

# Цифровая трансформация энергосистем

Купчиков Т.В., Председатель Исполнительного комитета Электроэнергетического Совета СНГ (ИК ЭЭС СНГ); Борматин В.Е., заместитель Председателя ИК ЭЭС СНГ; Герих В.П., советник Председателя ИК ЭЭС СНГ; Ермоленко Г.В., директор Департамента внешних связей ИК ЭЭС СНГ; Рахимов А.С., директор Департамента экологии энергоэффективности и ВИЭ ЭЭС СНГ; Фролова О.Ю., директор Департамента по стратегии ИК ЭЭС СНГ

(Окончание. Начало в № 5, 2022 г.)

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБМЕН

Для формирования более полной картины, определения роли и значения цифровых технологий, а также задач, стоящих перед профессиональным сообществом на данном этапе, экспертами ЭЭС СНГ проведён обширный анализ научных работ за 2014–2021 годы, представленных в ведущих специализированных изданиях и на крупнейших международных конференциях по направлениям исследований, отражающих прежде всего управленческие аспекты.

Описание направлений исследований содержит обобщение наиболее актуальных проблем и выводов, а также обозначение тем, чаще всего упоминаемых в научных трудах авторов более чем из 70 стран.

## ПЛАНИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ И ЭКОНОМИКА

В настоящее время мировая энергетика переживает период неопределённости и разнонаправленных изменений — технологических, институциональных, регуляторных, политических, климатических.

В электроэнергетике выделяются три базовых тренда, которые оказывают наибольшее влияние на её развитие и трансформацию при всех сценариях:

- дальнейшая электрификация (переход крупных секторов экономики, например транспорта и отопления, на использование электрической энергии) во многих странах сопровождается развитием низкоуглеродной энергетики. Это направление часто называется декарбонизацией;
- цифровизация (как самих элементов электрической сети, так и стороны потребления);
- децентрализация.

В рамках данной темы рассматриваются вопросы планирования энергосистем в условиях глубокой трансформации мировой экономики, изменения парадигмы функционирования энергосистем, связанные с созданием интеллектуальных электроэнергетических систем с активными потребителями, цифровыми технологиями и разнообразными инновационными решениями (в том числе информационно-коммуникационными и интеллектуальными) в условиях новой информационной среды.

Планирование развития энергосистемы необходимо осуществлять с учётом данных изменений и существующих трендов.

Рассмотрим данную тему в нескольких актуальных аспектах.

*Первый — усиление влияния социальных факторов на систему принятия решений при планировании развития энергосистем.*

Общество всё больше осознаёт, насколько существенно повседневная жизнь зависит от решений, принимаемых в сфере электроэнергетики. Это осознание обуславливает растущую роль социальных факторов и прозрачности при планировании инвестиций в электросетевую инфраструктуру.

Потребности системного планирования нуждаются в эффективном и разумном применении принципов прозрачности и участия общественности. Такой подход обусловлен высокой стоимостью внедрения новых технологий и инструментов и ещё более высокой ценой ошибочных решений. Курс на открытость взят во многих странах и является новым элементом в процессе оценки проектов.

Изменение климата и более тесное взаимодействие объектов в рамках отрасли приводят к возникновению более прочных связей между системами

производства электроэнергии, системами отопления и мобильностью, что влечёт за собой увеличение количества критериев и появление новых заинтересованных лиц при выработке решений.

Цифровые технологии рассматриваются в данном ключе как техническая основа для формирования аналитической и доказательной базы при выработке обновлённых критериев отбора, в том числе с учётом социального и экологического вклада, а также расчёта стоимости и рисков жизненного цикла.

Потребители всё больше оказывают влияние на рынки электроэнергии — путём выбора поставщика и участия в принятии инвестиционных решений. При этом цифровые технологии помогают выстраивать более тесную и интерактивную связь с потребителями, динамично вовлекать их в принятие решений.

*Второй актуальный аспект — влияние переменных внешних факторов на управление активами.*

Методы организации управления активами сделали долгий путь развития — от планирования технического обслуживания отдельных компонентов оборудования по направлению до целостного управления эксплуатацией и развития активов энергосистемы, с учётом факторов взаимодействия между различными компонентами оборудования, рисков, экономических воздействий и результатов вероятностных анализов. В качестве примера можно привести политические, экономические, погодные факторы, действия регулятора, а также кибербезопасность и физическую безопасность.

Разработанные компаниями стратегии модернизации сети включают, например, имплементацию систем мониторинга, сбор «больших данных», анализ основных активов, кибербезопасность, особенности использования оборудования и влияние изменяющейся/непланируемой генерации на длительность сроков его эксплуатации.

*Третий актуальный аспект — координация планирования деятельности передающих и распределительных электросетевых компаний.*

По мере того, как генерация и системы накопителей электроэнергии приобретают всё более распределённый характер, а потребление в большей степени реагирует на ценовые сигналы, координация планирования систем передачи и распределения энергии становится насущной необходимостью для управления перетоками электроэнергии в энергосистемах.

В данном аспекте рассматриваются методики планирования работы нескольких соединённых передающих сетей, взаимодействие между передающими и распределительными сетями; вопросы разделения расходов и/или организационная структура компании и стратегия, улучшающие или ухудшающие принципы

координированного планирования; разработка методов планирования с целью соответствия требованиям интеллектуальных сетей, распределённой генерации и регулирования потребления. Цифровые технологии тут также несут существенный вклад в качестве информационно-аналитической и коммуникационной инфраструктуры.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

В данной области исследований рассматриваются вопросы оценки устойчивости энергосистемы к различным динамическим возмущениям, запасы её статической и динамической устойчивости, а также риски перерыва электроснабжения потребителей.

*Актуальный аспект — анализ инноваций в разработке математических и имитационных моделей, интеллектуализация методов и алгоритмов расчёта, особенности обработки больших данных, поступающих с различных цифровых систем и устройств, в том числе SCADA и синхронизированных векторных измерений (Big Data).*

Отдельное внимание уделяется динамическим возмущениям, включая электромагнитные помехи, опасные погодные явления, коронный разряд на проводах воздушных линий, возрастающие объёмы стохастической генерации на основе энергии солнца и ветра и так называемые геомагнитно-индуцированные токи. Для оценки последних предлагается разработать более точные модели проводимости земли.

Рассматриваются отдельные технологические аспекты внедрения Smart Grid, включая вопросы разработки методов прогнозирования и способов борьбы с растущими случаями возникновения подсинхронного резонанса, вопросы внедрения объектов генерации на основе ВИЭ и накопителей энергии, регулирования спроса, применения интеллектуальных технологий учёта, контроля состояния и автоматизации технологических процессов, интеграции «умных» приборов и других потребительских устройств, интеграции технологий хранения энергии, включая электромобили.

*Большое внимание уделяется рассмотрению методов, моделей и приёмов оценки влияния на электрические сети грозных разрядов, проблематике качества электроэнергии, координации изоляции в высоковольтных сетях переменного и постоянного тока, имитационное моделирование механической защиты подводных электрических кабелей.*

Отмечается, что в электрических сетях с большой долей генерации на основе ВИЭ возникают серьёзные проблемы, связанные с высоким уровнем гармонических искажений, при этом имеющиеся в настоящее

время имитационные модели зачастую не способны обеспечить их достаточно точную оценку.

Отдельно рассматриваются сверхбыстрые (доли секунд) квазистатические перенапряжения, возникающие вследствие несимметричных КЗ на землю, разгона генератора в случае резкого сброса нагрузки, а также при иных неблагоприятных взаимодействиях реактивных элементов сети и ЭДС (электродвижущая сила) источников электроэнергии.

Рост производительности вычислительной техники, большой объём измерений и большое число цифровых измерителей в сочетании с возможностями автоматического управления электрическими сетями могут превентивно изменять потокораспределение мощности в зонах с высокой грозовой активностью и тем самым уменьшать время прерывания электропитания потребителей.

Взрывной характер развития цифровых технологий ставит перед отраслью вопрос о будущих тенденциях и приложениях, связанных с методологией, используемой для моделирования электромагнитных переходных процессов в энергосистемах. Потребности в точном моделировании растут всё быстрее с широким внедрением генерации на основе ВИЭ и увеличением интеграции компонентов на основе силовой электроники, что оправдывает переход к моделированию переходных процессов (EMT, Electromagnetic Transients) не только для небольших сетей, но и для крупномасштабных систем, традиционно моделируемых в области фазовых векторов. Подход EMT-моделирования с так называемым цифровым ядром, по мнению авторов, может вскоре стать единственным подходом, используемым инженерами при моделировании переходных процессов в энергосистемах.

**Будущие тенденции в сфере моделирования электромагнитных переходных процессов фактически совпадают с тенденциями моделирования работы энергосистем в целом. Они предполагают: моделирование крупномасштабных сетей со всеми деталями, достигающими уровня электронной («цифровой») копии сети, продвинутое управление данными, интеграция и унификация данных, стандартизация интерфейсов и содержания моделей производителей, совместимость между приложениями и очень быстрые вычисления.**

Другие тенденции включают высокоуровневые методы моделирования и языки, которые могут применяться как пользователями, так и разработчиками программного обеспечения.

**Сетевые данные, стандартизация данных и совместимость являются ключевыми ингредиентами для перехода инструментов моделирования электро-**

**магнитных переходных процессов на более высокий уровень и их признания в отрасли.**

Унифицированная среда на основе вычислительного ядра EMT-моделирования позволяет проводить различные исследования, включающие потоки нагрузки, короткие замыкания, защиту, медленные и быстрые переходные процессы.

Точность моделей должна быть стандартизированной. Необходимо создать концепцию навигатора точности, который сможет автоматически подстраиваться под частотное содержание изучаемого явления. Это означает, что численные методы с унифицированными моделями должны иметь преимущество, ускоряясь для медленных переходных процессов и оставаясь быстрыми и точными для более быстрых переходных процессов.

Увеличение производительности вычислений в мощных средах управления данными открывает возможности для внедрения интеллектуальных методов анализа энергосистем и прогнозирования аномальных режимов или нестабильности. При этом моделирование многочисленных сценариев, которые автоматически суммируются с отчётами о потенциальных проблемных условиях, должно стать обычной практикой. Необходимы значительные исследования для разработки интеллектуальных численных методов, которые минимизируют вмешательство пользователя и в то же время дают возможность обнаруживать проблемы и моделировать оптимальные решения.

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМАМИ

Эксплуатация и управление энергосистемами — ответственная и сложная задача, что связано с возрастающей сложностью операций и потенциальными последствиями неоптимальных решений в режиме реального времени. Новые технологии помогают раскрыть потенциал существующих активов, добиться их полного использования, поддержать быстрое и эффективное внедрение их новых функций и возможностей.

В этом разделе обсуждается *меняющаяся роль центров управления, новые инструменты поддержки принятия решений для операторов, дальнейшее расширение применения УСВИ (устройство синхронных векторных измерений) и систем мониторинга переходных режимов (WAMS), применение или видение искусственного интеллекта.*

Изменения как в аппаратных технологиях, так и на стороне автоматизации способствуют решению задач, которые были выявлены в работе систем в течение нескольких десятилетий, в том числе снижение величины токов короткого замыкания, регулирование частоты и напряжения, управление межсистемными свя-

зьями. Благодаря массовой цифровизации и развитию средств связи открываются новые возможности для повышения эффективности и надёжности системы.

*Актуальный аспект номер один — возможности, необходимые для работы систем будущего.*

Независимый системный оператор Бразилии ONS изменил подход к работе с диспетчерской документацией и перешёл к современной информационной системе, основанной на искусственном интеллекте. Указанный подход предусматривает оцифровку всех документов, используемых диспетчерским персоналом, и интеграцию документов в единую информационную систему с использованием искусственного интеллекта. Изменение подходов к работе информационных систем для диспетчерского персонала обеспечивает необходимость совершенствования процесса принятия решений диспетчерским персоналом в реальном времени<sup>1,2,3,4,5</sup>.

В энергосистеме **Бразилии**<sup>6,7,8,9,10</sup> с целью предотвращения воздействия пожаров (основная причина отключений в стране) на электросетевое оборудование применяется геопространственная информационная система мониторинга оборудования передающей электрической сети. Геопространственная система позволяет контролировать состояние просек ЛЭП на основании графиков их очистки, отключения ЛЭП и фактов возгораний вблизи ЛЭП. Вся информация загружается в единую информационную систему, состоящую из географической базы данных (в которой хранится информация об электросетевых объектах с географической привязкой), мобильного приложения и веб-приложения. Указанная геоинформационная система может применяться диспетчерским персоналом для поддержки принятия решений.

В диспетчерском центре системного оператора энергосистемы **Хорватии** разработана и внедрена интеллектуальная система обработки сигналов о возмущении и определении причины возмущения для повышения скорости ликвидации аварийной ситуации<sup>11,12,13,14</sup>. Интеллектуальная система подключена к системе SCADA со стандартным форматом обмена данными CIM/XML и работает в режиме реального времени с задержкой всего на несколько секунд. Эта система основана на многоуровневой модели потока данных и содержит возможность анализа причин возникновения возмущения. Технология мониторинга и управления переходными процессами применяется для управления частотой энергосистемы с низким показателем инерции<sup>15,16,17,18,19</sup>.

Рассматривается возможность скоординированного управления активной мощностью распределённых генерирующих объектов, таких как ВЭС, СЭС, накопители электроэнергии, при изменении частоты в энер-

госистеме. В докладе рассмотрена система, которая в полной мере учитывает региональное влияние изменения частоты и позволяет ускорить отклик генерирующего оборудования на изменение частоты по сравнению с первичным регулированием. Система работает с использованием данных УСВИ (измерения угла и частоты в реальном времени).

Для обеспечения ввода генерации на основе ВИЭ и распределённой генерации в энергосистему **Германии** и ускоренного вывода из работы генерирующих блоков АЭС и угольных ТЭС<sup>20,21,22,23</sup> был разработан инструмент для анализа и оценки состояния энергосистемы в режиме, близком к реальному времени, и обеспечения поддержки принятия решений оператором в критических ситуациях

Исходной информацией для функционирования приложений являются импортируемые из системы SCADA данные, такие как топология электрической сети, измерения параметров режима, результаты оценки состояния, данные по допустимым нагрузкам электросетевого оборудования, плановые графики генерации и потребления и др.

Для управления растущими долями генерации с использованием ВИЭ и преодоления сложности прогнозирования выдачи мощности данного типа генерацией в энергосистеме **Японии** в 2021 году введена национальная координационная система балансирования (использование резервов активной мощности) не только при возмущениях, но и при отклонениях планового графика генерации от фактического. Координационная система выполняет две основные функции: уменьшение объёма ввода резервов активной мощности и минимизация затрат на их активацию на региональном и общесистемном уровне, а также учитывает возможность использования межсистемных связей для активации резервов в соседних региональных энергосистемах Японии<sup>24</sup>.

Для определения фактических значений допустимых потоков мощности в заданных контролируемых и идентифицированных опасных секциях с учётом фактических параметров работы энергосистемы в **ЕЭС России** разработана и внедрена система мониторинга запасов устойчивости (СМЗУ), которая автоматически выполняет расчёты<sup>25,26,27</sup>.

В энергосистемах **Китая** применяется система онлайн-оценки динамической безопасности. Она разработана на основе платформы диспетчеризации и управления мощностью и может оценивать стабильность в трёх режимах работы, а именно в режиме реального времени, режиме исследования и режиме тренда<sup>28,29,30,31,32</sup>.

Появление распределённых энергоресурсов (РЭР) меняет способы выработки и выдачи энергии в элект-

трическую сеть. Агрегированные РЭР могут использоваться для обслуживания сети и обеспечения двустороннего потока энергии. Увеличение объёма этих взаимосвязанных ресурсов усиливает необходимость обеспечения надёжности энергосистемы как в штатном режиме, так и при возмущениях. Увеличение объёмов РЭР может изменить способ взаимодействия распределительной системы с энергосистемой и превратить распределительные сети в активные источники как энергии, так и основных услуг по обеспечению надёжности, таких как регулирование линейных и частотных характеристик. Эти значительные изменения в распределительной системе, которые могут изменить не только поток мощности, но и реакцию на различные виды возмущений, должны быть оценены и учтены при планировании и эксплуатации энергосистемы.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Новые информационно-коммуникационные технологии (ИКТ), в том числе Интернет вещей, большие данные, аналитика данных, искусственный интеллект и машинное обучение, виртуальная и дополненная реальность, дроны и роботы, а также блокчейн, становятся реальностью на электросетевых предприятиях (ЭСР). Эти технологии внедряются, что позволяет улучшать и оптимизировать операционную деятельность, управление активами и работу энергетического рынка. Обсуждаются детали стратегии и философии проектирования реализованных технологий и платформ, охватывающих системную архитектуру, коммуникации, управление данными и аналитику данных на основе ИИ и МО. Применения сосредоточены на улучшении работы и обслуживания ЭСР.

Архитектура системы, основанная на международных стандартах, таких как методология сценариев использования интеллектуальной энергии МЭК, методология профилей CIM IEC TC57 и технические условия для обмена моделями общей сети (CGMES), разработана экспертами из **Великобритании, Франции и Германии**<sup>33,34,35,36</sup>. Отмечается важность использования стандартов информационных технологий (сценарии использования и UML) и модели архитектуры интеллектуальной сети (SGAM) для разработки масштабируемых и безопасных информационных систем для обмена данными между передающей и распределительной сетевой компаниями. Выделены три основных аспекта: масштабируемость, безопасность данных и оперативная совместимость.

Эксперты японских компаний **Tohoku Electric Power Co., Inc., Electric Power Development Co., Ltd.** и **Chugoku Power Transmission & Distribution Co., Inc.**

продемонстрировали, как развивающиеся ИКТ могут улучшить работу и обслуживание ЭСР. Представлены четыре варианта применения новых ИКТ в энергетике:

- построение сети IoT и интеллектуальных датчиков для анализа тенденций, и обнаружения КЗ на тепловых электростанциях;
- разработка беспроводной сети на основе стандартов IEEE 802.11ac для обслуживания подстанций;
- внедрение «умных» очков для определения рабочего состояния на 500 распределительных подстанциях, повлекшее снижение трудозатрат;
- разработка прототипа инструмента анализа и обработки изображений в целях обнаружения ржавчины в трансформаторах на основе алгоритма кластеризации по k-средним<sup>37,38</sup>.

Российская компания **АО «РТСофт»** разработала архитектуру и платформу для интеллектуального управления распределёнными энергетическими ресурсами. Платформа соответствует стандарту ISO/IEC/IEEE 42010:2011 и состоит из семи модулей: Интернет вещей, интеллектуальное управление, транзакционная энергия, онтологические и информационные модели, управление документооборотом, мониторинг и диагностика состояния и информационная безопасность. Интеллектуальные модели разработаны для оценки и прогнозирования генерации, потребления и запасов энергоресурсов, предиктивного мониторинга исправности активов и прогнозирования профилей нагрузки потребителей с использованием искусственных нейронных сетей глубокого обучения. В прототипе платформы реализовано регулирование спроса просьюмеров (активных потребителей)<sup>39,40,41</sup>.

Расширенная система управления распределёнными объектами генерации на основе возобновляемых источников энергии (DREAMS) используется для обеспечения управляемости небольших РЭР в **Тайваньской энергетической компании** на основе разветвителя Modbus, шлюза IIoT и технологии виртуализации контейнеров Docker. Система DREAMS поможет устранить разрозненность данных, позволит в режиме реального времени отслеживать спрос и предложение солнечной энергетики, предотвращать выход сети из-под контроля путём дистанционного управления инверторами на фотоэлектрических станциях<sup>42</sup>.

Работы экспертов **Уральского федерального университета** продемонстрировали влияние технологий машинного обучения на управление жизненным циклом высоковольтного электрооборудования, такого как силовые трансформаторы и автоматические выключатели. Расчёт индекса исправности основан на основных маркерах и параметрах (например, тангенс дельта и сопротивление изоляции). Для оценки техни-

ческого состояния силового оборудования были разработаны математическая модель и модели оценки состояния на основе алгоритмов машинного обучения. Получено улучшение точности на 56 % при идентификации технического состояния силового и коммутационного оборудования. Предлагаемая модель, основанная на алгоритмах МО, даёт возможность определить взаимосвязи (паттерны, неявные зависимости, корреляции и т.д.) между различными объектами подстанции или электростанции с целью долгосрочного прогнозирования идентификации состояния силовых агрегатов и управления их жизненным циклом<sup>43,44,45</sup>.

В электроэнергетике **Китая** активно внедряется интеллектуальная инспекция подстанций на основе патрульных роботов, которая может заменить ручную инспекцию оборудования подстанций. Одной из основных сложностей для интеллектуальной инспекции роботами является навигация. Обнаружение препятствий и измерение расстояний предлагается проводить на основе глубокой нейронной сети Mask R-CNN и глубинных изображений RGB-D. Глубокая нейронная сеть обучается на предварительно обработанных RGB-изображениях. Расстояние от робота до препятствия измеряется путём сопоставления на уровне пикселей и по результатам детектирования, полученным с помощью Mask R-CNN. Предложенный метод имеет приемлемую погрешность, хорошую надёжность и низкую стоимость в моделируемых средах<sup>46,47,48,49</sup>.

На высоковольтных линиях электропередачи **Корейской электроэнергетической корпорации (KEPCO)** внедряется система диагностики с помощью использования автономных дронов. Отслеживание маршрутов полёта и автономное выполнение манёвров дронов осуществляется наземной системой управления. Для выполнения диагностической задачи разработан ряд алгоритмов технического зрения на основе технологий искусственного интеллекта для обнаружения неисправностей в элементах линии, в основном — деградации изоляторов. Распознавание изображений проводится с использованием алгоритма глубокого обучения. С целью повышения эффективности обучения исходные изображения разделены на квадраты меньших размеров, чтобы увеличить количество обучающих изображений (выполнена сегментация изображения). Предложенный алгоритм имеет коэффициент обнаружения 94 % и точность 95,7 % для определения пробоя изолятора<sup>50,51,52</sup>.

Израильская компания **Israel Electric Corporation Ltd.** совместно с **Университетом Тель-Авива** разрабатывают проект, цель которого — прогнозирование уровня загрязнения наружных изоляторов с учётом отложений пыли Сахары и аэрозоля солей Средиземного моря.

Помимо демонстрации всего процесса, лежащего в основе разработки карт, в проекте показано, что пылевые отложения Сахары и аэрозоли морской соли вносят заметный вклад в уровень загрязнения и должны учитываться при оценке частоты перекрытий<sup>53</sup>.

На **энергетическом рынке Таиланда** реализуется Торговый пилотный проект рынка P2P в городской среде на примере Бангкока. Торговый пилотный проект включает в себя общественный торговый центр, школу, многоквартирный дом и стоматологическую клинику с фотоэлектрическими панелями установленной мощностью 653 МВт. Результаты моделирования показывают, что создание P2P-сообщества может позволить сократить потребление электроэнергии данного энергетического объекта до 18 %. Влияние P2P-торговли не вызвало никаких сбоев в электросети. Однако, несмотря на показанные преимущества, существуют юридические и технические проблемы для развития P2P-сообществ<sup>54,55,56,57</sup>.

**Power System Operation Corporation Ltd (POSCO)**, управляющая Национальным центром и пятью региональными центрами диспетчеризации нагрузки, предложила методику, основанную на технологии блокчейна и использовании одноранговых «умных» контрактов для реализации банковских услуг в энергетике и формирования единой схемы согласования соответствующих вопросов. Цель предложения — создать онлайн-платформу для проведения сделок между всеми заинтересованными сторонами, начиная от конечных потребителей и заканчивая производителями электроэнергии. Технология блокчейна даёт возможность 232 заинтересованным сторонам заключать сделки друг с другом напрямую, избегая таким образом комиссий третьих сторон, задержек и т.п. и устанавливая доверие участников благодаря тому, что они согласуют и выполняют свои собственные требования, а не вынуждены подчиняться требованиям третьих сторон. Использование «умных» контрактов на основе технологии блокчейна позволит не только ускорить расчёты, но и обеспечить прозрачность и готовность к аудиту<sup>58,59,60,61</sup>.

## ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВАМИ

Развитие цифровых технологий в электросетевой отрасли привело к повышению эффективности и совершенствованию методов обеспечения надёжности оборудования, в том числе за счёт улучшения управления средствами цифровизации, мониторинга и аналитики. Накопление данных в режиме реального времени позволяет принимать упреждающие решения, которые влияют на параметры сети и предотвращают отключения из-за сбоев оборудования.

Затруднения в модернизации старых схем, поставках запасных частей и передаче знаний следующему поколению вызывают большой интерес и озабоченность в отрасли по мере того, как осуществляется эволюционный переход к экологически чистой и устойчивой энергетике.

*Актуальные аспекты:*

- моделирование возможных событий в элементах энергосистемы на основании накопленного опыта и данных;
- потенциал машинного обучения и искусственного интеллекта в повышении устойчивости электрического оборудования;
- проектирование и реконструкция воздушных линий и подстанций с учётом меняющихся климатических условий, новые подходы к управлению активами;
- влияние на электрические сети экстремальных условий эксплуатации (особенно морских и подводных);
- использование новых материалов;
- применение новых технологий Индустрии 4.0 (Интернета вещей, виртуальной реальности, дополненной реальности и др.).

Общей чертой большого числа исследований является то, что расходы в течение жизненного цикла являются основным фактором в принятии решения об использовании тех или иных мер модернизации или средств предотвращения и снижения отрицательных последствий КЗ.

В ближайшие годы ожидается увеличение пропускной способности сетей на 50 %, частично за счёт строительства новых линий электропередачи постоянного тока. Участие в энергосистеме распределённых энергоресурсов потребует изменения топологии и состава оборудования линий электропередачи, ввода новых функций управления и контроля и соответствующих режимов испытаний.

Ввиду необходимости более широкого внедрения технологии Интернета вещей, включая установку на подстанциях датчиков и электронных устройств, вопрос их электромагнитной совместимости приобретает всё большую актуальность.

Цифровые технологии предлагают разнообразные преимущества в части испытаний оборудования передачи и распределения электроэнергии.

Компания **General Electric GRID Solutions (Франция)** разработала модель нематериальных активов на основе интеллектуального анализа данных. Повышение эффективности, надёжности и срока службы подстанции является таким же ключевым, как оптимизация соответствующих затрат для управления жизненным циклом силового оборудования высоко-

го и среднего напряжения. Однако из-за технологического развития, исчезающего опыта в области электротехники, старения активов и постоянного давления на операционные и капитальные расходы электрические сети более подвержены воздействию сложных условий, что увеличивает вероятность сбоев. Чтобы свести к минимуму риск инцидента, активы подвергаются ещё большему мониторингу, генерируя огромное число данных. Затем собранная информация используется для принятия решений об обслуживании и замене активов. Однако увеличение числа измерений и проверок не всегда является правильным решением для повышения надёжности, доступности и срока службы актива или парка активов:

- существует риск понимания правильного назначения из-за разного уровня релевантности данных;
- качество рекомендации зависит от качества модели;
- операционные расходы возрастают с увеличением объёма собранных данных.

Решение заключается в том, чтобы отслеживать выборку данных, влияние которых является значительным и приемлемым с точки зрения стоимости сбора. Основная задача заключается в том, чтобы, имея дело с подобным объёмом разнородных данных, выбрать правильный тип и число параметров, а также определить метод и частоту их сбора. Таким образом, можно разработать и использовать точную модель актива, имея в виду, что стоимость сбора данных должна оставаться актуальной по сравнению со стоимостью самого актива и стоимостью, связанной с отказом. В модели приведены способы объединения различных источников информации и интеллектуального анализа данных для разработки согласованной и рентабельной аналитики, оценивающей реальное состояние актива<sup>62</sup>.

## СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Бразильскими экспертами были разработаны две многофакторные методики, подкреплённые экспериментальным программным обеспечением, с целью ранжирования по приоритетности систем датчиков и приложений оперативного контроля в силовых трансформаторах и реакторах<sup>63,64,65</sup>. Разработанная методика индекса исправности (ИИ) позволяет оценивать состояние оборудования, а методика иерархического ранжирования (ИР) соотносит полученные индексы исправности оборудования с последствиями возможного отказа анализируемого оборудования для целей энергосетей компании. Методика ИР включает в себя матрицу рисков, которая используется в процессе оценки рисков для соотношения ИИ с индексом воздействия, определяя приоритеты потенциальных при-

менений систем оперативного контроля. Программное обеспечение составляет оценку масштабов ИИ и ИР, которая используется для определения приоритетов и выдачи рекомендаций о подходящей системе оперативного контроля.

Компания **Eletronorte** в сотрудничестве с **Eng Smart Lead (Бразилия<sup>66</sup>)** внедрила систему DianE, предназначенную для сбора информации о состоянии различного электрооборудования. Система включает результаты физико-химического и хроматографического анализа (ХАРГ) масла и диагностических обследований, проводимых на работающем и отключённом оборудовании. Разработанное Центром исследований электроэнергетики приложение для управления активами интегрирует известные методы анализа в единую систему, помогающую принимать решения в соответствии с нуждами эксплуатации и технического обслуживания. Создана национальная база результатов ХАРГ, содержащая данные по 2783 трансформаторам (13077 проб масла) за период с 1975 по 2019 год.

В электрических сетях **Норвегии** управление парком трансформаторов ведётся на основании сбора данных в общенациональном масштабе о их состоянии, отказах и утилизации<sup>67</sup>.

Совершенствование процесса сбора данных происходит за счёт сотрудничества между владельцами трансформаторов, норвежской группой по силовым и промышленным трансформаторам, сетевым системным оператором и исследовательскими институтами. Метод предполагает оценку индивидуального состояния трансформаторов путём анализа и сравнения эксплуатационных показателей со статистическими данными, что позволяет получать наработки исходя из фактических отказов трансформаторов, исследований утилизации и статистики состояния.

Компанией **ABB** представлен миниатюрный робот TXplore — микросубмарина для работы в трансформаторном масле, которая предназначена для визуального осмотра активной части масляных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов без полного слива масла из бака и подъёма колокола бака. Робот оснащён четырьмя камерами для визуального осмотра и записи и обладает малыми габаритами (ширина ориентировочно около 30 см) и высокой манёвренностью, что позволяет ему проплыть в масляных промежутках между активной частью и баком трансформатора<sup>68</sup>.

Электросетевая компания **Powergrid** — крупнейший в **Индии** оператор магистральных сетей — эксплуатирует более чем 2800 силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов<sup>69</sup>. Для управления парком трансформаторов и реакторов были разработаны два цифровых продукта — система мониторинга TOCMS

и система поддержки принятия решений по текущей эксплуатации PALMS.

Крупнейшая электросетевая компания **США American Electric Power (AEP)** запустила в работу Корпоративный центр контроля состояния основного оборудования (Asset Health Center, АНС)<sup>70</sup>. В основе работы АНС — цифровая платформа, объединяющая информационные технологии с технологиями обслуживания электрооборудования для более эффективного управления активами электросетевой компании со следующими характеристиками:

- низкая надёжность электрооборудования с большим сроком службы и высокими убытками при их повреждении;

- недостаточная наблюдаемость состояния основного электрооборудования;

- необходимость обслуживания большого парка трансформаторов в условиях ограниченных ресурсов и необходимости снижения эксплуатационных затрат.

Применение цифровых технологий позволяет обеспечить:

- автоматический сбор данных с датчиков и систем мониторинга основного оборудования;

- углублённый анализ данных о текущем состоянии и истории эксплуатации для принятия оперативных решений и выполнения действий, направленных на предупреждение повреждений и повышение надёжности электрооборудования;

- повышение наблюдаемости технологических процессов и технического состояния активов;

- всесторонний анализ данных для повышения эффективности управления активами.

Крупнейшая электросетевая компания **Италии Terna** запустила Платформу поддержки эксплуатации (Operation Support Platform)<sup>71</sup> с целью сбора данных об эксплуатации и состоянии оборудования, оптимизации эксплуатации и обслуживания оборудования, а также анализа повреждений.

Работа платформы базируется на данных, получаемых от систем мониторинга SMOAT, которая охватывает всё основное первичное оборудование ПС:

- трансформаторы, автотрансформаторы, шунтирующие реакторы;

- ёмкостные трансформаторы напряжения;

- трансформаторы тока;

- коммутационные аппараты;

- ограничители перенапряжений.

Достигнутые эффекты от внедрения системы:

- обеспечение сравнительно низкого уровня повреждаемости трансформаторов — менее 1% в год (парк трансформаторов свыше 800 шт.);

- снижение числа незначительных отказов (с временем восстановления от 1 до 7 дней).



В **России** создана опережающая время комплексная интеллектуальная автоматизированная система мониторинга, диагностирования и управления техническим состоянием парка силовых трансформаторов, в которой для анализа состояния оборудования используются онлайн-система мониторинга и данные оффлайн-базы знаний, содержащей технические характеристики, рабочие параметры, результаты традиционных испытаний и измерений, экспертные оценки и прогнозы. В этой системе особый акцент сделан на использовании методов адаптивного прогнозирования параметров, контролируемых онлайн с учётом взаимного влияния процессов, происходящих в трансформаторе.

Разработанная система не только даёт оценку текущего технического состояния трансформатора, но и выдаёт управляющие сигналы и рекомендации персоналу по необходимым изменениям режима работы трансформатора, операциям технического обслуживания и ремонта. Такая комплексная интеллектуальная система мониторинга позволяет с большим доверием использовать в эксплуатации результаты расчётов онлайн систем мониторинга и сделать работу с такими системами максимально полезной и максимально автоматизированной, не вовлекающей персонал в процесс диагностирования, выдающей понятный конечный результат.

### **Воздушные линии**

В энергосистеме **Исландии** используются технологии искусственного интеллекта для контроля ВЛ. Обученная система искусственного интеллекта может выполнять задачи по контролю на ВЛ изоляторов определённого типа<sup>72</sup> с высокой достоверностью, быстротой, согласованностью результатов и экономически эффективным способом.

На ВЛ **Франции** проводится спутниковый мониторинг воздушных линий.

Проведена детальная классификация земельных участков с выявлением возможных критических изменений. Осуществляется оценка текущего состояния ВЛ и состояния древесно-кустарниковой растительности в охранных зонах ВЛ.

Существует опыт разработки робота для быстрой и безопасной установки маркеров<sup>73</sup>. Робот устанавливается на линию при помощи вертолётa. На сегодняшний день с помощью этой технологии установлено уже более 400 маркеров.

В результате совместной работы **НТЦ ФСК ЕЭС, ПАО «ФСК ЕЭС», ПАО «Россети» и ПАО «Роснефть»** в области управления эксплуатацией воздушных линий электропередачи было проанализировано 10 000 актов расследований технических неисправностей. Это позволило:

- выявить участки повышенной аварийности (по типу воздействия и годам);
- выявить участки линий, не соответствующих климатическим нагрузкам;
- формировать перечень мероприятий по снижению аварийности (в автомат. режиме);
- ранжировать мероприятия в соответствии с параметрами по отключениям и размерам инвестиций;
- осуществлять постинвестиционный мониторинг реализованных мероприятий.

### **Подстанции**

Для планирования, проектирования, строительства, эксплуатации и обслуживания подстанций компании **TEPCO Power Grid, Inc, Chubu Electric Power Co., Inc., Kansai Transmission and Distribution, Inc., Toshiba Energy Systems & Solutions Co, Hitachi, Ltd., Mitsubishi Electric Co. (Япония)** разрабатывают и применяют различные решения в области цифровизации<sup>74,75</sup>, такие как: патрулирование с помощью беспилотников, система диагностики с использованием искусственного интеллекта (ИИ) на основе применения сетевых камер и анализа изображений, система тепловой оценки трансформаторов. Для оптимизации строительных работ применяются 3D-модели подстанций, а для поддержки эксплуатации и технического обслуживания на уровне подстанции используются методы виртуальной реальности (VR) и смешанной реальности (SR).

Компании **KEPCO, YOHO ELECTRIC и HYUNDAI ELECTRIC** реализуют подходы групповой спецификации для силовых трансформаторов с использованием интеллектуальной системы мониторинга, основанной на технологии IEC 61850 и граничных вычислениях<sup>76,77,78,79</sup>. Датчики Интернета вещей предоставляют данные для мониторинга, управления и профилактической диагностики силовых трансформаторов. Граничные вычисления имеют преимущества по сравнению с облачными для диагностики и управления самим силовым трансформатором.

Эксперты французского и итальянского подразделений компании **GE** рассматривают применение интеллектуальных датчиков на оборудовании (разъединителях) подстанций<sup>80,81</sup> для измерения температуры, смещения контактов и токов утечки, наряду с рабочими характеристиками двигателей для целей управления активами и технического обслуживания, а также для разработки индексов исправности объектов. Данные также используются для сравнения с сетевой моделью оборудования типа «цифровой двойник».

Особое внимание уделяется неинвазивным методам оценки активов для обеспечения мониторинга в процессе эксплуатации, который может предотвратить вынужденное отключение или вывод оборудо-

вания из эксплуатации в неподходящее время. Достигается возможность оценки исправности ключевого оборудования в периоды пиковой нагрузки и высоких воздействий в системе.

Проект **FITNESS** («Умная» подстанция для сетей электропередачи) — первый живой пример цифровой подстанции и системы автоматики, укомплектованных оборудованием разных поставщиков, на базе МЭК 61850 в **Соединённом Королевстве**<sup>82</sup>. Проект, реализованный под руководством Scottish Power Energy Network в **Шотландии**, прошёл опробование и испытание совместно с традиционной технологией на системе передачи электроэнергии Scottish Power. Доклад посвящён разработке, тестированию, эксплуатации и техническому обслуживанию различных архитектур связи и резервирования на основе опыта и результатов испытаний, проведённых как за пределами объекта, так и на объекте в режиме реального времени в соответствии с требованиями инженерного проекта. Подчёркивается необходимость наличия надёжной сети связи для безопасной и надёжной работы цифровых подстанций.

«**Россети ФСК ЕЭС**» создала и запустила в промышленную эксплуатацию программно-технический комплекс автоматизированного осмотра элементов оборудования на ПС 500 кВ. В нём задействованы дистанционные методы мониторинга оборудования ПС, использующие решения в области анализа данных и компьютерного зрения с применением нейронных сетей, позволяющие оперативно сигнализировать о развивающихся технологических нарушениях с целью их своевременного устранения. Применение таких комплексов при развитии соответствующей нормативной базы позволит осуществлять эксплуатацию оборудования подстанций на основе безлюдных технологий. В ПТК использованы как стационарные платформы, так и — впервые в мире с задействованием средств автоматического распознавания — квадрокоптеры (БПЛА). Собран уникальный дата-сет, позволяющий использовать аппарат компьютерного зрения на подстанциях по всему миру лишь с незначительным временем дообучения.

#### **Кабельные системы**

Эксперты, представляющие **RINA Tech UK, Electricity Authority of Cyprus, University of Southampton**, разработали надёжную и мощную систему прогнозирования термических показателей кабельных муфт для оперативного контроля состояния оборудования. Данная система разработана в соответствии с концепцией Industry 4.0 и позволяет снизить риск отказов в электрической сети. Система прогностического мониторинга смонтирована на кабельной муфте подстанции ВН/ СН на Кипре и работает уже четыре года.

Система использует алгоритмы безнадзорного машинного обучения (МО) для прогнозирования динамики температуры различных секций кабеля. Так как модель выполняет расчёты на основании распределённых измерений температуры, она подходит только для краткосрочных прогнозов. Результат работы этих алгоритмов МО сравнивается с фактическими итогами распределённого измерения температуры на одном ветропарке в Великобритании и показывает довольно хорошую корреляцию.

**Кипр** характеризуется климатическими условиями, отличными от условий Великобритании (сухое жаркое лето, мягкая зима). Следовательно, данные, собранные в этих условиях, наряду с данными, собранными в Великобритании, могут быть ключевым фактором для исследования срока службы кабеля в различных средах и разработки эффективной в различных климатических поясах универсальной системы тепловизионного прогнозирования для мониторинга состояния оборудования<sup>83,84</sup>.

Технология дополненной реальности (ДР) используется для диагностики соединительных и концевых кабельных муфт<sup>85</sup>. В тесном сотрудничестве с командой программистов и разработчиков ДР команда проекта создала пилотные приложения для двух различных платформ ДР и набор 63 функциональных возможностей: планшет для детальной визуализации при обслуживании и замене компонентов; очки ДР для тренировки монтажников.

**Австралийской компанией TransGrid** разработан способ защиты критических кабельных линий с помощью оптоволоконных акустических и вибрационных датчиков на стадии монтажа<sup>86,87,88,89</sup>. Датчики с волоконным чувствительным элементом настраиваются на механические работы (экскаваторы, бурильные машины), рытьё котлованов, перемещение и разделение кабелей. В случае обнаружения потенциально опасных механических воздействий на место с проверкой выезжает дежурный патруль.

#### **Системы постоянного тока высокого напряжения (ПТВН)**

Эксперты **HYOSUNG Corporation** и **SOONGSIL University (Республика Корея)**<sup>90,91,92,93</sup> провели анализ видов и последствий отказов и анализ дерева ошибок для системы преобразователей напряжения (ПН) ПТВН с целью определить ключевое оборудование и найти причины отказов, оценивая важность компонентов подстанции ПН ПТВН. Обсуждается разработка датчиков и приоритетность технического обслуживания объектов, проводится анализ чувствительности дерева ошибок при определённых сценариях. Приоритетность подсистем определяется с помощью технологии превентивной диагностики, которая может быть при-

менена в зависимости от важности подсистемы станции ПТВН.

Управление жизненным циклом системы ПТВН может быть рассмотрено с точки зрения промышленного сервиса<sup>94,95,96,97</sup> или «экосистемы сервиса», которая включает производителей, операторов и подрядчиков. Вопросы повышения долгосрочной надёжности, готовности и устойчивости рассматриваются на таких примерах, как управление климатическими условиями, минимизация «окон отключения» и повышение физической и кибербезопасности. Также рассмотрены методы профилактического обслуживания, использование систем сбора данных (регистрация данных, управление активами, создание цифрового двойника), улучшение анализа причин отказов, улучшение сотрудничества, учёт затрат в связи с неготовностью оборудования и модели потенциальных договоров подряд на сервисное обслуживание.

### **Проектирование**

Передовое компьютерное программное обеспечение обеспечивает не только быстрые расчёты и аналитику. Новые платформы проектирования в 3D позволяют реализовать целый ряд функций от визуализации развёртывания на местности до виртуального проектирования подстанций и воздушных и кабельных линий.

Так, например, в случае с цифровыми измерительными трансформаторами, у которых отсутствуют вторичные цепи, возможен переход от классических понятий кернов ТТ/ТН для коммерческого учёта и РЗА к понятию универсального измерительного потока, когда один и тот же цифровой поток данных соответствует одновременно классу точности коммерческого учёта и классу точности РЗА для переходных процессов.

Появление «унифицированного» измерительного потока позволяет реализовать бесшовное резервирование коммерческого учёта и РЗА, открывает широкую возможность для функциональной интеграции вторичных устройств, а это приведёт к кратному снижению их количества.

В случае с оптическими измерительными трансформаторами тока это позволяет закрывать целый диапазон номинальных токов. Такой принцип заложен в унифицированных классах точности 1И, 2И, 1Р, 2Р СТО ПАО «Россети», что значительно упрощает проектирование, снижает количество ЗиП в целом по сетям (в 5–6 раз) и приводит к снижению себестоимости за счёт снижения номенклатуры выпускаемых изделий производителем, а также к снижению ошибок при проектировании и закупке оборудования.

Возможна оптимизация терминалов РЗА путём снижения их номенклатуры и применения более эф-

фективных алгоритмов с учётом отсутствия намагничивания ТТ и улучшенных характеристик ТН.

Обычные расчёты рабочих характеристик силовых кабелей основаны на аналитических методах, предусмотренных стандартами МЭК. Эти методы, тем не менее, приводят к довольно консервативным результатам, которые были приемлемы в прошлом, поскольку кабели высокого напряжения обычно не нагружаются до их тепловых пределов и, условно говоря, эксплуатируются в холодных условиях. Однако энергосистема переживает переход к возрастающим и более динамичным нагрузкам и, следовательно, к потребности в более гибкой и отказоустойчивой сети. Это относится, в частности, к кабельным системам в городских районах. Оптимизированное использование существующих и будущих кабельных систем является важнейшей характеристикой для удовлетворения растущих требований.

Экспертами Лаборатории высоковольтных испытаний **Граца** в сотрудничестве со специалистами Института техники высокого напряжения и характеристик систем Технологического университета Граца, а также сетевой компании Wiener Netze GmbH (Австрия) проведён расширенный тепловой расчёт кабелей 400 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена для городских сетей на основе экспериментальных данных за длительный период времени<sup>98,99,100</sup>. Несмотря на возможности компьютерного проектирования, принятые методы моделирования сопряжены с некоторыми трудностями в определении граничных условий и в отношении моделирования состояния окружающего грунта. Воздействия окружающей среды (солнечное излучение, осадки и т.д.) обычно в расчёт не принимаются, хотя они оказывают значительное влияние на температуру, а значит, и на допустимую токовую нагрузку высоковольтных кабельных систем. Исследования проводились на существующей системе кабелей 400 кВ. Для проверки расчётов было установлено более 70 различных датчиков. Эксперимент проводили два года для получения с помощью вычислительных инструментов «цифрового двойника».

Эксперты компании **Mitas Industry** и **Университета Hacettepe (Турция)** применяют искусственную нейронную сеть (ИНС) для минимизации усилий, затрачиваемых на инженерное проектирование стальных покрывающих плит опорных конструкций подстанций<sup>101,102,103</sup>. Архитектура ИНС была разработана для связывания проектных параметров с требованиями в качестве простой и быстрой альтернативы сложному анализу методом конечных элементов. На основании результатов можно сделать вывод, что предложенная конфигурация ИНС способна с высокой точностью предсказать максимальное напряжение и мак-

симальную абсолютную деформацию, возникающие на крышке опорного изолятора. Было доказано, что предложенная структура ИНС обладает возможностями как интерполяции, так и экстраполяции с высоким уровнем точности и быстродействия.

Передовое компьютерное программное обеспечение обеспечивает не только быстрые расчёты и аналитику. Новые платформы проектирования в 3D позволяют реализовать целый ряд функций: от визуализации развёртывания на местности до виртуального проектирования подстанций и воздушных и кабельных линий.

### **РЗА, цифровые подстанции**

Влияние, зависимость и важность коммуникационной сети в РЗА за последние несколько десятилетий выросли экспоненциально. Исторически использовавшаяся для базового управления, мониторинга и повышения эффективности схем защиты, сегодня она является основой многих РЗА, реализуя многие приложения, которые ещё несколько лет назад не были технологически осуществимы. Этот прогресс ускорился благодаря усовершенствованию технологий связи и внедрению стандарта МЭК 61850, который позволил создать общую платформу для работы, устранив многие из прежних проблем совместимости. Важно понимание преимуществ и проблем, связанных с этим новым способом работы, и его влияния как на новую, так и на существующую инфраструктуру РЗА и связанную с ней энергетическую систему. За последние годы был накоплен значительный объём исследований, экспериментов и наработок, и он продолжает расти по мере того, как преодолеваются новые трудности и идёт развитие РЗА для будущего, РЗА для решения задач, стоящих перед развивающейся энергосистемой. Это неизбежно приведёт к необходимости обмена большим количеством данных в безопасном режиме на всё более высоких скоростях. Для достижения этой цели потребуется эффективная и оптимизированная система связи, и необходимо будет использовать преимущества развития коммуникаций и новых технологий, а также соответствующих инструментов, стандартов. В связи с характером новой сложной конструкции РЗА тестирование и мониторинг будут играть жизненно важную роль, поскольку традиционные методы могут больше не применяться по мере изменения тестовой среды и работы с большим количеством цифровых данных. По мере того, как совершается переход к цифровым подстанциям, необходимо будет сформировать стратегию миграции, поскольку смешанные технологии, по всей видимости, будут сосуществовать ещё много лет. Коммуникационные сети следует рассматривать уже не как отдельную единицу, а как составную часть РЗА.

Существует пример инструментария (**Испания**), в котором можно создавать виртуальные копии одного или нескольких интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ). Являясь виртуальной копией физического актива, включая интерфейсы, функциональные возможности и алгоритмы, цифровой двойник даёт пользователям систем защиты и управления многочисленные преимущества, такие как сокращение времени выполнения и стоимости проектов, более эффективное обучение и устранение ошибок, связанных с человеческим фактором. Цифровые двойники могут быть использованы на всех этапах жизненного цикла РЗА<sup>104,105,106,107</sup> включая проектирование и инжиниринг, проверку уставок, квалификацию, обучение, анализ отказов и техническую поддержку. Встроенные средства для статических и динамических испытаний позволяют использовать цифровой двойник для конфигурирования, настройки и испытания ИЭУ под конкретные пользовательские цели, при этом инженеру не требуется доступ к физическим ИЭУ и испытательному оборудованию, как и к подстанционной или испытательной лаборатории. Предполагается, что использование таких виртуальных двойников ускорит и повысит эффективность разработки и валидации стандартных решений РЗА, сократит эксплуатационные затраты, обеспечив ускоренное исследование КЗ, более быструю и эффективную техническую поддержку, а также снизит взаимозависимость между различными подразделениями.

С помощью разделённых на части фрагментов сети 5G экспертами **Центра диспетчеризации и управления электроэнергией Китайской южной энергосистемы, Исследовательского института электроэнергетики Китая** реализована многотерминальная численная схема дифференцирования тока<sup>108,109,110</sup>. Это решение выбрано из-за жёстких требований к защите телекоммуникаций (скорость, надёжность и задержка), для его реализации разработан многофункциональный многоинтерфейсный шлюз 5G. Проверка его эффективности была выполнена путём полевого испытания сегмента интеллектуальной сети 5G для совместного управления дифференциальной защитой и автоматикой. Сегментированная сеть связи 5G может удовлетворить требования таких приложений РЗА и является идеальной ареной для разработки будущих распределённых приложений интеллектуальных сетей.

Рост мощностей генерации на основе ВИЭ в энергосистеме может значительно влиять на стабильность систем специальной защиты (ССЗ) и управление ими<sup>111,112,113,114</sup>. Чтобы идти в ногу с этими изменениями и обеспечить соответствие ССЗ своему назначению, требуется обмен всё большим объёмом данных

в сети по сравнению с обычными ССЗ. Это, в свою очередь, требует более сложной коммуникационной инфраструктуры и представляет собой серьёзное препятствие для развития ССЗ. В связи с этим в докладе предлагается новый усовершенствованный коммуникационный блок (PDH-R) для сети с кольцевой топологией. В докладе описаны особенности сети с кольцевой топологией, использующей PDH-R, и показан опыт её применения в новейшей широкозонной ССЗ, а именно в системе комплексного контроля стабильности (ККС).

В **Японии** рост мощности генерации на основе ВИЭ привел к увеличению перегрузки линий электропередачи и трансформаторов<sup>115,116</sup>. Поскольку развитие электрической сети не всегда возможно, часто используется система релейной защиты от перегрузок (РЗП). Традиционные системы РЗП не способны удовлетворить потребности сложных энергосистем с растущим количеством распределённых генераторов. Эксперты Chubu Electric Power Co., Inc. и Mitsubishi Electric Corp. разработали новую систему РЗП, основанную на коммуникациях GOOSE и МЭК 61850, использующую архитектуру «точка-многоточка». Обсуждаются относительные достоинства новой системы по сравнению с традиционной.

## ИСПЫТАНИЯ, МОНИТОРИНГ, ДИАГНОСТИКА

Многие предприятия отрасли теряют старые квалифицированные кадры, переживают сокращение штата и передачу некоторых видов деятельности на аутсорсинг. Эти факторы приводят к потере знаний внутри компании и (особенно в отношении старых объектов) к утрате многолетних наработок, которые трудно заменить. Несколько работ специально посвящены методам улучшения знаний о состоянии объектов и, в свою очередь, стратегиям технического обслуживания. Лучшее знание о состоянии оборудования должно улучшить управление активами при условии достаточного понимания результатов тестирования. В последние годы было предложено множество автоматизированных подходов для обработки данных — от простых методов, таких как треугольник Дювала для интерпретации результатов анализа растворённых газов, до гораздо более сложных методик на базе искусственного интеллекта.

Если отвлечься от физических объектов, нужно заметить, что наступает четвёртая цифровая промышленная революция, характеризующаяся слиянием технологий, которые стирают границы между физической и цифровой сферами. В электроэнергетике разработаны приборы и методы, основанные на понимании физики и химии, для оценки качества продукции и старения материалов. В будущем аналитика данных

(например, машинное обучение или нейронные сети) и цифровые двойники предлагаются в качестве потенциальных подходов для оптимизации работы сети и управления активами.

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ, СНИЖЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ, ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ

Для целей интеграции возобновляемых источников и технологий аккумуляторных систем накопления энергии (АСНЭ)<sup>117,118,119</sup> в **корейскую электроэнергетическую сеть** была разработана Концепция стандартного дизайна, получившая название «модульной зелёной подстанции» (MGS). Используемые технологии включают изоляцию трансформаторов на основе эфира для снижения риска загрязнения окружающей среды и альтернативы SF6 для заполнения КРУЭ. Такой модульный подход обеспечивает быстрое развёртывание с использованием вставных модулей и системы SCADA IEC 61850 с интерфейсом через оптическое волокно.

Украинская компания «**Анигер**» разработала<sup>120,121,122</sup> мобильное приложение для мониторинга состояния элегазовых выключателей, используемое в энергосистеме. Данное решение предназначено для сбора данных о производительности при работе элегазовых выключателей, оно широко распространено и позволяет избежать необходимости использования специального программного обеспечения для считывания данных с приборов.

Голландская компания **Stedin Group** разработала экологически чистую цифровую подстанцию 50 кВ с КРУЭ и получила на ней первый пользовательский опыт. Для новых КРУЭ был применён инновационный альтернативный изолирующий газ с низким ППП (g3). К системе автоматизации цифровой подстанции на основе стандартов IEC 61850 и IEC 61869–9–2 были подключены измерительные трансформаторы малой мощности (ИТММ). Этот пилотный проект служит в целях демонстрации и опробования новых технологий и накопления опыта эксплуатации.

**RTE** — французский системный оператор — придерживается подхода к экологическому дизайну, включая поиск способов уменьшения цифрового следа.

С 2015 года RTE пыталась количественно оценить влияние цифровизации сетей, составляя отчёт о «социально-экономической ценности интеллектуальных электрических сетей». В 2017 году данное исследование было завершено с экологической оценкой только выбросов углерода.

Сложность оценки внутреннего (положительного и отрицательного) воздействия цифровых технологий на окружающую среду связаны в том числе с очень

большим количеством элементов, подлежащих оценке, и ограниченным объёмом доступных данных.

Инновации, обеспечиваемые информационными технологиями и коммуникациями: предлагается использовать «интеллектуальные сети» для решения этих проблем. Их внедрение является потенциальным рычагом для экономической оптимизации всей электрической системы, снижения её воздействия на окружающую среду при сохранении конкурентоспособности промышленного сектора.

Компания **50Hertz Transmission GmbH** ведёт видеомониторинг для изучения поведения птиц на маркированной воздушной линии электропередачи и определения риска столкновений. Системы мониторинга с использованием видеокамер являются одним из возможных подходов для изучения поведенческих реакций птиц на линии электропередачи и обнаружения случаев столкновения. Наблюдаемое количество пересечений линии оказалось неожиданно высоким (более 4000), и было зарегистрировано пять столкновений, в основном крупных птиц<sup>123,124,125</sup>.

В энергосистеме **Бразилии** разработан и используется робот для установки птицевозащитного устройства на участках ЛЭП, признанных потенциально опасными для птиц. Преимущества использования этого робота — сокращение времени установки, повышение безопасности персонала, отсутствие необходимости отключения линии и снижения эксплуатационной надёжности.

По итогам обзора подготовлен большой перечень дискуссионных вопросов для совместной их проработки рабочими структурами ЭЭС СНГ, что не только даст существенную практическую пользу при цифровой трансформации энергосистем государств — участников СНГ, но и внесёт вклад в развитие отраслевого международного научно-технического обмена.

#### ИСТОЧНИКИ

1. *Relatório Técnico RT-ONS-2014-001-14001-AUT-003 revisão 1. Plano de Implantação ECM. Radix July 2014.*
2. *Relatório Técnico RT-ONS-2014-001-14001-AUT-002 revisão 2. Prospecção Final. Radix July 2014.*
3. *Baldam Roquemar “Gerenciamento de Conte do Empresarial. Elsevier 2016.*
4. *The role of semantic models in smarter industrial operations. IBM Tim Hanis and Dave Noller, March 30, 2012.*
5. *The Semantic Web. Tim Baners Lee, 2011.*
6. *FARIAS, R.A.N.; ORLANDI, A.G.; MAZETO, B.D.; COSTA, M.V.C.V. Sensoriamento Remoto Aplicado à Fiscalização de Usinas de Geração de Energia Elétrica em Implantação por Meio de Imagens Óticas de Média e Alta Resolução Espacial. Proceedings of XIX Brazilian Symposium on Remote Sensing, Brazil, Vol 17, 2019–96126.*
7. *MELCHIORI, A.E.; SETZER, A.W.; MORELLI, F.; LIBONATI, R.; Candide, P.A.; JESÚS, S.C. A LandsatTM / OLI algorithm for burned areas in the Brazilian Cerrado: preliminary results. In: 8. Advances in Forest Fire Research. VII International Conference on Forest Fire Research, University of Coimbra, Portugal, November 2014, pages 1302–1311.*
8. *LIBONATI, R.; DACAMARA, C.; SETZER, A.; MORELLI, F.; MELCHIORI, A. An Algorithm for Burned Area Detection in the Brazilian Cerrado Using 4 µm MODIS Imagery. REMOTE SENSING, v. 7, 2015, pages 15782–15803.*
9. *Study Guidelines and Criteria Electrical-Sub-Module 23.2 of the Network Procedures, referring to the criteria for preparing DAR. Item 6.1, August 2018, pages 15–16.*
10. *SILVA, A.A.L. The Use of Geoprocessing in Mapping and Identification of Areas of Forest Fire Risk, with emphasis in the region of Itacolom State Park, Ouro Preto / MG. University of Minas Gerais, Brazil, VII Specialization Course in Geoprocessing, 2004.*
11. *I. Ivanković, D. Peharda, D. Novosel, K. Žubrinić-Kostović, A. Kekelj. Smart grid substation equipment maintenance management functionality based on control center SCADA data, CIGRE Session 47, Paris, France, 2018.*
12. *N. Baranović, P. Andersson, I. Ivanković, K. Žubrinić-Kostović, D. Peharda, J.E. Larsson. Experiences from Intelligent Alarm Processing and Decision Support Tools in Smart Grid Transmission Control Centers, CIGRE Session 46, Paris, France, 2016.*
13. *Andersson, P. and J.E. Larsson. GoalArt System Proven during Outage, 13th International Workshop on Electric Power Control Centers, EPCC 13, Bled, Slovenia, 2015.*
14. *Larsson, J.E. and J. DeBor. Real-Time Root Cause Analysis for Complex Technical Systems, Proceedings of the Joint 8th Annual IEEE Conference on Human Factors and Power Plants and 13th Annual Workshop on Human Performance / Root Cause / Trending / Operating Experience / Self-Assessment, Monterey, California, 2007.*
15. *National Grid ESO. Zero Carbon Operation of Great Britain’s Electricity System by 2025, 2019.*
16. *Q. Hong et al. Fast frequency response for effective frequency control in power systems with low inertia, in The Journal of Engineering, vol. 2019, no. 16, pp. 1696–1702, 3. 2019.*
17. *P. Babahajiani, Q. Shafiee, and H. Bevrani. Intelligent Demand Response Contribution in Frequency Control of Multi-Area Power Systems. IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 9, no. 2, pp. 1282–1291, 2018.*

18. Q. Hong et al. *Design and Validation of a Wide Area Monitoring and Control System for Fast Frequency Response*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 1–1, 2020.
19. Q. Hong, I. Abdulhadi, D. Tzelepis, et al. *Realization of High Fidelity Power-Hardware-in-the-Loop Capability Using a MW-Scale Motor-Generator Set*. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, pp. 1–1, 2019.
20. A. Janssen, A. Kubis, S. McGuinness et al. *Requirements for models to study and prevent system separation and collapse*. *CIGRE Session 2018, Paris, 2018*.
21. *CIGRE JWG A3/B5/C4.37: System Conditions for and Probability of Out-of-Phase — Background, Recommendations, Development of Instable Power Systems*. *CIGRE Technical Brochure, 2018*.
22. M. Pavella, D. Ernst, D. Ruiz-Vega. *Transient Stability of Power Systems — A Unified Approach to Assessment and Control*. Springer US, 2000.
23. S. Schlegel, A. Kubis, J. Hachenberger et al. *Curative actions in the power system operation to 2030*. *ETG Congress, Esslingen, 2019*.
24. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/tee.23644>
25. V.A. DYACHKOV, Ye. I. SATSUK, I.S. OKSHIN, A.A. LISITSYN. *Stability Margin Monitoring Systems: Instrument for Grid Transmission Capacity Increase*. *CIGRE Session 47, Paris, France, 2020*.
26. *Requirements for ensuring reliability of power systems, reliability and safety of generating facilities and demand facilities as stipulated in the “Methodological Guidelines on Power System Stability” (approved by Ministry of Energy of the Russian Federation order No. 630 dated 3 August 2018)*.
27. *SO UPS standard STO 59012820.27.010.001–2013 “Rules for determining maximum limits and emergency limits of active power flows across controlled sections of the SO PS dispatch center” (approved by SO UPS order No. 10 dated 18 January 2013)*.
28. M. Li. *Characteristic Analysis and Operational Control of Large-Scale Hybrid UHV AC/DC Power Grids*. *Power System Technology*, Vol.40, April 2016, pages 985–991.
29. *Working Group C4.601 CIGRE. Review of On-Line Dynamic Security Assessment Tools and Techniques*. *Electra number 325, June 2007, Chapter 3, pages 1–17*.
30. Y. Xin, Z. Zhang, H. Tao, etc. *Study of On-Line Security Evaluation and Application in National Grid of China*. *CIGRE Session, Paris, France, 2006, C2–202, pages 1–8*.
31. Y. Xin, J. Shi, J. Zhou, etc. *Technology Development Trends of Grid Dispatching and Control Systems*. *Automation of Electric Power Systems*, Vol.39, January 2015, pages 1–8.
32. J. Yan, C. Feng, G. Lu, etc. *On-line Trend Analysis Technology of Large Power Grid Considering Operation Mode Arrangement*. *Automation of Electric Power Systems*, Vol.39, January 2015, pages 111–116.
33. G.A. TAYLOR, E. LAMBERT, M. USLAR, F. MARTEN. *Developing Enhanced Information and Data Exchange to Enable Scalable TSO-DSO Interoperability*. *CIGRE Session 47, Paris, France, 2020*.
34. *TDX-ASSIST, Coordination of Transmission and Distribution data eXchanges for renewables integration in the European marketplace through Advanced, Scalable and Secure ICT Systems and Tools, H2020 research and innovation programme, www.tdx-assist.eu (last accessed 10/1/20)*.
35. *IEC 62559–2:2015: Use case methodology — Part 2: Definition of the templates for use cases, actor list and requirements list, 2015*.
36. *UML modelling tools for Business, Software, and System: <https://sparxsystems.com/>*
37. Y. SAKAMOTO, H. HATTORI. Y. IWATA. *Improvement of operability and maintainability using new information and telecommunication technologies*. *CIGRE Session 47, Paris, France, 2020*.
38. Debasis Bandyopadhyay and Jaydip Sen. *Internet of Things: Applications and Challenges in Technology and Standardization*. *Wireless Personal Communications* 58, 49–69, 2011.
39. *Internet of Distributed Energy Architecture*. Moscow: Infrastructure Center EnergyNet, 2018, <https://idea-go.tech/IDEA-whitepaper-en.pdf>.
40. S.P. Kovalyov. *Stakeholders of the digital decentralized decarbonized energy infrastructure*. *Energy Safety and Energy Economy*, 2019, No. 2, pages 49–55.
41. S.K. Andryushkevich, S.P. Kovalyov, E. Nefedov. *Composition and application of power system digital twins based on ontological modelling*. *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Industrial Informatics INDIN’19, 2019, pages 1536–1542*.
42. S. LAI, C. CHEN, Wei-Jun WU and Zi-Xiang XEI. *Adopting IIoT Technology to Realize Controllability of Existing Small-scale Distributed Energy Resources*. *A CIGRE Session 47, Paris, France, 2020*.
43. A.I. Khalyasmaa, M.D. Senyuk, S.A. Eroshenko. *H\_i\_g\_h\_– Voltage Circuit Breakers Technical State Patterns Recognition Based on Machine Learning Methods*. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019. 34(4),8731723, p. 1747–1756.
44. A.I. Khalyasmaa, S.A. Eroshenko. *Data Analytics Platform for Power Equipment Intelligent Lifecycle Management*. *CIGRE 2018 Session, Paris*.
45. A.I. Khalyasmaa, S.A. Dmitriev, S.E. Kokin. *An Automated System for Taking Decisions to Assess the Actual State of Electrical Equipment*. *Power Technology and Engineering*. 2016. 49(5), p. 389–392.

46. H. Wang, J. Li, Y. Zhou, M. Fu and S. Yang. *Research on the Technology of Indoor and Outdoor Integration Robot Inspection in Substation*. 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China, 2019, pp. 2366–2369.
47. L. Shengfang and H. Xingzhe. *Research on the AGV Based Robot System Used in Substation Inspection*. 2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing, 2006, pp. 1–4.
48. X.Z. Xie et al. *Obstacle Detection for Patrol Robot Using Bumblebee2 Stereo Vision System*. *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 48–49, pp. 749–752, 2011.
49. S. Nie, Z. Jiang, H. Zhang, B. Cai and Y. Yao. *Inshore Ship Detection Based on Mask RCNN*. *IGARSS 2018–2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia, 2018, pp. 693–696.
50. J.Y. Park, S.T. Kim, J.K. Lee, J.W. Ham, and K.Y. Oh. *Automatic Inspection Drone with Deep Learning-based Auto-tracking Camera Gimbal to Detect Defects in Power Lines*. 2019, ICVIS2019.
51. S.T. Kim, J.Y. Park, J.K. Lee, I.H. Choi, and J.W. Ham. 2017, *Development of GPS coordinates measuring algorithm for a transmission tower*, *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*, 3(2), 99–105.
52. S.T. Kim, J.W. Ham, J.Y. Park, and J.K. Lee. 2018, *Apparatus and method for generating a flight path of a drone*, Korea Patent Pending No. 10–2018–0087794.
53. [https://www.researchgate.net/publication/352472709\\_Advanced\\_modeling\\_and\\_mapping\\_of\\_severe\\_pollution\\_stress\\_required\\_for\\_outdoor\\_insulation\\_coordination](https://www.researchgate.net/publication/352472709_Advanced_modeling_and_mapping_of_severe_pollution_stress_required_for_outdoor_insulation_coordination)
54. Guerrero, J., Chapman, A.C., & Verbic, G. 2018. *Peer-to-Peer Energy Trading: A Case Study Considering Network Constraints*. In *Proceedings of the Asia-Pacific Solar Research Conference*, Sydney, Australia, pages 4–6.
55. Tushar, W., Saha, T.K., Yuen, C., Morstyn, T., Poor, H.V., & Bean, R. 2019. *Grid influenced peer-to-peer energy trading*. *IEEE Transactions on Smart Grid*.
56. Krungsri Research. 2019. *Thailand Industry Outlook 2019–21*, pages 1–12.
57. Anjum, A., Sporny, M., & Sill, A. 2017. *Blockchain standards for compliance and trust*. *IEEE Cloud Computing*, pages 84–90.
58. <https://powerledger.io/media/Power-Ledger-Whitepaper-v3.pdf>
59. <https://www.isda.org/a/6EKDE/smart-contracts-and-distributed-ledger-a-legal-perspective.pdf>
60. *Energy Banking agreement executed between northern states of India*.
61. <https://etherecash.io/whitepaper/WhitePaperV2.0.pdf>
62. <https://e-cigre.org/publication/gb-12-power-system-assets-investment-management-methods-and-practices>
63. R. TEIXEIRA; J. CARVALHO; E. MIRANDA; W. FRANÇA. *Health Index and Hierarchizing Scale Methodologies for Prioritizing On-line Monitoring of Power Transformers and Reactors in the Brazilian Transmission Grid*.
64. [http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/mapas\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx)
65. *Action Plan — Monitoring Equipment Companies of Eletrobras*.
66. L.F. QUEIROZ, J.M. ARAÚJO, L.C.F. SANTOS, A.B. POSSIDONIO. *Improving transformer reliability through operation, maintenance, repair and asset management for extended life*. CIGRE 2021 Session, Paris.
67. *Condition assessment of power transformers*. CIGRE technical brochure 761, 2019.
68. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107046A8033&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
69. R.K. CHAUHAN, B.N. De BHOWMICK, V.K. BHASKAR, S.B.R. RAO, D.R. SHAH, SHALINI, P. SEERVI. *Development and Implementation of Intelligent Condition Monitoring System for Transformers and Reactors*. CIGRE 2021 Session, Paris.
70. Доклад PS2\_4, CIGRE A2 colloquium 2017 (C. Schneider, J. Staninowski, L. Cheim, J. Vines, S. Varadan).
71. Ф. Скатидажио, А. Фрайоли, В. Юлиани, М. Помпили. *Индекс работоспособности: практический подход TERNА к управлению парком трансформаторов*. СИГРЭ, Париж, 2014 г.
72. J. TOTH, A.B. JONASSON, and D. S. HAUSER. *Artificial Intelligence (AI) Augmented Transmission Line Inspection*. CIGRE 2021 Session, Paris.
73. TAG7, CIGRE B2.52. TB731 *Use of robotics in assessment and maintenance of OHL*. June 2018.
74. S. Ichihara, T. Kobayashi, M. Yoshida. *Improvement in Substation Design and Construction through Application of 3D Modelling*. CIGRE 2018 Session paper B3–214, August 2018.
75. M. NAKAHATA, S. NOGUCHI, S. IWASAKI, H. SUGIYAMA, M. FURUYA, K. ITO. *Digitalization solutions for substation planning, design, construction, operation and maintenance*. CIGRE 2021 Session, Paris.
76. GS-6110–0269, *Substation total diagnostic system*. KEPCO, 2018.
77. GS-6110–0274, *Transformer partial discharge diagnostic system*. KEPCO, 2018.
78. GS-6625–0073, *Transformer dissolved gas analysis monitoring device*. KEPCO, 2018.
79. *Edge Gateway S/W development status*, INTEGRICT Connector. Hyundai Electric, 2018.
80. SAW Surface acoustic wave sensor. 2019. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Surface\\_acoustic\\_wave\\_sensor](https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_acoustic_wave_sensor). [Accessed 18 12 2019].



81. T. PEGOURET, E. STELLA. *Digital Disconnecter and smart sensors: example of integration in the condition base asset management cloud tool*. CIGRE 2021 Session, Paris.
82. P. MOHAPATRA, J. KINCAID MACKENZIE, C. POPESCU-CIRSTUCESCU, A. SHUKLA, P. NEWMAN, P. BALASUBRAMANI, M. WEHINGER, A. ABDULLA. *FITNESS: Live comparison of reliability and availability of different communication and redundancy architectures for digital substations*. CIGRE 2021 Session, Paris.
83. S. Christou et al. *Setup and preliminary results of an online thermal condition monitoring system for MV cable joints*. 2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Lemosos, 2016, pp. 1–4.
84. S. Christou<sup>1</sup>, A. Stavrou<sup>2</sup> and P.L. Lewin. *Online prognostic system for cable joints for Industry 4.0*. CIGRE 2020 Session, Paris.
85. I. JOVANOVIC. *Use of Augmented Reality (AR) for Asset Management of HV Devices and Training of Field Personnel*. CIGRE 2020 Session, Paris.
86. CIGRE TB 398 and Electra 29 — *Third-Party damage to underground and Submarine cables — 2009*.
87. J. SMIT. *Challenges for the repair strategy of 380kV cable systems*. B1–102\_2018 — CIGRE Paris Session Paper.
88. CIGRE TB.773 and Electra 63 — *Fault Location on Land and Submarine Links (AC & DC) — 2019*.
89. J. CAIRNS. *Enhanced Cable Security through Fibre Optic Monitoring*. CIGRE 2020 Session, Paris.
90. B.W. Kang. *A Study on the Improvement of Line Fault Detection and Selection of Location for Fault Current Limiters in MTDC Systems*. Soongsil University, 2017.
91. Young-sung Lim. *Domestic HVDC Status and Future System BTB HVDC Application*. Montly Electrical Journal, pp.44–48, 2016.06.
92. Jang, Hyeon, et al. *Risk Evaluation Based on the Hierarchical Time Delay Model in FMEA*. Journal of the Korean Society for Quality Management 44(2), pp.373–388, 2016.
93. Y.M. KIM\*, H.S. CHAI, J.R. JUNG, J.W. SHIN, T.Y. NAM, J.C. KIM. *The Method of Components Critical Priority Assessment for HVDC Station Asset Management System*. CIGRE 2020 Session, Paris.
94. Modelli C., Karl H, Medrado G., Björklund H., Jansson E., Elgqvist U. *Life cycle service for HVDC systems*, B4–119, Paris, France, 2018.
95. Rauhala T., Vangso Jeberg P., Thunberg E., Ingemanson D., Skogheim O., Yohannes Asefa H. *Assessment of Nordic HDC operation and maintenance practices on reliability and availability of HVDC systems*. CIGRE B4–105, 2018.
96. Jansson E, Elgqvist U. *Lifecycle Management for HVDC Systems*. CIGRE-260, Montreal, Canada, 2019.
97. R. MACNEILL, R. NICKLER T, A. FEYH et al. *HVDC Lifecycle management — a reliability & Availability perspective*. CIGRE 2020 Session, Paris.
98. F. Ainhirn et al. *Extended Approach for Calculating Thermal Stress and Ampacity of High Voltage Cable Systems Based on Experimental Data*. Report C6–3, Jicable 2019–10th International Conference on Insulated Power Cables, Versailles, July 2019.
99. F. Ainhirn et al. *A Cyclic Simulation Approach for Transient Thermal Rating Calculations of Underground Power Cables*. CIGRE SEERC 2020, Vienna, June 2020.
100. F. Ainhirn et al. *Extended Thermal Rating Calculations of 400 kV XLPE Cables for Urban Grid Applications based on long-term Experimental Data*. CIGRE 2020 Session, Paris.
101. Ulkat, D. and Gunay, M.E. 2018. *Prediction of mean monthly wind speed and optimization of wind power by artificial neural networks using geographical and atmospheric variables: case of Aegean Region of Turkey*. Neural Computing and Applications, 30, 3037–3048.
102. Gulgec, N.S., Martin Takac, M. and Pakzad, S.N. 2019. *Convolutional Neural Network Approach for Robust Structural Damage Detection and Localization*. Journal of Computing in Civil Engineering (ASCE), 33(3).
103. O.B. YUCEL, A. ALDEMIR. *Implementation of Artificial Neural Networks in Design of Steel Cap Plates of Substation Support Structures*. CIGRE 2020 Session, Paris.
104. Mehdi Zeyeni. *Power system protection and control testing in a fully virtualized environment*. Matpost, Lyon, France, 20–21 November 2019.
105. Asha K., Kariyappa B.S., Vishal Kulakarni. *Digital Twin Ranorex Test Automation of SIPROTEC 5 Protection Devices*. 2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, India, 12–14 June 2019.
106. C. Harispuru, S. Rösler. *Virtual testing with a Digital Twin of protection devices in the Cloud*.
107. J. ROMAN, C. HARISPURU, D. LOPEZ, J. FIGUERA, C. RODRIGUEZ. *Benefits derived from the use of Digital Twins of Protection and Control Systems*. CIGRE 2020 Session, Paris.
108. Y. Li, X. Cheng, Y. Cao, D. Wang and L. Yang. *Smart Choice for the Smart Grid: Narrowband Internet of Things (NB-IoT)*. IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 3, pp. 1505–1515, June 2018.
109. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), “*Technical Specification Group Services and System Aspects: Study on Communication for Automation in Vertical Domains*”, (Release 16, 2018).
110. Y. Cao, G. Zhang, J. Yang, W. Tao, D. Hong, A. Xu. *5G wireless communications for smart grid: a PACS case with network slice*. CIGRE 2020 Session, Paris.

111. H. Yoshida, K. YokoI, K. Shimomura, K. Kusaba, Y. Kowada, H. Oshida. *Impact of Large-Scale Installation of Renewable Energies on Power System*. AORC 1044, 2014.
112. M. Yamazaki, S. Suganuma, T. Kawakami, H. Iwaki, K. Hyodo, T. Sasaki. *Application of Stabilisation System for Electric Power Network Emergency*. CIGRE B5-121, 2018.
113. M. Toshima, M. Kuwabara, Y. Ueda, Y. Fukuya. *Time Synchronization Methods for Protection And Control Systems*. CIGRE B5-212, 2019.
114. M. Kuwabara, H. Oshida. *Development of Advanced Communication Unit for Ring Topology Network and Application to Special Protection Scheme*. CIGRE 2020 Session, Paris.
115. Y. Johraku et al. *Development of remedial action scheme with using IEC 61850 GOOSE*. *The Papers of Technical Meeting on "Power Protective Relaying"*, IEE Japan, PPR-17-011, 2017.
116. K. Nishizawa, Y. Ueda, Y. Fukuya. *Implementation of Overload Protection Relay System based on IEC 61850 for Simplification of communication network*. CIGRE 2020 Session, Paris.
117. Chen Liang and et all. *Battery Energy Storage Selection Based on a Novel Intermittent Wind Speed Model for Improving Power System Dynamic Reliability*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, pp. 6084-6094, 2017.
118. Heejin Kim and et all. *Smart and Green Substation: Shaping the Electric Power Grid of Korea*. *IEEE Power and Energy Magazine*, pp. 24-34, 2019.
119. I. LIM, T. Han, H.-S. and et all. *Operation Scheme of Modular Green Substation with BESS for Transmission and Distribution System*. CIGRE 2020 Session, Paris.
120. Y. Kieffel and F. Biquez. *SF 6 alternative development for high voltage switchgears*, in *Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2015 IEEE, 2015, pp. 379-383.
121. J. Mantilla, M. Claessens, M. Kriegel. *Environmentally friendly perfluoroketones-based mixture as switching medium in high voltage circuit breakers*. CIGRE 2016, Paper A3-113.
122. B. Stognii, D. Voitov, A. Panov, A. Tiutyk, A. Kostiuk. *SF6 circuit breakers' monitoring system — development and implementation in Ukrainian power industry*. CIGRE 2020 Session, Paris.
123. Ballasus, H. & Sossinka, R. (1997). *Auswirkungen von Hochspannungstrassen auf die Flächennutzung überwinternder Bläss- und Saatgänse Anser albifrons, A. fabalis*. *Journal Für Ornithologie*, Vol. 138, 215-228.
124. Martin, G.R. & Shaw, J.M. (2010). *Bird collisions with power lines: failing to see the way ahead?* *Biological Conservation*, Vol. 143, 2695-2702.
125. N. Kucher et all. *Video monitoring to study the behaviour of birds on a marked overhead line and to determine the risk of collision*. CIGRE 2020 Session, Paris.



**cactus**  
TRADE

Скидка 10% по промокоду:  
**CACTUS10**

Расходные материалы для печати  
Офисные принадлежности  
Экраны для проекторов  
Чистящие средства  
Офисная техника

+7 (495) 256-00-07  
www.cactus-trade.ru