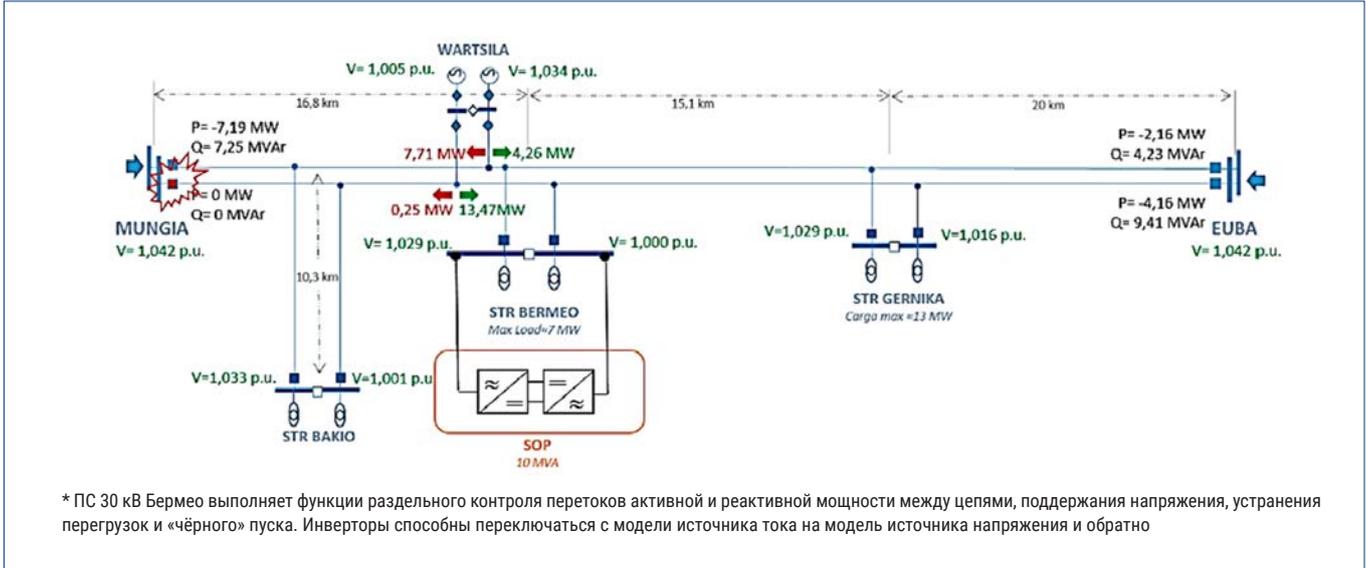


Рис. 3. Комбинированная понижающая и преобразовательная ПС 30 кВ Бермео 10 МВА в Испании

работе (сложно подобрать заземляющий трансформатор без вмешательства в существующее заземление внешней сети).

Отмечены случаи, когда при КЗ на землю бросок тока намагничивания заземляющего трансформатора достигал 2–2,5 о.е. по отношению к суммарному току источников инверторного включения, вызывая их отключение действием токовых защит.

В системах постоянного тока среднего напряжения по результатам экспериментов рекомендовано высокоомное резистивное заземление для каждого из полюсов

электрической сети. Разработана двухступенчатая токовая защита с дополнительным пусковым органом по напряжению. Отмечено, что защита работает и при замыканиях полюса на полюс (рис. 4).

На одном из заседаний были приведены примеры высоких цен на розничном рынке электроэнергии. Так в Еврозоне в 2022 г. цены на рынке на «сутки вперёд» в рублёвом эквиваленте на пике доходили до 100 руб./кВт·ч, а в среднем по году они составили 30 руб./кВт·ч. Участие в нормированном первичном регулировании частоты доходило до 50 руб./МВт,

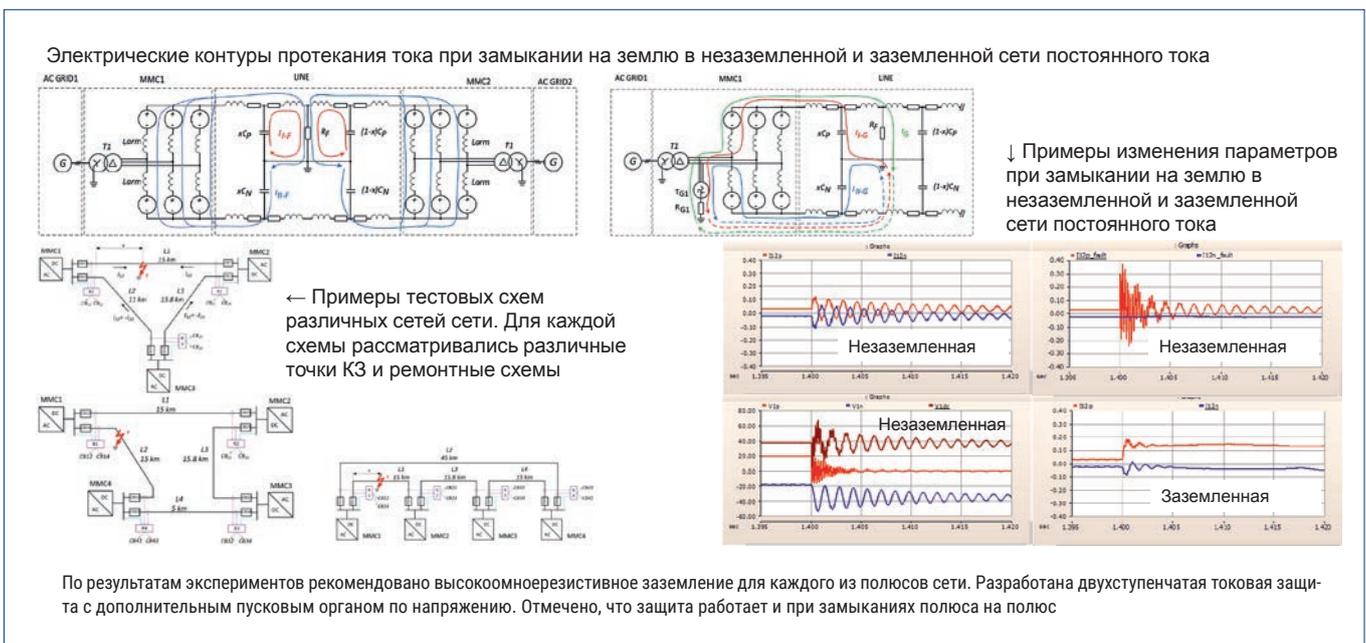


Рис. 4. Изучение вопросов КЗ в преобразователях и в сети постоянного тока СН



Слева направо: Молодюк В.В., Тягунов М.Г., Илюшин П.В., Вольный В.С.



Слева направо: Сорокин Д.В., Исамухамедов Я.Ш., Кононенко В.Ю.

но в среднем по году составило 10 руб./МВт. После закрытия части промышленных предприятий в 2023 г. и роста поставок сжиженного природного газа цены составили в среднем 11 и 6 руб./МВт.

Результаты опроса членов SC C6 CIGRE по вопросу тематик, связанных с активными системами распределения электроэнергии, которым необходимо уделить внимание в перспективе, показали, что большинство представителей научного сообщества беспокоит вопрос, справятся ли распределительные сети с интеграцией распределённых энергетических ресурсов во всех горизонтах планирования и управления.

## ПО ДОКЛАДУ СДЕЛАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Распределённые энергетические ресурсы находятся в стадии качественного и количественного роста и развития в большинстве стран мира.

Развитие распределённых энергетических ресурсов кардинально изменяет технические, технико-экономические и технологические свойства электроэнергетических систем.

В обсуждении доклада и прениях приняли участие: **Сорокин Д.В.** (АО «Россети Научно-технический центр»), **Кутовой Г.П.** (ТПП РФ), **Кононенко В.Ю.** (АО «ФИЦ»), **Тягунов М.Г.** (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), **Хазиахметов Р.М.** (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), **Вольный В.С.** (НП «НТС ЕЭС»), **Николаев В.Г.** (АНО «НИЦ-«АТМОГРАФ»), **Бык Ф.Л.** (ФГБОУ ВО «НГТУ (НЭТИ)»), **Илюшин П.В.** (НП «НТС ЕЭС», ФГБУН «ИНЭИ РАН»).

## СОВМЕСТНОЕ ЗАСЕДАНИЕ ОТМЕЧАЕТ

Российским субъектам электроэнергетики важно знакомиться с передовым опытом использования распределённых энергетических ресурсов и учитывать их при формировании перспективных планов своего развития.

Учёт положительных и отрицательных аспектов применения распределённых энергетических ресурсов в других странах позволит избежать применения неудачных технических решений, а также адаптировать наиболее удачные решения к особенностям российской электроэнергетики.

Желающие в индивидуальном порядке могут более подробно ознакомиться со статьями, использованными в представленном обзоре. На слайдах приведены использованные номера докладов с 50-й сессии CIGRE.

## СОВМЕСТНОЕ ЗАСЕДАНИЕ РЕШИЛО

Рекомендовать автору продолжить периодическое представление обзоров докладов и других материалов CIGRE, выпускаемых на регулярной основе, на совместных заседаниях секций НП «НТС ЕЭС».

Рекомендовать научному сообществу проанализировать, какие из рассмотренных тематик являются наиболее перспективными для дальнейшей проработки в области распределённых энергетических ресурсов в России.

Рекомендовать научным руководителям аспирантов и научным консультантам докторантов проработать темы диссертационных исследований, связанных с распределёнными энергетическими ресурсами, с учётом представленного международного опыта.

С заключительным словом выступил д.т.н. **П.В. Илюшин**. Он отметил, что обзор опыта использования распределённых энергетических ресурсов является полезным как с научной, так и образовательной точки зрения. Обзоры применения в динамике за 10 лет предоставляют понимание направлений развития науки, техники и технологий в рассматриваемой научной области. Международный опыт может быть весьма полезным при планировании развития энергосистем и изолированных энергорайонов в России.