



## **ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМИТЕТ С4 «ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ»**

**РЯБЧЕНКО В.Н.**, доктор техн. наук,  
АО «Научно-технический центр ФСК ЕЭС», г. Москва

В сферу деятельности Исследовательского комитета (ИК) С4 входят различные вопросы, имеющие отношение к техническим характеристикам систем, включая самый широкий спектр явлений и периодов времени. Для более точного распределения деятельности ИК были обозначены следующие основные темы:

- Качество электроэнергии.
- Электромагнитная совместимость и электромагнитные помехи (ЭМС/ЭМП).
- Координация изоляции.
- Грозовой разряд и его влияние на оборудование энергосистем.
- Динамический и численный анализ энергетических систем.

По всем направлениям деятельности предусматривается исследование и разработка новых инструментов, моделей, методов и техник для оценки и анализа соответствующих аспектов. Предметом особого интереса ИК С4 являются динамические характеристики оборудования, рассматриваемого отдельно и как часть (подсистема) энергетической системы, включая аспекты, возникающие в результате возмущений различного типа и внешних воздействий.

Для юбилейной сессии ИК С4 был отобран 61 доклад, соответствующий трем Предпочтительным темам (ПТ) для сессии СИГРЭ 2021 г. В дополнение к выбранным докладам ИК С4 предлагал пять презентаций от авторитетных исследователей для обсуждения вопросов, имеющих отношение к предпочтительным темам, а именно:

- ПТ 1: Повышение технических характеристик энергосистемы за счет применения передовых методов, моделей и инструментов.
- ПТ 2: Моделирование энергосистемы будущего на основе выводов, сделанных по итогам системных событий.
- ПТ 3: Методы, модели и приемы оценки грозových разрядов, качества электроэнергии и координации изоляции для улучшения характеристик развивающейся сети.

Далее с разбивкой по ПТ и рубрикам кратко представлен каждый из докладов, включая соответствующие вопросы для обсуждения, предложенные соответствующим специальным репортером. Для полноты картины в конце отчета приведена краткая аннотация каждого доклада.

### **Предпочтительная тема ПТ 1**

ПТ1 («Повышение технических характеристик энергосистемы за счет применения передовых методов, моделей и инструментов») включает в себя следующие вопросы:

- Оценка устойчивости по частоте, напряжению, статической и динамической устойчивости энергосистемы, а также качества электроэнергии с помощью аналитики больших данных.
- Анализ распространенных динамических возмущений, включая [преднамеренные] электромагнитные помехи, погодные условия и геомагнитные индуцированные токи.
- Разработка новых показателей и инструментов для оценки надежности, устойчивости и гибкости энергосистемы.

ИК С4 было принято 28 докладов из пятнадцати стран. К этому следует добавить два доклада приглашенных специалистов. В указанных докладах были представлены исследованные вопросы и результаты, распределенные по трем подгруппам, обозначенные следующим образом:

1. Оценка устойчивости по частоте, напряжению, статической и динамической устойчивости энергосистемы с помощью аналитики больших данных.
  - Применение больших данных для совершенствования моделей - доклады 101, 102, 103.
  - Использование больших данных для оценки рисков - доклад 104.
  - Использование больших данных для оценки стабильности частоты или устойчивости системы - доклады 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111.

В этих докладах были рассмотрены некоторые преимущества, полученные в результате анализа данных из различных источников (метеорологических сводок, данных SCADA, УСВИ) с целью улучшения точности при моделировании электромеханических и электромагнитных процессов, потерь, коронных разрядов, токов КЗ, нагрузок и т.д.

2. Анализ распространенных динамических возмущений, включая [преднамеренные] электромагнитные помехи, погодные условия и геомагнитные индуцированные токи (ГИТ).
  - Улучшение электромагнитных характеристик с помощью передовых математических и компьютерных методов - доклад 112.
  - Глобальная динамическая защита. Геомагнитные индуцированные токи (ГИТ) - доклады 113, 114, 115.
  - Глобальная динамическая защита. Погодные условия - доклады 122 и 123.

В докладах оказано, что оценка устойчивости по напряжению может быть усовершенствована за счет использования более точных моделей трансформаторов. Для оценки геомагнитных возмущений требуются точные модели проводимости земли. Рассматривается возможность применения стандарта NERC TPL-007 за пределами Северной Америки. Показано, что собственники трансформаторного оборудования, возможно, пожелают определить собственный уровень допустимого нагрева.

3. Разработка новых показателей и инструментов для оценки надежности, устойчивости и гибкости энергосистемы.
  - Принципиально новые показатели надежности - доклады 116, 117, 118, 119, 120.
  - Принципиально новые показатели технической устойчивости - доклад 121.
  - Принципиально новые инструменты для количественной оценки надежности - доклады 124, 125, 127, 128, 129.

Если понятия устойчивости хорошо известно отечественным специалистам, то гибкость – относительно новое понятие, применяемое в основном в зарубежных источниках. Напомним, что под гибкостью энергосистемы понимается ее свойство сохранять нормальное состояние (режим) при воздействии внутренних (внезапные изменения и флуктуации генерирующих источников, нагрузок, потоков по линиям) и внешних (внезапные внешние возмущения различного происхождения) случайных (неопределенных) факторов.

Для обеспечения надежности в режиме реального времени в энергосистемы с высоким уровнем силовых преобразователей (инверторных ресурсов – ИР) внедряется мониторинг инерционности энергосистемы и уровней токов КЗ. Для поддержания минимальных величин инерции (малых постоянных инерции) используется управление потокораспределением мощности и включение в линии электропередачи синхронных конденсаторов. Также практикуется быстрое реагирование на изменение частоты в преобразовательных ресурсах. Мониторинг инерции является более точным способом, нежели оценка инерции на основе суммирования активной мощности каждого генератора, поскольку последняя может занижать фактические значения инерции, например, при наличии большого объема источников распределенной генерации и двигательной нагрузки.

Техническая устойчивость – еще одна актуальная тема, для проработки которой необходима четкая

система оценочных показателей. Рассматриваются вопросы технической устойчивости оборудования (в т.ч. инверторных ресурсов) и энергосистемы в целом. Ведется мониторинг и прогнозирование погодных условий для повышения устойчивости электрической сети к возможным отключениям.

Одним из методов, предлагаемых для контроля характеристик силового оборудования и совершенствования моделей технологических процессов, является использование специальных аппаратных средств в контурах управления.

В качестве вариантов применяемых решений с целью ослабления остроты проблем, связанных со снижением уровня инерции, является использование синхронных конденсаторов с маховиками или без оных, а также внедрение силовых преобразователей с возможностью быстрого реагирования на флуктуации частоты тока. При этом маховики могут увеличивать инерцию синхронной машины от трех до 5 раз, конечно, при тщательном анализе возможностей возникновения в энергосистеме подсинхронного резонанса.

#### **Аннотации докладов ПТ1:**

**Доклад 101: Усовершенствованное моделирование сложных сетей для снижения потерь.** М. ДЖОНС (Великобритания), В. МАНТЛ (Великобритания), М. БЕББИНГТОН (Великобритания), Ш. ХИГГИНС (Великобритания), Р. БРАЙАНС (Великобритания)

Предлагается метод улучшения моделирования потерь на распределительных ячейках с помощью анализа данных SCADA. Показано, что встроенная генерация скорее увеличивает потери, чем снижает их, поскольку ветер обычно дует, когда нагрузка низкая. Проанализированы радиальные и ячеистые сети в Уэльсе и Шотландии.

**Доклад 102: Мониторинг уровней КЗ в распределительных сетях.** Б. БЕРРИ (Великобритания), Д. ГЕОРГЕ (Великобритания)

Фактический ток КЗ отслеживается в распределительной сети 11 кВ, затем ищется корреляция с током в радиальной сети для корректировки моделей КЗ. Консервативные методы приводят к большому диапазону между минимальным и максимальным уровнями короткого замыкания, что может ограничить объемы внедрения распределенной генерации. С помощью ограниченного количества активных устройств измерения уровня КЗ, установленных в сетях более низких ступеней напряжений, и данных, регистрируемых с помощью существующих измерителей релейной защиты, производится оценка уровней КЗ для всей электрической сети энергосистемы.

**Доклад 103: Снижение потерь электроэнергии на коронирование проводов воздушной линии 500 кВ Омской энергосистемы на основе обработки сигналов РМУ.** В. РЯБЧЕНКО (Россия)

В докладе обсуждается измерение потерь на корону в воздушных линиях 500 кВ энергосистемы в Западной Сибири и способы их сокращения. Данные с устройств синхронизированных векторных измерителей (УСВИ) и метеорологические сводки обрабатываются для расчета потерь на корону в режиме реального времени. Уровни напряжения в сети оптимизируются и автоматически регулируются для снижения потерь на корону. Показано, что при использовании этого метода общие потери на корону снижаются на величину 15-40%.

**Доклад 104: Оперативная оценка рисков перекрытий линий передачи в энергосистеме на основе многовариантного анализа грозовых и метеорологических данных.** Х. НОРЕНЬЯ (Колумбия)

Используются метеорологические данные для прогнозирования вероятности возникновения КЗ и принятия оперативных мер. Обсуждаются ограничения аналитики больших данных. Для прогнозирования перекрытий на воздушной линии используются трехпараметрическая система уравнений.

**Доклад 105: Проверка моделей первичного регулирования частоты на основе полевых испытаний производственных блоков.** Э. АГНЕХОЛЬМ (Швеция)

Данная работа посвящена проверке динамических моделей генераторов с упором на первичное частотное регулирование. В докладе предлагается симулятор аппаратуры в контуре управления для проверки возможности частотного регулирования.

**Доклад 106: Метод измерения инерции для борьбы со снижением адаптируемости системы.** Н. ХОСАКА (Япония), Э. ХВАН (Великобритания), С. МИЯДЗАКИ (Япония), Б. БЕРРИ (Великобритания)

Измерения инерции энергосистемы производятся путем изменения системной нагрузки и измерения результирующего изменения частоты вследствие этого.

**Доклад 107: Анализ, мониторинг и подавление качаний синфазного сигнала в энергосистеме Ирландии и Северной Ирландии.** П. УОЛЛ (Ирландия)

Измеряются колебания частоты синфазного режима в диапазоне 0,03-0,08 Гц, а далее и соотносятся (ищется корреляция) с максимально возможной мощностью вводимой в систему несинхронной генерации.

**Доклад 108: Замена синхронных генераторов синхронными конденсаторами для обеспечения устойчивости в крупномасштабной энергосистеме. Опыт Южной Австралии.** Б. БАДРЗАДЕ (Австралия)

Представлены австралийские исследования по определению решений для диспетчеризации КЗ в целях поддержания требуемой инерционности в сценариях развития с высоким уровнем инверторного оборудования. В Австралии инверторные ресурсы в настоящее время составляют 150% от спроса.

**Доклад 109: Определение угла наклона статической частотной характеристики нагрузки энергосистемы по данным синхронизированных векторных измерений.** П. КОВАЛЕНКО (Россия)

Рассматривается метод определения наклона статической частотной характеристики нагрузки на основе измерений частоты и напряжения с помощью УСВИ, а также измерений полной нагрузки с помощью SCADA.

**Доклад 110: Анализ частоты в румынской энергосистеме при крупных нарушениях в работе сети.** Л. ТОМА (Румыния)

Румынская энергосистема анализируется на основе измерений с помощью данных УСВИ. Были изучены колебания частоты. Упомянуто моделирование системы накопления энергии на аккумуляторных батареях, обеспечивающую синтетическую инерцию энергосистемы.

**Доклад 111: Моделирование аварийной автоматики грузинской энергосистемы.** Дж. АРЗИАНИ (Грузия)

Проанализирована энергосистема Грузии. Смоделирована работа противоаварийной автоматики, помогающей поддерживать частоту в заданных пределах после возникновения больших возмущений. В реальном масштабе времени отслеживается инерция энергосистемы и корректируются программы автоматической частотной разгрузки (АЧР).

**Доклад 112: Методы и технические средства определения электромагнитной обстановки и электромагнитной совместимости на энергообъектах.** Р. БОРИСОВ (Россия)

Проведены замеры и расчеты электромагнитной совместимости (ЭМС). Применены разрядники для защиты от перенапряжений в шкафах приводов РУ. Авторы стремятся обеспечить достаточный уровень ЭМС в системах защиты и управления с целью выдерживания грозовых и коммутационных импульсов.

**Доклад 113: Вычисления для обеспечения устойчивости по напряжению и оценки состояния трансформаторов в присутствии геомагнитных индуцированных токов.** К. ГОНТ (ЮАР)

Использован метод конечных элементов для оценки термического воздействия геоиндуцированных токов (ГИТ) на трансформаторное оборудование. В докладе приведен критический разбор современных методов оценки. Высказывается опасение, что нынешний порог в 75 А для начала детальной термической оценки является, возможно, чересчур высоким.

**Доклад 114: Мониторинг и моделирование геомагнитных индуцированных токов на национальном рынке электроэнергии Австралии.** Дж. ХЕССЕ (Австралия)

В докладе описывается оборудование, применяемое в австралийской сети для контроля ГИТ. Отмечается, что 3D-модели земли дают более точные результаты.

**Доклад 115: Геомагнитные возмущения и оценка их воздействий на корейские энергосистемы.** Ч.В. У (Корея), Ч.Х. ЛИ (Корея), К.Ё. СИН (Корея), КИМ (Корея), П.С. ЧУ (Корея), Ч.В. КАН (Корея)

Представлено исследование влияния ГИТ на энергосистему Кореи. В основе применяемо методики лежит стандарт NERC TPL-007.

**Доклад 116: Оценка стабильности переходных состояний ресурсов на базе инвертеров в слабых зонах юго-**

**западного энергообъединения.** Э. ФАРАНТАТОС (США), Дж. ТАННЕР (США), К. КЕЙТИ (США), К. КЕЙТС (США), В. ВАН (США), А. ГАЙКВАД (США), Д. БОУМАН (США), Х. СКРИБНЕР (США), Дж. КАСПАРИ (США), Д. РАМАСУБРАМАНИАН (США)

Для анализа устойчивости в слабых системах часто требуется проводить моделирование электромагнитных переходных процессов (Electromagnetic Transients – ЕМТ) инверторных ресурсов (ИР), однако такое моделирование занимает продолжительное время. Среднеквадратичные модели, используемые сегодня, не способны предсказывать нестабильность контроллеров ИР. Предлагается проводить идентификацию показателей на основании взвешенного ОКЗ, но без указания подробностей, позволяющих определиться с настройками контроллеров. Предлагается ввести в рассмотрение индекс запаса устойчивости переходных состояний на основе критического времени отключения и потери синхронизма ФАПЧ. Увеличение коэффициентов усиления ФАПЧ и регулятора напряжения влияет на стабильность ИР.

**Доклад 117: Полночастотные эквивалентные модели сетей для инверторных систем.** Ф. КАМАРА (Бразилия)

Проведен расчет взаимодействия между множеством преобразователей сети (ИР) с помощью частотно-зависимых эквивалентов сети (FDNE) и детальных моделей преобразователей. Показано, что моделирование сети до 25-й гармоники, включительно, представляется недостаточным. В докладе не дается четких указаний на то, как обеспечить заданную степень пассивности модели.

**Доклад 118: Испытание системы фидеров и сравнительный анализ эффективности размещения фидеров и интеллектуального инвертера.** Э.И. СЕЙБЕР (США), Д. ХАСИМОТО (Япония), К. КАМЭДА (Япония), Т. ХАНДЕЛВАЛ (США)

Анализируется влияние объема внедрения фотовольтаики (фотоэлементов – ФЭ) на распределительные сети. Авторы предлагают метод расчета приемистости ячеек с учетом размера и расположения фотоэлектрических элементов, режима работы, координации защиты, регулирования напряжения, конфигурации ячейки, номиналов оборудования. Простые ограничения приводят к объемам генерации при пиковой нагрузке порядка 15-30%. Этот объем может увеличиться до 50% и вплоть до 200% при использовании интеллектуальных инверторов.

**Доклад 119: Ввод тока короткого замыкания генератора: насколько правильны запросы системных операторов?** Э. МОРТОН (Австралия)

Для объектов генерации на основе инверторов тщательно анализируются требования к инжекции тока КЗ, диктуемые действующими сетевыми нормами. Австралийские правила требуют 4% емкостного тока на каждый 1% падения напряжения (на основе требований к X' синхронных генераторов). Требование для ИР – 2% емкостного тока на каждый 1% снижения напряжения. При этом отношение Q/R приблизительно равно отношению X/R сети.

**Доклад 120: Применение новых технологий и средств для обеспечения надежности, стабильности и гибкости современных электросетей с большим числом ВИЭ в рамках многомерного подхода в контексте индийской магистральной сети.** НИЛЕШ М. ШЕТХ (Индия)

В связи с ожидаемым высоким уровнем использования ВИЭ (40% к 2030 году) вносятся изменения в индийский сетевой кодекс. В новой версии добавлено требование к коэффициенту КЗ (например, при количестве точек общего присоединения более 5). Указан показатель инерции системы равный 128 ГВт·с.

**Доклад 121: Планирование адаптируемости в энергосистемах с высоким уровнем возобновляемой энергии**  
Н. МИЛЛЕР (США)

Основное внимание в докладе уделяется устойчивости существующих и перспективных вариантов внедрения ИР в энергосистему.

**Доклад 122: Менеджмент эксплуатационных рисков системы передачи сверхвысокого напряжения постоянного тока с учетом внешней метеорологической обстановки.** Ц. ВАН (Китай), Й. ВАН (Китай), Ч. ФЭН (Китай), Д. ЛЮ (Китай), В. ЧЖУАН (Китай), С. ЛИ (Китай), С. ВАН (Китай)

Анализируется влияние погодных условий (пожары, грозовая активность, ветровые и гололедные воздействия), вызывающих сбои в китайской системе постоянного тока ультравысокого напряжения, а также их воздействие на электрическую сеть континентального Китая. Показано, что при высоком риске могут быть изменены режимы работы, например, снижено напряжение постоянного тока, снижена нагрузка на линию или увеличен объем «горячего» резерва.

**Доклад 123: Оптимизация безопасности и рисков на базе потоков мощности с учетом стабильности напряжения и перегрузок.** Р. ГАРСИА (Колумбия)

Определяется риск лавины напряжения в Колумбийской энергосистеме в результате отключений передающих линий, вызванных грозовой активностью.

**Доклад 124: Подтверждение и прогнозирование нагрузки в системах с распределенными энергоресурсами.**

М. МАХУР (США), М. ЛИТЕН (США), М. МОНДЕЛЛО (США)

В работе представлен метод прогнозирования нагрузки и предотвращения ее «маскировки» распределенной генерацией, в том числе, солнечными фотоэлектрическими станциями. ComEd планирует прогноз нагрузки 90/10 с отключением крупнейшего генератора.

**Доклад 127: Инструменты анализа энергосистем для подключения объектов генерации на базе ВИЭ.**

Н. ПАХАЛАВАТТА (Австралия)

Обозначены проблемы в отношении эффективности инструментальных средств моделирования электромагнитных переходных процессов и векторных методов. Даны рекомендации по разработке руководящих принципов и процедур для моделирования и тестирования производительности и эффективности ИР.

**Доклад 128: Анализ стабильности подключенных к сети преобразователей напряжения.** С. СЕБАЛЬОС (Испания), А. ХИЛЬ ДЕ МУРО (Испания), С. Д'АРКО (Норвегия), И. АСПИРИ (Испания), Х.К. ПЕРЕС-КАМПЬОН (Испания)

Анализируется на основе второй эталонной системы IEEE типовая модель преобразователя напряжения. Рассматривается ветротурбина типа 4, радиально подключенная через линию электропередачи с последовательной компенсацией. Как анализ малых сигналов, так и аппаратные испытания в контуре показывают возможность развития неустойчивых подсинхронных колебаний. Добавленный в контур управления алгоритм виртуальной проводимости, как показано, приводит к улучшению демпфирования указанных колебаний.

**Доклад 129: Проектирование и применение современных синхронных конденсаторов для содействия энергетическому переходу.** К. ЧАНЬ (Китай)

Синхронные конденсаторы рассматриваются как новый инструмент для обеспечения заданной степени инерции энергосистемы, быстрого реагирования на изменение частоты сети, обеспечения первичной частотной характеристики и реактивной мощности. В докладе освещаются аспекты проектирования (ИК А1) и применения (ИК С4).

### **Приглашенная презентация: Наибольшие риски геомагнитных возмущений. Т. Гонт**

Наибольшие риски, связанные с геомагнитными возмущениями (ГМВ) и ГИТ в энергосистемах, возникают из-за различий между физическими характеристиками реальных систем и имитационными моделями, зачастую основанными на противоречивых предположениях. Когда аналитические методы, модели и инструменты вводят исследователей в заблуждение, существует скрытый риск принятия неверных решений о возможных отказах и смягчении последствий этих отказов.

Устойчивость и надежность обеспечиваются не путем формального выполнения процедур регулирующего органа, а за счет изучения процессов и систем, и, значит, принятия обоснованных решений. Многие исследователи вносят свой вклад в изучение физических процессов ГИТ и соответствующих инженерных приложений.

«Систему ГИТ» можно представить в виде трех или четырех (если включить в процесс человеческий фактор) физических подсистем. Описывается взгляд автора на некоторые недавние события и их последствия.

1) Окружающая среда. ГИТ возникают в результате возмущений геомагнитного поля, вызванных космическим излучением, и формируются частотно-взвешенными фильтрами удельного сопротивления земли и собственно энергосистемы. Новейшие разработки касаются прогнозирования геомагнитных возмущений, измерения геомагнитного поля и статистически обоснованного преобразования измерений В-поля в ГИТ в трансформаторах.

2) Трансформаторы. Сочетание анализа МКЭ и физических измерений улучшает процесс изучения индуктивности трансформатора, несимметрии и генерации гармоник, определяя конструкцию трансформатора и приводя к более репрезентативным моделям эквивалентных

схем для моделирования энергосистемы. При этом необходимо управлять и существующим трансформаторным оборудованием.

3) Энергосистема. Гармоники и несимметрия напряжения увеличивают потери в линии, снижая эффективность систем передачи электроэнергии и увеличивая вероятность нестабильности напряжения. Новые инструменты для такого анализа выглядят многообещающе, а силовая электроника предлагает ряд интересных возможностей. Уяснение влияния гармоник и несимметрии на защиту системы также является важной и сложной задачей, угрожающей устойчивости энергосистемы.

4) Человеческий фактор и принятие решений. Оптимальные комбинации аппаратного и оперативного ослабления последствий от ГИТ зависят от моделей возможной тяжести и продолжительности геомагнитных возмущений, неопределенности реакции энергосистемы и понесенных затрат. В настоящее время восприятие этого риска является неполным. Моделирование поддержки принятия решений совершенствуется, но отражают ли базовые модели реальность? Хотя подсистемы в основном полезны для управления сложностью, взаимосвязанная система – это активная модель, которая не различает, где заканчивается одна подсистема и начинается другая. Последние исследования показывают, что упрощенные модели, неподходящие пороговые значения параметров оценки и неопределенность нынешних мер по ослаблению последствий – всё это оставляет неизвестные пробелы между представлением и реальностью. В настоящее время начинается новый 11-летний цикл солнечной активности и это побуждает продолжение исследований по снижению скрытого риска.

### **Приглашенная презентация: Контроль уровня КЗ в слаботочных системах. Б. Бадрзаде**

Во многих регионах мира наблюдается быстрый рост ВИЭ и соответствующих ИР одновременно с выводом из эксплуатации объектов традиционной синхронной генерации. Как правило, новые ИР, такие как ветровые и солнечные электростанции, находятся в отдаленных местах с ограниченной пропускной способностью сети. Они также часто находятся вдали от крупных центров синхронной генерации, которые традиционно обеспечивали устойчивость энергосистемы в целом. Даже если рядом физически находятся мощные синхронные генераторы, они, как правило, выдают мощность гораздо реже из-за более высоких маржинальных цен. Мировая электроэнергетика постоянно разрабатывает методы оценки и решения новых сложных проблем, возникающих в результате этого быстрого перехода. Термин «устойчивость системы» описывает эти тенденции и их последствия для работоспособности энергосистемы с точки зрения собственно статической и динамической устойчивости энергосистемы, работы систем защиты и оценки качества электроэнергии.

В данной презентации представлен обзор составляющих компонентов «устойчивости системы» с точки зрения связанных с ними явлений и ключевых определяющих факторов, что позволяет выработать всеобъемлющее определение этого понятия. Затем обсуждаются различные инструменты и методы для оценки и мониторинга указанной «устойчивости системы». Они варьируются от инструментов, используемых при планировании и исследовании энергосистем, до инструментов, более подходящих для интеграции в среду диспетчерских пунктов или, по крайней мере, обеспечивающих поддержку принятия решений на несколько минут и часов вперед. Далее обсуждаются относительные преимущества и недостатки каждого инструмента, а также их взаимодополняющие преимущества.

Инструменты, которые потенциально можно использовать в качестве средств поддержки принятия решений для реальной работы энергосистемы, включают прямые измерения параметров энергосистемы и использование упрощенных аналитических методов. Методы, основанные на измерениях параметров энергосистемы, в свою очередь, делятся на две категории: оперативные измерения и поэтапное тестирование системы. В презентации рассматриваются практические примеры использования каждого метода. В заключение приводятся примеры методов идентификации (в докладе – скрининга), основанных как на стационарных, так и на динамических расчетах, и далее рассматриваются их относительные достоинства и ограничения.

### **Предпочтительная тема 2**

Предметом ПТ2 является «Моделирование будущей сети на основе выводов, сделанных по итогам системных событий», включая:

- Опыт, полученный при реализации проектов Интеллектуальной сети.
- Высокий уровень используемых устройств на базе силовой электроники.
- Разработка систем аккумулирования и хранения энергии (накопителей энергии).

Было принято 9 докладов из 6 стран, а также один доклад приглашенного специалиста. В докладах представлены концепции и результаты, которые в целом соответствуют трем рубрикам, обозначенным ПТ2, а именно, моделирование подсинхронного резонанса - доклады 210 и 211. Здесь представлены наработки, полученные благодаря опыту применения моделей подсинхронного резонанса, для последовательного включения синхронных конденсаторов и ветрогенераторных установок в Китае, а также для последовательного включения синхронных конденсаторов турбогенераторов в Чили. Главные выводы из этих докладов состоят в следующем:

- Возможность возникновения резонансного взаимодействия между последовательными конденсаторами и ветрогенераторами, вполне вероятно, и требует тщательного изучения.
- Имеется возможность формирования моделей для прогнозирования подсинхронного резонанса и возникновения скручивающих моментов валопроводов (торсионных взаимодействий). Диспетчерское управление генераторами может оказывать влияние на точность указанных выше моделей и должно учитываться в оценочных исследованиях.

Докладов, анализирующих опыт, полученный при реализации проектов Интеллектуальных сетей, на настоящую сессию не поступило. Это является очевидным свидетельством некоторого снижения интереса к данной тематике. Кроме указанной в ПТ2 были включены:

- Высокий уровень использования цифровой информации и технологий управления для повышения надежности, безопасности и эффективности;
- Развертывание и внедрение распределенных ресурсов и объектов генерации, в том числе на базе ВИЭ (так называемый двунаправленный поток);
- Разработка регулирования спроса;
- Применение интеллектуальных технологий учета, контроля состояния и автоматизации (улучшенное обнаружение и самостоятельное устранение КЗ);
- Интеграция «умных» приборов и других потребительских устройств (потенциал для управления на стороне спроса);
- Интеграция технологий хранения энергии, включая электромобили.

Исследовательский комитет С4 интересуют эффекты внедрения перечисленных выше технологий и проектов на передающую сеть. К примеру, динамические модели нагрузки должны корректно отражать мощность двигательной нагрузки кондиционеров воздуха для того, чтобы правильно представлять риски задержки восстановления нормального режима при КЗ.

- Высокий уровень использования цифровой информации и технологий управления для повышения надежности, безопасности и эффективности - доклады 201, 202, 203, 206, 207, 208 и 209.

В указанных докладах рассказывается о наработках, полученных в системах с высокими уровнями внедрения силовой электроники, включая солнечные установки в США и Египте. Были отмечены случаи быстрого погасания сети (массовые отключения возобновляемых источников электроэнергии), что создает проблемы с надежностью и требует соответствующего уточнения регуляторных документов. Так скорость изменения частоты тока в настоящее время рассчитывается с помощью различной ширины скользящего окна (от 50 мс до 500 мс). Не ясно, может ли возникнуть разрыв в используемых показателях надежности, если для определения способности генератора сохранять работоспособность при сбоях, если в устройствах управления скоростью изменения частоты применяются различные настройки. Потеря крупных солнечных станций (например, из-за облачной погоды и затмений солнца) может влиять на первичные резервы и должна учитываться как при планировании, так и при эксплуатации данных объектов генерации. При этом автоматическое управление электрической сетью (автоматический режим) может улучшить рабочие характеристики силовых преобразовательных ресурсов в слабых энергосистемах, а регуляторные правила требуется откорректировать с учетом этого режима работы.

Приведены убедительные доказательства необходимости разработки точных моделей для

разрешения вопросов, связанных с высокими уровнями силовых преобразовательных (инверторных) ресурсов. Отмечается, что RMS-модели (модели среднеквадратичных значений) сегодня недостаточно точны для оценки стабильности устройств автоматической подстройки частоты и контроля взаимодействий между инверторными ресурсами, особенно в слаботочных системах. Как минимум, RMS-модели инверторных ресурсов должны быть сопоставлены с моделями электромагнитных переходных процессов (EMT-модели, динамические модели) и соответствующими полевыми испытаниями. EMT-модели инверторных ресурсов необходимы парирования возможных негативных воздействий, возникающих в процессе наладки и испытания. В некоторых случаях EMT-модели также необходимы для использования при решении оперативных задач.

- Разработка систем аккумулирования и хранения энергии (накопителей энергии) - доклады 110 и 203.

Приведено два примера систем аккумулирования энергии, которые в зависимости от решаемой задачи обеспечивают синтетическую инерцию или быстрое реагирование на изменение частоты тока. Эффективность применения накопителей энергии для быстрого реагирования на изменение частоты зависит от применяемой технологии. Накопители энергии на основе аккумуляторных батарей в ряде случаев имеет ограниченную способность влиять на скорость изменения частоты и используются для быстрого ввода мощности с целью повышения устойчивости энергосистемы. Рассмотрены также гибридные схемы (аккумуляторы плюс суперконденсаторы), позволяющие более гибко реагировать на многочисленные влияющие факторы в системах ВИЭ.

#### **Аннотации докладов ПТ2:**

**Доклад 201: Проверка модели инверторных ресурсов для повышения надежности магистральных линий энергосистемы.** Э. АЙЗЕКС (Канада), С. ЧЖУ (США), Р. БАУЭР (США), Д. РАМАСУБРАМАНИАН (США), С. ПАНТ (США), Д. ПАЙПЕР (США), Р. КВИНТ (США)

NERC обобщает последние наработки, полученные на реальных примерах. Мгновенное прекращение работы, когда IP регулируют выходной ток до нуля при относительно небольшом падении напряжения (10%), вызывает значительные проблемы с надежностью. Анализ динамических EMT-моделей рекомендуется проводить во время исследований межсетевое взаимодействия наряду со сравнительным анализом согласно среднеквадратическим RMS-моделям.

**Доклад 202: Фотоэлектрическая станция «Бенбан»: влияние на работу египетской системы передачи электроэнергии.** М. ФАУЗИ (Египет), А. АМИН (Египет), Й. ФЕРБООМЕН (Германия), Ф. АВАТЕР (Германия), М. ШВАН (Германия), А. ЭЛЬМОРШЕДИ (Египет), М. КАМХ (Египет)

Анализируется крупный парк фотовольтаики (1465 МВт) в Египте. Крупные события (например, потеря станции из-за сплошной облачности) сравниваются с результатами имитационного моделирования.

**Доклад 203: Аспекты стабильности современных сетей и подавление нарушений энергоснабжения с помощью традиционных и новаторских решений. Наработки на примере реальных случаев.** А. КАНЕЛЬЯС (Великобритания), С. КАРАМИТСОС (Великобритания)

Основываясь на опыте других энергосистем с высоким уровнем IP, была смоделирована и протестирована европейская система вместе с различными потенциальными решениями. Эффект от включения в сеть синхронного конденсатора, сетевого накопителя энергии и статического компенсатора реактивной мощности (СКРМ) сравнивается со случаем использования в инверторах преобразователя напряжения с усовершенствованным управлением. Показано, что сетевой накопитель энергии наиболее эффективен и обеспечивает быструю реакцию на изменение частоты в сети.

**Доклад 206: Обоснование крупномасштабной модели электромагнитных переходных процессов на основе измерения возмущений в системе.** Б. БАДРЗАДЕ (Австралия)

Представлен опыт Австралии. Были разработаны и использованы EMT-модели для всех пяти регионов Австралии. Статья посвящена валидации EMT-модели, т.е. проверке соответствия данных, получаемых в процессе машинной имитации, реальному ходу явлений, для описания которых и создана данная модель.

**Доклад 207: Оценка динамической устойчивости частоты будущей континентальной европейской энергосистемы – Связанные инциденты и разделения системы.** Ж. ФУРНЕЛЬ (Франция)

С целью изучения устойчивости энергосистемы по частоте (стабильности частоты) в Европе приводятся результаты моделирования, связанные с наличием в объединенной энергосистеме 50% ВИЭ переменной мощности. Результаты показывают риск отключения генератора, если скорость изменения частоты тока в сети находится в диапазоне 1-2 Гц/сек, и риск погасания системы, если указанная скорость превышает 2-2,5 Гц/сек. Во время события, связанного с превышением частоты, 50% генерации имеет ограниченную чувствительность к частоте (относится только к новым генераторам) и включается на частоте 50,2 Гц с 5%-м понижением.

**Доклад 208: Системный анализ французской электрической сети, включая линии постоянного тока высокого напряжения, с использованием моделирования в реальном времени.** А. ПТИ (Франция)

Обсуждается аппаратное тестирование в контуре преобразователей тока в RTDS. Реальные испытания сравниваются с имитационным моделированием. Затем проводится тестирование эталонной модели. Изменения в гамма-управлении и переключении в точках на кривой проверяются для включения трансформатора преобразователя с учетом и без учета остаточного потока.

**Доклад 209: OSMOSE: Оценка эффективности формирования сети в рамках мультисервисной системы хранения, подключенной к сети передачи.** К. КАРДОСО (Франция)

Результаты OSMOSE представлены на основе предыдущих результатов проекта MIGRATE. Результаты проверены с помощью аппаратных средств в контуре управления. Описан демонстрационный проект по формированию сети мощностью 1 МВт (аккумуляторные батареи и суперконденсаторы). При этом ввод мощности не зависит от текущих результатов измерения частоты тока в электрической сети.

**Доклад 210: Субсинхронный резонанс ветропарков на базе асинхронных генераторов двойного питания, подключенных к системам передачи с последовательной компенсацией в Северном Китае: реальные данные и теоретический анализ.** С. ДУН (Китай)

Анализируется субсинхронный (подсинхронный) резонанс на ветровых электростанциях в Китае из-за взаимодействия последовательно включенных конденсаторов с соседними ветровыми электростанциями. Для проверки была скорректирована модель процесса на основе полевых измерений.

**Доклад 211: Программа анализа субсинхронного резонанса и мониторинга торсионных колебаний в национальной электросистеме Чили.** В. ВЕЛАР (Чили)

Проведены реальные широкомасштабные измерения сигналов, вызванных подсинхронным резонансом (в энергосистеме с 11 генераторами), и сравнение с результатами моделирования.

**Приглашенная презентация: Гармонизация канадских провинциальных сетевых кодексов для энергетического («зеленого») перехода.** Дж. Макдауэлл

В этой презентации будет представлен обзор работы, проведенной для Института ветроэнергетики Канады и Форума энергетических предприятий (NRCan) с целью оценки существующих канадских и международных сетевых кодексов, стандартов и практики планирования в Канаде и по всему миру. Эта работа включает в себя комплексный анализ с целью предложить общий набор руководящих принципов интеграции и межсистемных соединений не только с точки зрения технических требований, но и рыночных правил, включая рынки вспомогательных услуг. Рассмотрены канадские сетевые кодексы, выявлены технические пробелы и сделаны предложения о том, что они могут или должны содержать. Также рассмотрены конкретные требования к межсетевым соединениям для новых технологий, таких как солнечная энергия в коммунальном хозяйстве, накопители энергии на аккумуляторных батареях и гибридные системы. Описывается также анализ правил формирования объемов электроэнергии в передающих сетях с учетом пропускной способности распределительных сетей и их влияния на объединенную энергосистему. Приведены примеры того, как распределенная генерация может способствовать повышению надежности энергосистемы с учетом роста спотового рынка электроэнергии и изменений, необходимых для достижения этой цели. Кроме того, в данной работе освещаются лучшие практики и опыт со всего мира, включая требования к технической интеграции объединенных систем и рыночных механизмов, устройство рынка и гармонизацию этих аспектов в сетевых кодексах и механизмах торговли энергией в разных провинциях.

Один из конкретных аспектов, на котором была сфокусирована презентация, заключается в том, как

должны развиваться требования для того, чтобы максимально использовать возможности новых технологий посредством обновления методов моделирования и оценивания в целях планирования и эксплуатации электрических сетей. Еще одним ключевым элементом является необходимость сосредоточиться на оперативной совместимости средств контроля и оценки возможностей всех располагаемых ресурсов. Новые технологии, такие как управление формированием сети, будут играть ключевую роль, поэтому необходимы обновленные требования для раскрытия ценности этой технологии. В числе прочих рассмотренных аспектов оборудования и систем – быстрое отключение и при КЗ, сохранение работоспособности при возникновении технологических нарушений, устойчивость управления, стабильность взаимодействия, контроль и управление частотой и напряжением, а также моделирование и требования к предоставляемым данным.

### **Предпочтительная тема 3**

Предметом ПТЗ являются «Методы, модели и приемы оценки грозовых разрядов, качества электроэнергии и координации изоляции для улучшения характеристик развивающейся сети», в том числе:

- Системы переменного и/или постоянного тока сверхвысокого напряжения.
- Возобновляемая генерация, энергосистемы на инверторах и тяговая нагрузка.
- Взаимодействия между компонентами энергосистемы, приводящие к негативным последствиям.

В соответствии с ПТЗ было принято 24 доклада. Кроме того, были дополнительно представлены две презентации специально приглашенных специалистов. Авторы представляют 15 стран и одну рабочую группу, что отражает широкий международный интерес к ПТЗ. В докладах представлены концепции и результаты, которые в целом соответствуют трем рубрикам, обозначенным ИК, хотя следует признать, что между рубриками существует некоторое перекрытие.

- Системы переменного и/или постоянного тока сверхвысокого напряжения - доклады 309 и 321.

Моделирование механической защиты подводных электрических кабелей является сложной задачей и, одновременно с этим, источником неточностей. Можно ли скорректировать имитационные модели так, чтобы они с большей точностью соответствовали полевым измерениям. Следует отметить, что это тема пока не раскрыта должным образом над ней необходимо еще поработать, чтобы иметь как наилучшие модели, так и более адекватные рекомендации.

- Возобновляемая генерация, энергосистемы на инверторах и тяговая нагрузка - доклады 301, 302, 303, 311, 312, 315, 319 и 322.

Увеличение числа преобразователей на основе силовой электроники (на инверторах) в генерирующих установках и другом вспомогательном оборудовании оказывает серьезное влияние на эффективность системы, поэтому требуется разработка адекватных имитационных и математических моделей, описывающих процессы преобразования в этих энергосистемах. В докладах предлагаются рекомендации по разработке и собственно модели преобразователей на инверторах для различных исследовательских задач с соответствующими преимуществами, недостатками и ограничениями. В целом тема имеет много открытых вопросов и является незавершенной работой, в результате чего ожидаются будущие результаты от соответствующих рабочих групп СИГРЭ.

Увеличение объема генерации с оборудованием на основе силовой электроники увеличивает количество используемых ЕМТ-моделей с целью учета поведения преобразователей в различных режимах работы электрической сети. Высокоточные и детальные ЕМТ-модели приобретают все большую востребованность для моделирования больших крупномасштабных электросетей с растущей интеграцией возобновляемых источников энергии.

Несоответствие между результатами имитационного и математического моделирования и полевыми измерениями в крупных ветропарках становится обычным явлением, приводящим к установке зачастую ненужного фильтро-компенсирующего оборудования. Распределение ответственности за гармонические искажения между несколькими источниками может быть выполнено с помощью измерения PQ на общих точках нескольких присоединений с использованием

частотно-зависимых моделей.

Предлагается провести оценку стандарта на уровни напряжения для заземляющих устройств защитного контура заземления, так как существующие требования могут оказаться непригодными для оборудования на инверторах и привести к увеличению соответствующих затрат.

- Взаимодействия между компонентами энергосистемы, приводящие к негативным последствиям - доклады 305, 306, 307, 308, 310, 314, 317, 318, 320, 323, 324, 325, 326, 327.

**Качество электроэнергии.** В некоторых электрических сетях возникают проблемы, связанные с высоким уровнем гармонических искажений ввиду возрастающей тенденцией монтажа оборудования под землей и использования радиальных соединений для ветровой и солнечной генерации. При этом имеющиеся в настоящее время имитационные модели зачастую неспособны обеспечить точную оценку гармонических искажений.

Исследование качества электроэнергии в Австралии за последние 20 лет продемонстрировало тенденцию к снижению мощности аномальных возмущений, приводящих к гармоническим искажениям в электрических сетях.

Отмечено, что основные текущие тенденции развития генерации, передачи и распределения электроэнергии создают как новые проблемы, так и новые возможности, связанные с качеством электроэнергии.

**Координация изоляции.** Квазистационарные перенапряжения относятся к внутренним, они продолжаются от единиц секунд до десятков минут, например, вследствие несимметричных коротких замыканий на землю, при разгоне генератора в случае резкого сброса нагрузки, а также иных неблагоприятных взаимодействиях реактивных элементов сети и ЭДС источников энергии. Сверхбыстрые (доли секунд) квазистационарные перенапряжения могут приводить к ускоренному старению и разрушению трансформаторов. Демпфирование высокочастотных составляющих сверхбыстрых квазистационарных перенапряжений с помощью устройств, использующих скин-эффект, может стать эффективным средством борьбы, однако, это предстоит еще продемонстрировать.

Стандартный подход к моделированию и рекомендуемые МЭК импульсные испытания могут оказаться не вполне адекватными для взаимодействия КРУЭ и трансформатора, поскольку коммутационные перенапряжения от автоматического выключателя КРУЭ могут быть более высокими, нежели перенапряжения от стандартных грозовых импульсов. Для правильного моделирования требуется подробная модель процесса от производителя.

Несколько презентаций посвящены исследованию влияния на переходные процессы последовательно включенных реакторов и конденсаторных батарей с указанием соответствующих примеров исследования и применённых решений для различных нежелательных ситуаций.

**Молниезащита.** Рост производительности вычислительной техники, большее количество измерений и дополнительные возможности по автоматическому управлению электрическими сетями могут преднамеренно и превентивно изменять перетоки мощности в зонах с высокой грозовой активностью и тем самым уменьшать время прерывания электроснабжения потребителей.

**Вводы.** На многих турбинах ветрогенераторов возникают проблемы с отсоединением высоковольтных вводов. Предлагаются различные подходы для обнаружения подобной проблемы и предотвращения отключения ветрогенераторов от сети.

Технология разработки **электронных геометрических моделей (EGM)** продолжает оставаться популярным, хотя и эмпирическим инструментом, применяемым в настоящее время для формирования новых конфигураций опор.

**Защита.** Традиционные схемы защиты не будут работать должным образом на линиях с избыточной компенсацией. На таких линиях также присутствует заметный рост переходного восстанавливающего

напряжения и токов короткого замыкания в зависимости от параметров отключаемой цепи, характеристик выключателей, мгновенного значения напряжения сети в момент обрыва тока, начального момента короткого замыкания, его вида и других случайных факторов.

### **Аннотации докладов ПТЗ:**

**Доклад 301: Моделирование гармоник и проверка модели ветровых турбин с асинхронными генераторами двойного питания.** Дж. ЛЕОНАРД (США), Э. БОССНЕК (США), М. ЛУИН (США), К. ФОКС (США), Р. КАЗЕМИ (США)

В работе представлена гармоническая модель ветровой турбины типа 3 и ее сравнение с лабораторными измерениями. Модель состоит из эквивалентной схемы Нортон с частотно-зависимым источником тока и частотно-зависимым импедансом, полученным из модели, реализованной в программном обеспечении ЕМТ. Продемонстрировано получение двух параметров эквивалентной модели Нортон. Далее с помощью предложенной модели проведен анализ чувствительности для коэффициента КЗ и несимметрии напряжения. Показано, что несимметрии напряжения может оказывать существенное влияние на гармонический состав тока.

**Доклад 302: Влияние модели импеданса преобразователя ветровой электростанции на коэффициент усиления гармоник в нидерландской сети передачи 110 кВ на примере ветровой электростанции мощностью 383 МВт.**

Л. БЕЛОКИ-ЛАРУМБЕ (Нидерланды), Б.К. УММЕЛЬС (Нидерланды), Ч. ЦИНЬ (Нидерланды), П. БРАУЭР (Нидерланды), Д. ВРЕ (Нидерланды)

Представлена модель гармонического импеданса настраиваемого преобразователя (тип 4 WT), которая может быть использована для исследования гармоник на ранних стадиях, когда существует неопределенность параметров. Детали самой модели представлены в других публикациях. Импеданс ветропарка и коэффициенты усиления рассчитываются с помощью исследования чувствительности различных параметров – подход, который может быть повторен для других исследований ветропарков. Результаты показывают, что импеданс преобразователя оказывает значительное влияние на гармоники низких порядков ( $h \leq 10$ ).

**Доклад 303: Предложение метода суперпозиции с несколькими источниками и импедансами для отнесения ответственности за гармонические искажения.** М. КАРЛИ (Бразилия)

Представлен метод, который может быть использован для распределения ответственности за гармонические искажения между различными источниками. В качестве примера в докладе используются ветровые электростанции. Метод прост в использовании и требует только установки измерителей RQ в точках общего присоединения (ТОП), помимо частотно-зависимого импеданса сети и соединений между ТОП и отдельными источниками гармоник, которые могут быть обеспечены с помощью годографов импеданса. Приводятся многочисленные примеры расчетов для проверки с использованием результатов измерений.

**Доклад 305: Общесистемное усиление фоновых гармоник вследствие интеграции высоковольтных силовых кабелей.** Ч.П. КВОН (Дания)

В электрической сети 400 кВ Дании было отмечено значительное усиление фоновых гармоник после ввода в эксплуатацию 8 км кабеля 400 кВ. Это усиление было в основном на гармонике напряжения 11-го порядка, которое увеличилось выше планового уровня на двух подстанциях в 80 км и 90 км в географически противоположных направлениях от введенного в эксплуатацию кабеля. Гармонические искажения составляли приблизительно 50% от запланированного уровня до подачи напряжения на 8-километровый кабель. Был сделан вывод, что источником гармоник была подстанция постоянного тока высокого напряжения с ПЛК, и что фильтро-компенсирующие устройства переменного тока не справлялись с фильтрацией 11-й гармоники. Данная работа имеет особое значение, поскольку показывает, что незначительное изменение в сети может оказать существенное влияние на гармонические искажения.

**Доклад 306: Резонанс при работе системы накопления энергии в крупномасштабной системе предприятия с конденсаторной батареей.** Ч.С. ХО (Корея), Й.Ч. КВОН (Корея)

Исследуется взаимовлияние гармоник, генерируемых системой кондиционирования электроэнергии, с резонансными частотами, вызванными наличием конденсаторных батарей системы накопления энергии на крупной электростанции. Для этого случая были смоделированы большие гармонические искажения при параллельной работе нескольких систем накопления энергии.

**Доклад 307: Явления резонанса гармоник высоких порядков в диапазоне частот от 2 кГц до 9 кГц в низковольтной системе в Японии.** Д. ЁСИНАГА (Япония)

Японские предприятия заметили аномальные отключения электроэнергии из-за срабатывания выключателей утечки на землю, а также аномальные акустические шумы, которые были связаны с использованием импортных бытовых электроприборов. Основной причиной является перенапряжение, возникающее из-за гармоник и резонанса между столбовым трансформатором, низковольтной линией и емкостью электроприборов. Это, по-видимому, характерно только для Японии, поскольку импеданс японской низковольтной системы с большей вероятностью вызывает параллельный резонанс на частоте 2-9 кГц. В докладе приводятся результаты измерений и моделирования этого явления. Новый японский стандарт, ограничивающий эмиссию в диапазоне 2-9 кГц, оказал положительное влияние, и в настоящее время готовятся новые промышленные стандарты.

**Доклад 308: К вопросу о частотно-зависимом импедансе в сложном замкнутых сетях переменного тока. Анализ чувствительности параметров и влияние силовой электроники.** К. ДЖОН (Германия), К. ХИРШИНГ (Германия), Т. ЛЯЙБФРИД (Германия), С. ВЕНИГ

Обсуждаются способы моделирования передающих сетей с высоким объемом силовых электронных устройств: глубина моделирования, моделирование устройств и определение импеданса преобразователей. Процесс получения последних объясняется и проверяется с помощью программного обеспечения ЕМТ. Кроме того, в докладе представлены исследования чувствительности к влиянию модели линии (частотно-зависимой или модели потока нагрузки), глубины моделирования и объема ИР.

**Доклад 309: Эксплуатационные испытания в частотной и временной областях и проверка модели кабелей для подводной кабельной линии 500 кВ постоянного тока между Италией и Черногорией.** Л. БУОНО (Италия), Б. ЧЕРЕСОЛИ (Италия), Н. КУЛЯЧА (Черногория), Ф. ПАЛОНЕ (Италия), Ф.М. ПЕПЕ (Италия), Ф. РОМАНО (Италия), Ф. ОЛЬДАЦЦИ (Италия), Ф. ПАЛОНЕ (Италия)

Представлены импульсные и широкополосные измерения импеданса/адмиттанса кабеля 500 кВ длиной 393 км, а также сравнение с ЕМТ-моделированием. Эти измерения являются частью проводимых измерений, проводимых TERNA для высоковольтных кабелей. Помимо описания протокола измерений и использованного оборудования с тем, чтобы другие пользователи могли проводить подобные измерения, авторы предоставляют результаты по запросу. Импульсные испытания сравниваются с ЕМТ-моделированием с использованием модели конечных сечений и модели JMarti. Обе модели соответствуют измерениям на высоких частотах с различиями, обнаруженными на уровне резонансной частоты. Для импульсных испытаний модель конечных сечений демонстрирует вариации, обе модели не соответствуют фактическому распространению, но при этом правильно представляют процесс демпфирования.

**Доклад 310: Тенденции в сфере совместимости нарушений качества электроэнергии в Австралии.** Н. БРАУН (Австралия)

Австралия уже 20 лет проводит исследования качества электроэнергии в своих распределительных сетях. В документе обобщены данные по величине установившегося напряжения, несимметрии напряжения, гармоникам, фликеру и просадке напряжения. Делается вывод о том, что даже до внедрения фотоэлектрических установок на крышах домовладений поступали постоянные сообщения о перенапряжениях, хотя и с тенденцией к снижению. Несимметрия напряжения также превышает допустимые пределы, как и фликер, но последний показывает большие колебания, а данные по нему – менее надежны. Гармоники и просадки напряжения выходят за пределы допустимых значений. Кроме того, в докладе также обсуждаются тенденции в сфере помехоустойчивости и совместимости для всех параметров.

**Доклад 311: Контроль качества электроэнергии солнечной электростанции переменного тока высокого напряжения при помощи последовательных напряжений из синхрофазора. Разбор ситуации.** Ч. РЕТХИ-НАИР (Индия)

Представлены измерения несимметрии напряжения на различных подстанциях 400 кВ с помощью устройств синхронизированных векторных измерений и ее связь с фотоэлектрической генерацией. Измерения показали взаимосвязь между несимметрией напряжения нулевой последовательности и выработкой солнечной энергии, однако измеренные значения всё-таки были намного ниже предельно допустимых.

**Доклад 312: Качество электроэнергии на электрифицированных железных дорогах Аргентины: сравнение измерений на двух разных тяговых подстанциях.** Ф. ИССУРИБЕХЕРЕ (Аргентина)

В докладе показаны результаты измерения гармоник, несимметрии напряжения и фликера на двух тяговых подстанциях, одна из которых имеет трансформатор Скотта, а другая – однофазные трансформаторы. В обоих случаях измеренные величины были ниже предельных значений. Также была разработана и проверена с помощью измерений имитационная модель электрифицированной железной дороги.

**Доклад 314: Взаимодействие между КРУЭ и силовыми трансформаторами. Моделирование и подавление.** П. МИГЕЛ (Бразилия)

Представлены полевые измерения сверхбыстрых квазистационарных перенапряжений (VFТО) в КРУЭ 525 кВ. Измерения показали, что сверхбыстрые квазистационарные перенапряжения – не один, а несколько импульсов перенапряжения. Поскольку затухание в КРУЭ очень мало, эти импульсы, благодаря выравнивающим конденсаторам, достигают всех подключенных к КРУЭ трансформаторов даже при разомкнутых выключателях. Это может ускорить старение изоляции, так как высокая частота этого явления приводит к перегреву изоляции вокруг первых витков обмоток. Кроме того, в статье представлено устройство, состоящее из двух полых проводников, которое использует принцип поверхностного эффекта для ослабления составляющих напряжение гармоник выше 1 МГц. Уменьшая выделение тепла в изоляции, данное устройство может привести к увеличению срока службы КРУЭ.

**Доклад 315: Координация изоляции для подключенных к сети силовых электронных аппаратов.** Ч. СЮЙ (США), Л. ЧЖЭН (США), М. САИДИФАРД (США), К. КАНДАСАМИ (США), Ц. ВЭЙ (США), С. ХАНЬ (США), П. КАНДУЛА (США), Д. ДИВАН (США), Л. ГРАБЕР (США)

В статье рассматривается недостаток существующей процедуры координации изоляции применительно к силовым электронным устройствам. Авторы предлагают учитывать возможности защитных устройств, таких как ограничители перенапряжений, при определении способности силового электронного устройства выдерживать перенапряжения, поскольку разработка устройств, способных выдерживать высокие напряжения, приводит к непомерно высоким затратам. Предлагается пошаговая процедура с иллюстрирующими примерами. Таким образом, в данной статье предлагается новое определение и новая процедура испытаний на базовый уровень прочности изоляции силовых электронных устройств, что может стать важным вкладом в дальнейшее развитие этой темы.

**Доклад 317: Анализ параметров для противодействия чрезмерным переходным восстанавливающимся напряжениям на выключателях в схемах с последовательным реактором в Нидерландах.** Й. ВАН ВАС (Нидерланды), И. ТАННЕМААТ (Нидерланды), К. ЭНГЕЛЬБРЕХТ (Нидерланды), Н. ПАПАЗАХАРОПУЛОС (Нидерланды), К. ВЕЛИЦИКАКИС (Нидерланды)

Предлагается упрощенный подход к оценке дополнительной шунтирующей емкости, необходимой для предотвращения чрезмерного перенапряжения, обусловленного начальной скоростью роста напряжения восстановления от взаимодействия между последовательным реактором и связанной с ним малой шунтирующей емкостью. Метод заключается в определении потенциальных значений последовательных реакторов для электрической сети Нидерландов, а затем в проведении ЕМТ-моделирования с различными значениями дополнительных шунтирующих емкостей и некоторыми допущениями. Предложенный подход является консервативным, но он позволяет стандартизировать емкость конденсаторов и ускорить конструкторские расчеты в будущих проектах.

**Доклад 318: Сравнение различных методов для определения частоты отказов экранирования воздушной линии электропередачи.** К. ВЕЛИЦИКАКИС (Нидерланды), И. ТАННЕМААТ (Нидерланды)

Эффективность экранирования новых линий Wintrack (4×380 кВ) оценивается тремя различными методами: EGM-модель, EGM-модель с угловой коррекцией и модель «присоединения молнии». Первые два метода показывают схожую эффективность, однако если провода заземления перемещаются ближе к центру опоры, становятся заметны ощутимые различия. Модель «присоединения молнии» показывает лучшую эффективность экранирования при низких значениях частоты отказов экранирования (Shielding Failure Rate – SFR) и скорости пробоя при отказе экранирования (Shielding Failure Flashover Rate – SFFOR). Предполагается, что эта разница будет изучена в дальнейшем.

**Доклад 319: Молниезащита ветровых турбин, сооруженных в районах с высокой грозовой активностью.** К. ЯМАМОТО (Япония)

Описаны четыре технологии, которые могут быть использованы в качестве системы обнаружения грозных разрядов в ветровых турбинах, а также четыре метода обнаружения отключения токоотводов. Объясняются преимущества, недостатки и требования первых четырех методов. Указаны принципы и приведен пример применения вторых. В докладе дан хороший обзор различных вариантов технических решений, что может помочь принимать обоснованные решения.

**Доклад 320:** Динамическая молниезащита центров нагрузки в интеллектуальной сети. Ч. ТУН (Китай)  
Представлен превентивный подход для защиты от грозных отключений в режиме реального времени, который был применен в округе Сучжоу (Китай). Отслеживая молнии, центр управления после оценки запаса устойчивости системы так регулирует перетоки мощности, чтобы уменьшить поток мощности в зонах грозных разрядов. Это достигается за счет регулирования генерирующих установок, использования объединенных регуляторов потока мощности (UPFC), сокращения обмена электроэнергией с местными сетями, имеющими достаточно высокий уровень распределенной генерации и перераспределения нагрузки. Реализация этого решения привела к сокращению среднего времени восстановления системы и среднего времени перерывов электроснабжения.

**Доклад 321:** Анализ воздействия молний на систему кабелей  $\pm 500$  кВ постоянного тока с изоляцией из сшитого полиэтилена с воздушными линиями электропередачи. Ч.К. ЧОН (Корея), М.Ч. КИМ (Корея), К.Й. СИН (Корея), Ч.В. У (Корея), Ч.С. ХВАН (Корея), Ч.В. КАН (Корея)  
Рассматривается гибридная воздушная и кабельная линия постоянного тока 500 кВ с ПЛК-коммутацией и проводится моделирование грозного разряда на расстоянии 60 м от стыка кабеля и воздушной линии. Рассматриваются различные длины кабеля (10 – 40 км), а также наличие или отсутствие ограничителя перенапряжения на стыке кабеля и воздушной линии. Моделируется как пробой защитного экрана, так и обратное перекрытие. Моделирование показывает, что напряжение на конце кабеля, расположенном ближе к грозному импульсу, не зависит от длины кабеля. Однако, напряжение на самом дальнем конце резко уменьшается с увеличением длины кабеля.

**Доклад 322:** Конденсаторные батареи для компенсации реактивной мощности на ветровых электростанциях: аспекты электромагнитных переходных процессов и спецификация компонентов. Д. СЕНА (Бразилия)  
Представлено подробное исследование по оценке коммутационных перенапряжений, пусковых токов для ветровой электростанции, переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) и подключения ветростанции к точке общего присоединения (ТОП). Эта конкретная ветростанция требовала компенсации емкостной реактивной мощности для выполнения требований сети и, соответственно, оценки данных явлений. В этом случае использование управляемой коммутации (размыкание и замыкание) и ограничительных реакторов на выключателе позволило выполнить указанные требования.

**Доклад 323:** Комплексная оценка проблем и мер противодействия при применении линейных реакторов для снижения уровней короткого замыкания. И. РАХИМИ (Канада)  
В передающей системе AltaLink (Канада) наблюдается повышение уровня КЗ. Установка линейных реакторов в некоторых местах была выбрана в качестве экономически эффективного решения для снижения уровней КЗ. Это решение вызывает опасения в части следующих аспектов: анализ ПВН, координация изоляции и гармонический состав напряжения. Эти вопросы исследуются в докладе с помощью моделирования, представлены соответствующие меры по снижению: ПВН – за счет включения дополнительной емкости, перенапряжений – с помощью новой мачты молниеприемника на подстанции и двух ограничителей перенапряжения (ОПН), 5-й гармоники напряжения – с помощью фильтро-компенсирующего устройства.

**Доклад 324:** Инверсия напряжения и тока и ее воздействие на дистанционную и дифференциальную релейную защиту в системе передачи с избыточной компенсацией. Х. ЭРИКССОН (Швеция)  
Подведены итоги работы объединенной рабочей группы В5/С4.41 по защите последовательных линий с избыточной компенсацией, в отношении: ПВН, тока КЗ и инверсии напряжения/тока, включая соответствующее влияние на схемы защиты. В докладе показано, что ПВН и токи КЗ существенно возрастают в линиях с избыточной компенсацией, что может представлять проблему для проектирования варисторов и искровых промежутков. Что касается инверсии напряжения и тока, то делается вывод, что дистанционная защита не может быть использована в зоне 1 и, что для первичной защиты может быть использована только дифференциальная защита. На использование дистанционной защиты в качестве резервной также влияет избыточная компенсация линии. В докладе

представлены многочисленные формулы и примеры расчета по ним, подтверждающие определение уставок защиты для линий с избыточной компенсацией.

**Доклад 325: Послеаварийный анализ инцидентов на главном трансформаторе гидроэлектростанции путем цифрового моделирования на примере пробоя диэлектрика в результате взаимодействия между трансформатором и КРУЭ.** К. КАРДОСО (Португалия)

При обычной постановке под напряжение был поврежден повышающий трансформатор генератора. Наблюдаемые повреждения соответствовали переходному перенапряжению, но моделирование показало, что пиковое напряжение на зажимах трансформатора было намного ниже паспортного уровня прочности изоляции для импульсов  $1,2 \times 50$  мкс. Производитель предоставил модель трансформатора типа «белого ящика», и моделирование было проведено заново. Новое моделирование показывает, что коммутационные перенапряжения на первом витке трансформатора от работы выключателя КРУЭ могут быть более серьезными, чем от стандартных грозовых импульсов. Представлены многочисленные результаты моделирования, из которых становится видно, что перенапряжение зависит от взаимодействия энергосистемы и трансформатора. Также сделан вывод о том, что традиционные формы волны МЭК для импульсных испытаний могут быть недостаточными для изоляции трансформатора в случае сверхбыстрых квазистационарных перенапряжений.

**Доклад 326: Разработка базы данных об отложениях пустынной пыли и морской соли, необходимой для координации внешней изоляции в израильской электросети.** Э. ВОЛЬПОВ (Израиль)

В докладе представлена вторая часть проекта, целью которого является прогнозирование уровня загрязнения наружных изоляторов с учетом пыли Сахары и аэрозоля солей Средиземного моря. Первая часть, представленная на сессии 2018 года, была посвящена картированию отложений сахарской пыли, тогда как в данной работе представлены результаты по картированию аэрозоля морской соли. Разработанные карты были успешно верифицированы по результатам измерений в двух местах: в Израиле и в Италии. Помимо демонстрации всего процесса, лежащего в основе разработки карт, в докладе показано, что аэрозоли морской соли вносят заметный вклад в уровень загрязнения и должны учитываться при оценке частоты перекрытий.

**Доклад 327: Экспериментальное исследование токов в цепи возврата тока через землю и взаимоиנדукции в экструдированных кабелях.** П. КРОПМАН (Нидерланды), Ф. ПРОВОСТ (Нидерланды), М. ВАН РИТ (Нидерланды), С. НАУТА (Нидерланды)

Была создана специальная схема для измерения тока заземления трехжильного и одножильного кабеля с алюминиевыми жилами для использования при напряжении 12/20 кВ. Для данной конкретной схемы величина тока заземления в основном зависела от заземляющих резисторов. При этом можно сделать вывод, что это обычное явление для коротких кабелей. Сравнение между измерениями и моделированием не дало хорошего совпадения, что будет исследовано в дальнейшем.

**Приглашенная презентация: Важность проблемы качества электроэнергии в сетях будущего.** М. Боллен

Целью электрической сети является транспортировка, распределение и предоставление достаточного количества и качества электроэнергии потребителям, включая оборудование, подключенное к данной сети. За прошедшие годы произошли большие изменения как в качестве электроснабжения и электроэнергии, так и в том, как это качество воспринимается потребителями и соответствующим оборудованием.

В основной части презентации рассмотрены основные тенденции в производстве, в сети и в потреблении (генерация, передача и распределение), а также то, как они порождают новые проблемы, и новые возможности, связанные с качеством электроэнергии. В докладе даны некоторые рекомендации по исследованиям, разработкам и стандартизации, которые должны быть приняты в течение следующих нескольких лет. Используется несколько более узкое определение качества электроэнергии, когда провалы напряжения и гармонический состав составляют основное содержание анализа.

Презентация завершается взглядом в будущее (до 2050 года), когда, как ожидает (или, скорее, надеются) автор, будут проработаны и в значительной степени решены обозначенные проблемы. Качество электроэнергии по-прежнему будет иметь большое значение, но вопрос в том, в какой степени оно будет проявляться в исследованиях, в разработках, в образовании и в практическом проектировании и эксплуатации электросетей.

**Приглашенная презентация: Будущее в моделировании электромагнитных переходных процессов. Потребности, проблемы и радикальные изменения. Дж. Махсереджян**

Данная презентация посвящена будущим тенденциям и приложениям, связанным с методологией, используемой для моделирования электромагнитных переходных процессов в энергосистемах. Потребности в точном моделировании растут всё быстрее с широким внедрением ВИЭ и увеличением интеграции компонентов на основе силовой электроники, что оправдывает переход к моделированию типа ЕМТ (Electromagnetic Transients) не только для небольших сетей, но и для крупномасштабных систем, традиционно моделируемых в области фазовых векторов. Подход ЕМТ-моделирования с т.н. цифровым ядром может вскоре стать единственным подходом, используемым инженерами, при моделировании переходных процессов в энергосистемах.

Будущие тенденции в сфере моделирования электромагнитных переходных фактически совпадают с тенденциями моделирования работы энергосистем в целом. Предполагаемые тенденции будущего таковы: моделирование крупномасштабных сетей со всеми деталями, достигающими уровня электронной («цифровой» – авт.) копии сети, продвинутое управление данными, интеграция и унификация данных, стандартизация, 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 электромагнитных переходных процессов на более высокий уровень и более широкого признания в отрасли. Унифицированная среда на основе вычислительного ядра ЕМТ-моделирования позволяет проводить различные исследования, включающие потоки нагрузки, короткие замыкания, защиту, медленные и быстрые переходные процессы. Сокращение или устранение различного рода аппроксимаций устраняет неоднозначности и повышает производительность труда инженеров при проектировании надежных электрических сетей нового поколения. Точность моделей должна быть стандартизирована. Необходимо создать концепцию навигатора точности, который может 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, должно стать обычной практикой моделирование огромного количества сценариев, которые автоматически суммируются с отчетами о потенциальных проблемных условиях. Необходимы значительные исследования для разработки интеллектуальных численных методов, которые минимизируют вмешательство пользователя и в то же время будут способны обнаруживать проблемы и информировать о состоянии и режимах работы энергосистемы.