

**Российский Национальный Комитет  
Международного Совета по Большим Электрическим Системам (РНК СИГРЭ)  
Национальный исследовательский комитет А2 РНК СИГРЭ  
«Силовые трансформаторы и реакторы»**

## **ОТЧЕТ**

об участии в работе 48-й Генеральной сессии Международного Совета по Большим  
Электрическим Системам (СИГРЭ) и заседаниях исследовательского комитета  
А2 «Силовые трансформаторы и реакторы»



Отчет подготовлен:

**НИК А2 РНК СИГРЭ**  
**Матвеев Даниил Анатольевич**  
представитель РНК СИГРЭ в  
исследовательском комитете  
А2 «Силовые трансформаторы и реакторы»  
[daniil.matveev@gmail.com](mailto:daniil.matveev@gmail.com)

**Ларин Василий Серафимович**  
к.т.н., начальник отдела трансформаторов  
ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ им.  
академ. Е. И. Забабахина»  
[vsllarin@vei.ru](mailto:vsllarin@vei.ru)

Москва, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	3
2. Доклады 48-й сессии СИГРЭ .....	4
2.1. ПТ1 «Трансформаторные технологии для интеграции распределенных возобновляемых источников энергии».....	4
2.2. ПТ2 «Достижения в проектировании и испытании изоляции».....	7
2.3. ПТ3 «Повышение надежности трансформаторов».....	10
3. Дискуссионное заседание ИК А2.....	17
4. Заседание Исследовательского комитета А2.....	19
Заключение.....	23

## **1. Введение**

В период с 23 по 28 августа 2020 года в онлайн формате состоялась 48-я Генеральная сессия Международного Совета по Большим Электрическим Системам (СИГРЭ).

В рамках 48-й сессии СИГРЭ по тематике Исследовательского комитета (ИК) А2 «Силовые трансформаторы и реакторы» состоялись следующие мероприятия:

- закрытое заседание ИК А2;
- дискуссионное заседание комитета ИК А2;
- заседания консультационных и рабочих групп ИК А2.

В период с 18 по 27 августа 2021 года также в онлайн формате состоялась юбилейная сессия СИГРЭ, посвященная 100-летию СИГРЭ.

Всего по комитету А2 на 48-ю сессию СИГРЭ было принято **43 докладов** по следующим предпочтительным темам (ПТ):

***ПТ1 – Трансформаторные технологии для интеграции распределенных возобновляемых источников энергии (12 докладов)***

- применение, технические требования, конструкция и проектирование;
- влияние гармоник, включая интергармоники и субгармоники;
- влияние экстремальных условий окружающей среды, в т. ч. при морском и подводном размещении.

***ПТ2 – Достижения в проектировании и испытании изоляции (8 докладов)***

- требования к конструкции изоляции, в т. ч. для новых и нетрадиционных применений;
- новые и передовые концепции и техники проектирования изоляции;
- сложности испытаний электрической прочности изоляции и способы их преодоления;

***ПТ3 – Повышение надежности трансформаторов (23 докладов)***

- исследования и анализ надежности при длительной эксплуатации трансформаторов;
- повышение надежности посредством совершенствования технических требований, проектирования и изготовления;
- повышение надежности посредством совершенствования практики эксплуатации, обслуживания, восстановления и ремонтов.

## 2. Доклады 48-й сессии СИГРЭ

### 2.1. ПТ1 «Трансформаторные технологии для интеграции распределенных возобновляемых источников энергии»

A2-101. P. UPADHYAY J. KERN V. VADLAMANI (США). Distributed Energy Resources (DERs): Impact of Reverse Power Flow on Transformer (Распределенные источники энергии: влияние обратного потока мощности на трансформаторы).

Работа распределенных источников энергии, выдающих мощность в распределительную сеть, сопровождается так называемыми обратными потоками мощности через питающие распределительные трансформаторы, когда в течение некоторой части времени мощность передается в питающую сеть через распределительные трансформаторы, от стороны НН к стороне ВН. Это создает особые условия работы трансформаторов, на которые обычные распределительные трансформаторы общего применения могут быть не рассчитаны. В докладе рассмотрены вопросы влияния обратных потоков мощности на работу трансформаторов. Отмечена необходимость учета ограничений по обратным потокам мощности для обычных трансформаторов и применения специальных трансформаторов, спроектированных с учетом работы при обратных потоках мощности.

A2-102. P. NORBERG, H. ELFVING, E. TORKILDSSON (Швеция). *Active power control with 400/130 kV transformers. Experience from two recent projects (Регулирование активной мощности на трансформаторах 400/130 кВ. Опыт двух недавних проектов).*

Доклад посвящен применению вольтодобавочных и фазосдвигающих регулировочных трансформаторов для управления перетоками активной мощности при неоптимальной нагрузке трансформаторов, соединяющих сети ВН и СВН. Отмечено, что регулирование с помощью трансформаторов в этом случае дешевле, чем с помощью полупроводниковых технологий. Рассмотрены два действующих проекта и извлеченные уроки. В докладе подчеркивается важность использования правильных схем соединения обмоток вольтодобавочных трансформаторов, а также обеспечения гибкости с учетом изменений в сети – как в системе передачи, так и с постоянно меняющимся поступлением энергии от энергоблоков на более низких уровнях напряжения.

A2-103. T. LANERYD, A. GUSTAFSSON (Швеция). *Dynamic thermal behaviour of wind power transformers (Динамика температуры в ветровых силовых трансформаторах).*

В докладе рассмотрена динамика температур силовых трансформаторов для подключения к ветровым электроустановкам для определения типичного профиля нагрузки. Используются общедоступные данные метеостанций за 20 лет. Показано, что с помощью такого подхода можно анализировать изменения нагрузки в течение продолжительных периодов времени и проводить сравнение между различными географическими точками, и поэтому он может быть полезной альтернативой или дополнением к фактическим данным о нагрузке. Используемые модели теплового старения показывают, что изоляция обмотки подвергается очень небольшому старению из-за изменчивого характера нагрузки и того факта, что высокая скорость ветра никогда не совпадает с высокой температурой окружающей среды. Таким образом, появляется возможность уменьшить занимаемую трансформатором площадь, повысить эффективность и расширить существующие ветряные электростанции. Предлагаемая

конструкция трансформатора позволит вырабатывать 30% дополнительной ветровой энергии.

**A2-104.** C.V. SIMMONS, M.A. FEDOSIUK, M. DEY, R. BROWN, S. DUDLEY, S. W. MAHON, R. HEYWOOD (Великобритания). *Solar Farm Transformer Condition Monitoring and Automated Anomaly Detection Using Micro-Synchrophasors (Контроль состояния трансформаторов солнечных электростанций и автоматизированное обнаружение аномалий с помощью микросинхрофазоров).*

В докладе анализируется разработка солнечных электростанций (СЭС) в Великобритании и освещаются проблемы надежности, обусловленные ростом числа отказов трансформаторов и другого оборудования. Для данного исследования на избранных солнечных электростанциях была установлена программа мониторинга на базе микросинхрофазоров в целях поддержки системы мониторинга состояния оборудования. Передовые интеллектуальные инструменты обработки данных позволили обработать большой объем данных, поступающих от 6 солнечных электростанций, с целью обнаружения аномалий, что не было бы возможным при использовании стандартных способов сбора данных, и позволили снизить эксплуатационные расходы, избежать отключений и продлить срок службы оборудования.

**A2-105.** R. FRITSCH, T. MANTHEL, M. KUESTERMANN, F. TRAUTMANN, K. LOPPACH, G. PILZ (Германия). *Smart dynamic shunt compensation – inductive and capacitive reactive power based on common transformer technology (Интеллектуальная динамическая поперечная компенсация. Индуктивная и емкостная реактивная мощность на основе обычной трансформаторной технологии).*

Интеграция возобновляемых источников энергии, которая требует широкого использования высоковольтных кабелей, требует и дополнительной компенсации реактивной мощности, что предполагает более широкое использование шунтирующих реакторов. Авторы кратко описывают существующие технологии магнитоуправляемых шунтирующих реакторов и более подробно описывают новую и более простую технологию. Представлены результаты испытаний небольшого прототипа шунтирующего реактора с магнитным управлением («полностью регулируемый шунтирующий реактор») и конструкция шунтирующего реактора мощностью 130 МВАр, 400 кВ. Описываются преимущества, требования и возможные новые применения концепции шунтирующего реактора с магнитным управлением.

**A2-106.** M. KAKIHARA, H. OSAKI, S. YAMADA (Япония). *Effects of thyristor type step voltage regulator (TVR) application on various voltage changes caused by reverse power flow, distributed power supply and renewable energy (Влияние тиристорного ступенчатого регулятора напряжения на различные изменения напряжения, вызываемые обратным потоком мощности, распределенным электроснабжением и возобновляемыми источниками энергии).*

Доклад описывает эффект от изменения производства энергии в сторону увеличения количества источников возобновляемой энергии, введения учета изменений в выработку электроэнергии, изменения потока энергии и небаланса в распределительной сети. Анализируется применение усовершенствованного регулятора напряжения для распределительной сети, для использования вместо традиционного РПН. Представлен быстродействующий тиристорный ступенчатый регулятор напряжения, который меньше подвержен износу по сравнению с механическими устройствами РПН при большом

количестве ежедневных переключений. При этом могут быть получены оптимальные напряжения в интересах оператора сети.

**A2-107.** A. NOGUÉS, R. MURILLO, J. P. GRACIA, P. GONZÁLEZ, M. BERROGAIN, M. CUESTO, J. KERN (Испания, США). *Enhanced cooling of dry-type transformers for wind applications (Усиленное охлаждение сухих трансформаторов для ветровых установок)*.

Представлена новая конструктивная концепция сухого трансформатора с жидкостным охлаждением. Предполагается, что эта технология может оказаться более выгодной для применения на ветростанциях, чем традиционные сухие и маслонаполненные трансформаторы. Для проверки концепции был создан прототип. В сухом трансформаторе с жидкостным охлаждением эффективнее происходит перенос тепла от потерь в магнитопроводе, что позволяет уменьшить размер и вес по сравнению с традиционными трансформаторами с масляным охлаждением, одновременно добившись улучшения противопожарных свойств.

**A2-108.** X. WANG, X. LEI, C. HUANG, Y. WANG, X. HAN, M. REN, L. LI, R. CHEN (Китай). *Study on key technology and demonstration application of UHV AC controlled shunt reactor (Анализ ключевой технологии и демонстрация применения управляемого шунтирующего реактора УВН переменного тока)*.

В докладе описываются проблемы интеграции возобновляемых источников энергии в удаленных районах через линии передачи переменного тока большой протяженности. Возможности управляемых шунтирующих реакторов (УШР) и важность динамической реактивной компенсации показывают, что УШР, подключенный непосредственно к линии через трансформатор с большим реактансом, является наилучшим методом. Вся совокупность оборудования многоуровневого УШР может быть применима в новых системах генерации, отличающихся прерывистым режимом работы, непостоянством и хаотичностью, что могло бы эффективно решить проблемы, связанные с крупномасштабными системами новой генерации, и повысить надежность систем передачи энергии, вырабатываемой новыми системами генерации.

**A2-109.** T. GRADNIK, D. MILJAVEC, J. KOSMAC (Словения). *System for on-line evaluation of power transformer dynamic thermal loading capability. (Система оперативной оценки динамической нагрузочной способности силовых трансформаторов)*.

В докладе описывается концепция динамической оценки параметров для оперативного прогнозирования нагрузочной способности трансформаторов. Для проверки концепции было проведено исследование на трансформаторе мощностью 300 МВА в сети 400 кВ. Система динамической оценки использует условия окружающей среды, в том числе температуру и скорость ветра (в реальном времени и из прогнозов), в качестве входных параметров для прогнозирования нагрузки/перегрузки трансформатора на основе усовершенствованной тепловой модели. Результаты тестирования тепловой модели демонстрируют хорошее совпадение расчетных и измеренных температур. Перед широким внедрением модели в электрические системы планируется дальнейшая верификация для подтверждения ее точности и корректности, особенно в режимах аварийных перегрузок.

**A2-110.** E. VIRTANEN, T. LANERYD, H. LENDENMANN, H. NORDMAN (Финляндия, Швеция). *Thermal design aspects of subsea transformers (Тепловое моделирование и проектирование подводных трансформаторов)*.

Дальнейшее развитие ветропарков в Европе сопряжено с необходимостью их размещения на большем удалении от береговой линии, строительства морских платформ или искусственных островов для размещения подстанций схем выдачи мощности, что приводит к усложнению схем выдачи мощности ветропарков. Одним из решений этой проблемы является применение подводных трансформаторов. В докладе рассмотрены вопросы проектирование подводных силовых трансформаторов для схем выдачи мощности морских ветропарков. Представлены результаты тепловых испытаний прототипа мощностью 12 МВА. Дано описание проектируемого трансформатора мощностью 160 МВА напряжением 132/33 кВ.

A2-111. S. RAJAMANICKAM, S. MOSBACHER, J. FINDEISEN (США, Австрия, Германия). Influence of harsh operation conditions present on offshore platforms to the design of power transformer and shunt reactors (Влияние суровых условий эксплуатации, существующих на морских платформах, на конструкцию силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов).

В докладе рассмотрены условия работы трансформаторного оборудования на морских платформах, используемых для размещения подстанций схем выдачи мощности больших морских ветропарков. Рассмотрены особенности конструкции этих трансформаторов, вопросы применения различных типов жидких диэлектриков и систем охлаждения, а также защиты трансформаторов от коррозии. Представлены проекты размещения трансформаторов на морских платформах.

## **2.2. ПТ2 «Достижения в проектировании и испытании изоляции»**

A2-201. M. RYADI, P. HURLET, P. POUJADE, A. TANGUY (Франция). *Simulations and tests based on dielectric studies to improve the power transformers technical specifications and their performances (Моделирование и испытания на основе исследований диэлектрических свойств силовых трансформаторов для улучшения технических требований и характеристик).*

В докладе рассмотрены две проблемы, связанные с техническими требованиями к силовым трансформаторам, и представлен опыт Électricité de France (EDF) в их решении.

Первая проблема связана с высокочастотными перенапряжениями, передаваемыми на сторону низшего напряжения блочных трансформаторов станций. В соответствии со спецификациями EDF поставщик должен продемонстрировать расчетами и испытаниями, что наведенные напряжения должны быть меньше допустимых для изоляции в двух случаях: генератор напрямую подключен к трансформатору и генератор отключен. Указаны требования к значениям коэффициента передачи. Для корректного численного моделирования соответствующих переходных процессов в EDF разработано специализированное программное обеспечение. С помощью моделирования (подтвержденного опытом EDF) показано, что в трансформаторах без электростатических экранов наведенные напряжения достигают 34% от пикового значения воздействующего напряжения на стороне ВН. В рассматриваемом примере для ограничения перенапряжений на стороне НН применены ОПН.

Вторая проблема возникает из-за различий в заземлении нейтральных выводов трансформаторов. Приведен пример отказа трансформатора. В условиях испытаний нейтральный вывод трансформатора заземлен наглухо, но в процессе эксплуатации он заземляется через индуктивное сопротивление 25 Ом. Моделирование показало, что во внутренних узлах трансформатора при этом возникают высокие напряжения. С помощью

программного обеспечения, реализующего метод конечных элементов, были определены полевые воздействия на изоляцию, и мгновенные значения тангенциального поля в условиях эксплуатации оказались выше, чем при испытаниях.

В заключение в статье предлагается усовершенствовать проектирование изоляции трансформаторов с учетом различий между условиями испытаний и эксплуатации. Также отмечено, что желательно организовать новую рабочую группу CIGRE, посвященную электрической прочности изоляции трансформаторов (предпочтительно для нестандартных воздействий).

**A2-203.** V.S. LARIN, D.A. MATVEEV, B.K. MAXIMOV (Россия). *Resonant overvoltages inside power transformer windings and the measures improving their ability to withstand high-frequency stresses* (Резонансные перенапряжения в обмотках силовых трансформаторов и обеспечение стойкости к высокочастотным воздействиям).

В последнее время отмечается все больше случаев повреждений трансформаторов по причине высокочастотных резонансных перенапряжений. В докладе рассмотрены прикладные вопросы подтверждения стойкости к высокочастотным резонансным перенапряжениям. Описано влияние типа обмотки на развитие высокочастотных резонансных перенапряжений в обмотках трансформатора, и отмечены типы обмоток, наиболее и наименее подверженные резонансным перенапряжениям. Рассмотрены особенности развития резонансных перенапряжений в обмотках распределительных трансформаторов, работающих в сетях с изолированной или с высокоомно-заземленной нейтралью, вопросы экспериментальной и расчетной проверки способности трансформаторов выдерживать высокочастотные воздействия путем проведения соответствующих испытаний и измерений, а также вопросы применения и повышения точности расчетно-экспериментальной оценки воздействий на изоляцию обмоток путем дополнения результатов расчетов доступными измерениями.

**A2-204.** J. ZHENG, K.C. WEN, L.J. KONG, Y.X. FENG (Китай). *Electric Field Analysis for Valve-side Lead-out Insulation Structure of UHVDC Converter Transformer* (Анализ электрического поля в изоляции отводов вентильной стороны преобразовательного трансформатора ультравысокого напряжения).

Доклад посвящен выбору оптимальной конструкции изоляции подключения отводов вентильной стороны к вводам постоянного тока преобразовательных трансформаторов ультравысокого напряжения.

Охарактеризованы типовые изоляционные конструкции, свойства материалов и граничные условия для полевых расчетов методом конечных элементов, а также приведены параметры расчетной кривой для коэффициентов запаса.

Приведены результаты расчетов и их анализ для четырех видов изоляционных конструкций. Конструкции «половинная крышка» и «полная крышка» характеризуются высокими постоянными полевыми воздействиями на концах крышек. Конструкция «Двойное кольцо» не обеспечивает достаточного запаса прочности при переменных напряжениях. Конструкция «Ω-образная крышка» хорошо работает как при переменном, так и при постоянном напряжении.

**A2-205.** B.W. MIN, J.B. LEE, K.H. LEE, J.S. PARK (Южная Корея). *Partial Discharge Localization Algorithm for Power Transformer Using UHF Signals* (Алгоритм локализации частичных разрядов в силовых трансформаторах с использованием УВЧ-сигналов).



В докладе рассматривается задача локализации частичных разрядов (ЧР) при измерениях УВЧ-методом и предложен новый «усовершенствованный метод триангуляции».

Описана система мониторинга частичных разрядов и метод обнаружения частичных разрядов, основанный на расчетах методом конечных разностей во временной области (FDTD), изложен новый алгоритм и охарактеризована реализующая его программа. Показано, что новый алгоритм позволил успешно обнаружить источники ЧР:

- на гибких выводах двух фаз трехфазного силового трансформатора 750 МВА, 500 кВ;

- от поверхностного разряда по картону возле ввода трехфазного силового трансформатора 407 МВА, 345 кВ;

- от пустот на внутренней и внешней поверхностях цилиндров трехфазного силового трансформатора мощностью 500 МВА, 230 кВ.

**A2-206.** R. ALVAREZ (Аргентина), D. ROBALINO (США). *ADVANCES OF DIELECTRIC FREQUENCY RESPONSE TESTING FOR HV OIP BUSHINGS (Прогресс в применении метода диэлектрических частотных характеристик для испытания высоковольтных масло-пропитанных вводов).*

В докладе обсуждается текущая ситуация с предельными значениями параметров, характеризующих диэлектрические потери в изоляции и тепловые характеристики, а также сравниваются узкополосные и широкополосные измерения диэлектрической частотной характеристики для оценки состояния маслопропитанных вводов. Представлены диэлектрические характеристики 12-ти высоковольтных вводов и проведена оценка их состояния по трем различным методикам. Использован алгоритм индивидуальной температурной коррекции. Итоговые результаты существенно различаются.

Также представлены результаты разборки и расширенных испытаний для четырех вводов. Показано, что результаты по методам узкополосных и широкополосных диэлектрических характеристик с поправкой по алгоритму с индивидуальной температурной коррекцией более точны, чем результаты измерений  $\tan \delta$  на промышленной частоте по методике CIGRE с поправкой на температуру.

Сделан вывод о необходимости проведения измерений в частотном диапазоне от 1 до 500 Гц с индивидуальной температурной коррекцией.

**A2-207.** D. VIR, P. RAMASWAMY, Y. FRADKIN (США). *Simulation and Measurements of Special Termination Lightning Impulse Test on Power Transformers (Моделирование и эксперименты для испытаний силовых трансформаторов напряжением грозового импульса со специальным соединением выводов обмоток).*

В докладе рассмотрено влияние соединений выводов обмоток на перенапряжения в трансформаторе при испытаниях полным грозовым импульсом – на всех выводах, кроме того, к которому приложено испытательное напряжение, установлены ограничители перенапряжений (ОПН). Приведены результаты импульсного обмера на низком напряжении от генератора Y-Delta 345 кВ, которые сравниваются с результатами численного моделирования с целью проверки модели, которая в дальнейшем используется для исследований. Показано, что максимальные напряжения выше (особенно в обмотке НН) таковых при традиционном заземлении выводов обмоток.

**A2-208.** A. RABEL, J-J. ZHOU (Австрия). *Verification of Withstand Capability for Very Fast Transients of a 200 MVA, 500 kV GSU-Transformer by Modelling and Testing*

*(Проверка стойкости к очень быстрым переходным процессам блочного трансформатора 200 МВА, 500 кВ с помощью численного моделирования и испытаний).*

В докладе обсуждается способность трансформатора выдерживать высокочастотные перенапряжения. Представлен пошаговый подход к оценке выполнения требований по стойкости к этим перенапряжениям. С помощью численного моделирования сделана оценка способности трансформаторов выдерживать затухающие синусоидальные напряжения на резонансных частотах. Для оценки стойкости с ВЧ-воздействиям использован FDSF (Frequency Domain Severity Factor – коэффициент опасности перенапряжения в частотной области). Приведены результаты испытаний трансформатора на установке с элегазовым выключателем для организации среза напряжения. Отмечена необходимость исследований электрической прочности изоляции трансформатора при импульсных воздействиях нестандартной формы.

### **2.3. ПТЗ «Повышение надежности трансформаторов»**

**A2-301.** R.I. DA SILVA, I.P. ARANTES, I. CAPINOS, L. DE OLIVEIRA, M.A. DE LIMA, G.L. NICOLA (Бразилия). *Ten Years of Experience with Natural Ester in 245 kV: Shunt Reactor of Vilhena Substation (Десятилетний опыт работы с натуральным эфиром в оборудовании класса напряжения 245 кВ: шунтирующий реактор подстанции Вилена).*

В докладе описан опыт эксплуатации шунтирующего реактора (ШР) 245 кВ мощностью 22 МВар, заполненного натуральным эфиром, который установлен в Бразильских электрических сетях на подстанции Вилена. ШР был введен в эксплуатацию в 2008 году. Представлены результаты измерения физико-химических показателей натурального эфира и хроматографического анализа растворенных газов. Отмечено о положительном опыте эксплуатации, который подтвердил ключевые преимущества трансформаторного оборудования с заполнением натуральным эфиром – экологичность и повышенная взрыво- и пожаробезопасность.

**A2-302.** W. CHABANE, F. REBBOUH, H. TIZERARINE (Алжир). *Investigation on the operating conditions of MV / LV transformers and recommendations to improve their reliability (Исследования условий эксплуатации трансформаторов для сетей среднего и низкого напряжения и рекомендации по повышению их надежности).*

Представлены результаты анализа эксплуатации, технического состояния и причин повреждения / ухудшения состояния изоляции 26 распределительных герметичных трансформаторов мощностью до 630 кВА включительно. В качестве основных причин повреждений отмечены перегрузки, внутренние повреждения, грозовые перенапряжения и короткие замыкания по стороне низшего напряжения трансформаторов. Предложены рекомендации по повышению надежности, включающие учет особых условий эксплуатации (повышенные температура и влажность), обеспечение требуемой вентиляции помещений установки трансформаторов, а также установка комбинированных защитных устройств (DGPT), объединяющих функции газового реле, реле давления и контроля температуры верхних слоев масла.

**A2-303.** C. RAJOTTE, S. PROULX (Канада). *Continuous improvement of transformer specifications at a large utility (Непрерывное совершенствование технических требований к трансформаторам крупных энергообъектов).*

Представлен опыт компании Hydro-Québec, являющейся одной из крупнейших в мире электроэнергетической компанией, которая эксплуатирует парк трансформаторного оборудования из более чем 2300 силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов

классов напряжения 69 – 735 кВ мощностью 10 МВА и более. Средний возраст парка трансформаторов превышает 30 лет, а ожидаемый срок службы составляет от 35 до 50 лет, в зависимости от типа оборудования. Описаны развитие требований к бакам трансформаторов, ужесточение требований к уровню звука, допустимым отклонениям напряжения короткого замыкания, применение высокотемпературной твердой изоляции. Отмечено о запрете на применение вводов с фарфоровой внешней изоляцией и переход от вводов с бумажно-масляной изоляцией на вводы с RIP изоляцией вплоть до класса напряжения 735 кВ, а также об отказе от оснащения устройствами ПБВ в случае трансформаторов с редкими переключениями переключающего устройства.

**A2-304.** R. FRITSCHE, F. TRAUTMANN, S. WITTEMANN, J. CHRISTIAN, G. ADAMIETZ, D. WENGER (Германия). *Power Transformers using Esters next generation – ready to cope with all grid operation challenges (Силовые трансформаторы с использованием эфиров следующего поколения – готовы справиться со всеми задачами эксплуатации электрических сетей).*

Представлен опыт разработки двух типов силовых трехобмоточных автотрансформаторов напряжением 420/115/22 кВ мощностью 300 МВА и 400 МВА, заполненных натуральным эфиром. Одной из проблем применения трансформаторов с натуральными эфирами является высокая вязкость жидкого диэлектрика при низких температурах, что затрудняет работу системы охлаждения трансформатора при его пуске при низких температурах («холодный пуск»), когда из-за снижения эффективности работы охладителей может произойти перегрев обмоток. Приведены результаты проведенных исследований работы трансформаторов с натуральным эфиром при «холодном пуске», а также основные технические характеристики разработанных автотрансформаторов.

**A2-305.** C. PERRIER, M-L. COULIBALY, M. MARUGAN (Франция). *Compatibility tests between solid and liquid materials for reliable transformers (Испытания на совместимость твердых и жидких материалов для надежных трансформаторов).*

Отмечена важность совместимости твердых и жидких материалов и рассмотрены вопросы ее экспериментального подтверждения. Представлены примеры исследования совместимости некоторого типа уплотнительной резины и трансформаторного масла, которые показывают их несовместимость, проявившуюся в росте кислотного числа, тангенса угла диэлектрических потерь и проводимости масла, а также механической деградации резины. Приведен пример оценки совместимости клеящей ленты с минеральным маслом и натуральным эфиром. Также приведены результаты исследований изменения газосодержания масла при выдержке при повышенной температуре в контакте с неокрашенной и окрашенной стальной поверхностью, которые показывают влияние материала лакокрасочного покрытия бака на скорость газообразования трансформаторного масла.

**A2-306.** R.V. TALEGAONKAR, O.C. KOLAMBKAR, T.P. GOVINDAN (Индия). *Reliability evaluation of ester oil filled onload tap changers through critical tests (Оценка надежности заполненных эфиром устройств переключения под напряжением с помощью критических испытаний).*

Представлены результаты исследований электрической износостойкости устройства регулирования под напряжения (РПН) номинальным напряжением 300 кВ и током 700 А, заполненного натуральным эфиром. Испытания электрической износостойкости проведены по стандартной методике, включающей 50000 операций

отключения номинального тока. Представлены результаты динамика изменения физико-химических показателей (пробивного напряжения, тангенса угла диэлектрических потерь, содержания механических примесей) и результатов хроматографического анализа в процессе исследований для случаев заполнения устройства РПН трансформаторным маслом и натуральным эфиром. Исследования показали удовлетворительную работу РПН с натуральным эфиром. Также отмечено о положительном опыте применения более 300 устройств РПН в электрических сетях Индии.

**A2-307.** P. HURLET, M. RYADI, A. TANGUY, L. PAULHIAC (Франция). *Improving the reliability of key power transformers (GSU for Nuclear Power Plants) through specifications (Повышение надежности ключевых силовых трансформаторов (генераторных трансформаторов для атомных электростанций) путем совершенствования технических требований).*

В рамках продления срока службы атомных электростанций Франции компанией EDF начала процедура замены 174 однофазных генераторных трансформаторов большой мощности. Представлен опыт компании, полученный при разработке усовершенствованных технических требований и анализа конструкций генераторных трансформаторов. Рассмотрены вопросы развития требований к тепловым характеристикам и материалам, установки оптических датчиков для измерения температуры обмоток, подтверждения механической прочности элементов активной части. Приведен пример повреждения после нескольких лет эксплуатации однофазного генераторного трансформатора 570 МВА 400 кВ, в котором из-за протекания вихревых токов в адаптере вводов обмотки НН имел место нагрев отдельных его частей до температуры 125 °С, термическое повреждение уплотнительной резины, разгерметизация бака трансформатора, утечка нескольких кубометров масла из бака трансформатора и срабатывание газовой защиты.

**A2-308.** R. GIRGIS, G. BURDEN, M. BERNESJO (США), T. LINDSTEDT (Швеция), D. BONMANN (Германия), I. GRANT, G. KOBET, A. COMMANDER, S. DAHMAN, Y. SENEGAL (США). *GIC Magnetic and Thermal Assessment of a Large Fleet of Power Transformers – A Case Study (Оценка влияния геомагнитно индуцированных токов на магнитные и тепловые характеристики большого парка силовых трансформаторов – практические примеры).*

Представлены результаты исследований влияния геомагнитно-индуцированных токов, выполненных для электрических сетей США класса напряжения 500 кВ общей протяженностью около 4000 км. Дано краткое описание модели сети, используемого программного обеспечения и результатов моделирования. Рассмотрено влияние ГМИТ на магнитные и тепловые характеристики трансформаторов и приведены результаты оценки и ранжирования парка трансформаторов по степени восприимчивости к ГМИТ.

**A2-309.** R. TEIXEIRA, J. CARVALHO, E. MIRANDA, W. FRANÇA, M. ALVES, L. R. VARASQUIM, W. PERSON, D. PEDROSA, R. ISHII, M. KLETTENHOFER, S. FRONTIN, R.A. FLAUZINO, I. NUNES (Бразилия). *Health Index and Hierarchizing Scale Methodologies for Prioritizing On-line Monitoring of Power Transformers and Reactors in the Brazilian Transmission Grid (Индекс технического состояния и методология иерархического ранжирования для определения приоритетов мониторинга силовых трансформаторов и реакторов в Бразильской магистральной электрической сети).*

Представлены результаты научно-исследовательской работы на тему разработки многокритериальной методологии ранжирования силовых трансформаторов и реакторов

для онлайн-мониторинга с помощью экспериментального программного обеспечения, направленной на повышение эффективности управления парком силовых трансформаторов. Описана методология формирования индексов технического состояния (ИТС) трансформаторного оборудования. Представлен подход к ранжированию оборудования по степени необходимости установки систем онлайн мониторинга состояния, основанный на использовании ИТС и матрицы рисков.

**A2-310.** R.L.F. QUEIROZ, J.M. ARAÚJO, L.C.F. SANTOS, A.B. POSSIDONIO (Бразилия). *Improving transformer reliability through operation, maintenance, repair and asset management for extended life (Повышение надежности трансформаторов путем эксплуатации, технического обслуживания, ремонта и управления активами в течение длительного срока службы).*

Представлен опыт компании Eletronorte, крупной государственной электрогенерирующей и электросетевой компании Бразилии, эксплуатирующей сети общей протяженностью 9983 км и подстанции трансформаторной мощностью 31 ГВА. Примерно треть эксплуатируемых трансформаторов и шунтирующих реакторов имеет срок службы свыше 30 лет. Для анализа и оценки состояния трансформаторного оборудования была разработана и внедрена система DianE, предназначенная для сбора информации о состоянии различного электрооборудования, включая результаты физико-химического и хроматографического анализа (ХАРГ) масла и диагностических обследований, проводимых на работающем и отключенном оборудовании.

**A2-311.** J. FOROS, E.G. TVETEN, K.B. LILAND, E.B. MEHAMMER, L. LUNDGAARD (Норвегия). *Transformer management by learning from condition, failure and scrapping data collected nationwide (Управление трансформаторами путем изучения данных о состоянии, отказах и утилизации, собранных по всей стране).*

Представлены результаты анализа состояния и уровня повреждаемости трансформаторов, установленных в Норвежских электрических сетях. По состоянию на 2019 год в магистральных и распределительных сетях эксплуатируется 3094 силовых трансформаторов классов напряжения до 420 кВ включительно, при этом большая их часть имеет срок службы свыше 30 лет. Отмечено о создании национальной базы результатов ХАРГ, содержащей данные по 2783 трансформаторов (13077 проб масла) за период с 1975 по 2019 годы. Представлены результаты анализа 350 повреждений трансформаторов, произошедших в период с 1998 по 2018 годы, показывающие общий уровень повреждаемости сетевых и генераторных трансформаторов напряжением 22 кВ и выше на уровне 0,5% в год. Отмечено о создании базы данных с результатами оценки состояния твердой изоляции (степени полимеризации) утилизируемых трансформаторов. Дано краткое описание предлагаемой методологии вычисления индексов технического состояния трансформаторного оборудования.

**A2-312.** T. ZUPAN, B. JURISIC, I. MURAT, B. FILIPOVIC-GRCIC, S. GOGLIA, G. LEVACIC (Хорватия). *Fleet Asset Management Opportunities Arising from Transient Monitoring of Power Transformers and Shunt Reactors (Возможности управления активами парка силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов, возникающие в результате мониторинга переходных процессов).*

Описана разработка и применение системы мониторинга быстрых переходных процессов в электрических сетях для оценки высокочастотных воздействий на изоляцию силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов. Система была верифицирована с помощью лабораторных исследований и заводских испытаний импульсной электрической

прочности изоляции шунтирующего реактора. Представлены примеры применения системы для измерений переходных процессов на входных зажимах по стороне ВН и СН трехфазного автотрансформатора 150 МВА 220/110 кВ, вызванных поражением молнией подходящей к подстанции воздушной линии 220 кВ.

**A2-313.** E. ERMAKOV, T. LINDSTEDT, L. MELZER, L. PETTERSSON, M. PETTERSSON (Швеция). *Fleet screening of HVDC transformers (Проверка парка преобразовательных трансформаторов для систем постоянного тока высокого напряжения).*

Представлена методология оценки риска повреждения трансформаторного оборудования на основе анализа исходной конструкции оборудования, его текущего состояния и эксплуатационных воздействий. Отмечены особенности преобразовательных конструкции и условий работы преобразовательных трансформаторов, оказывающие влияние на оценку их состояния. Рассмотрен пример оценки состояния и ранжирования семи однофазных преобразовательных трансформаторов мощностью 354 МВА с напряжением обмоток  $345/\sqrt{3} / 187,3 / 187,3/\sqrt{3}$  кВ.

**A2-314.** D. ALBERT, P. SCHACHINGER, H. RENNER, P. HAMBERGER, F. KLAMMER, G. ACHLEITNER (Австрия). *Field experience of small quasi DC bias on power transformers. A first classification of low-frequency current pattern and identification of sources (Полевой опыт малого квази-подмагничивания постоянным током на силовых трансформаторах. Первая классификация низкочастотного тока и идентификация источников).*

Представлены результаты исследований геомагнитно-индуцированных токов в электрических сетях Австрии. Приведено описание измерительного оборудования для регистрации ГМИТ и результаты измерений ГМИТ в нейтрали сетевых трансформаторов. Представлены результаты исследования влияния подмагничивания постоянным током на уровень звука трансформаторов, которые были выполнены на лабораторном стенде, содержащем два трансформатора мощностью 50 кВА напряжением 35/0,4 кВ, включенных по кольцевой схеме (0,4 – 35 – 0,4 кВ), с инъекцией постоянного напряжения по стороне ВН этих трансформаторов. Исследования показали увеличение уровня звука с ростом подмагничивающего тока. Отмечено о том, что рост уровня звука силовых трансформаторов в эксплуатации может быть использован в качестве признака воздействия на трансформаторы токов низкой частоты.

**A2-315.** S. MIYAZAKI, M. NAKAI, M. YOSHIDA, K. AOKI (Япония). *Rationalization and high precision of transformer lifetime evaluation method (Рационализация и повышение точности метода оценки срока службы трансформаторов).*

Рассмотрены вопросы оценки остаточного срока службы трансформаторов по степени полимеризации твердой изоляции и усилию прессовки обмоток. Описаны подходы к оценке СП по содержанию в масле фурановых соединений и результатам динамического теплового расчета трансформаторов, а также применение оптоволоконного датчика для определения СП волокон целлюлозной изоляции в трансформаторном масле. Отмечено, что по результатам ускоренного старения распределительных трансформаторов был установлен критический уровень остаточной прессовки обмоток равный 30% (при меньшем усилии прессовки происходит потеря радиальной устойчивости обмотки НН). Для оценки остаточного срока службы трансформаторов предложено использовать уровень остаточной прессовки обмоток 30-40%.

**A2-316.** S. SACCO, F. SCATIGGIO, C. SERAFINO, F.M. PEPE, L. LOMBINI, F. FERRARI, D. ROGORA (Италия). *Large Power Autotransformers filled with natural ester – Working parameters from the field and Maintenance notes (Автотрансформаторы большой мощности, заполненные натуральным эфиром – Рабочие параметры в полевых условиях и примечания по техническому обслуживанию).*

Итальянская электросетевая компания TERNА в 2015 начала исследовательскую работу по применению силовых трансформаторов с заполнением натуральным эфиром. Описаны опыт эксплуатации заполненного натуральным эфиром (Cargill Envirotemp FR3) автотрансформатора мощностью 250 МВА напряжением 400/135 кВ, а также результаты его приемочных и диагностических испытаний и измерений в процессе эксплуатации. Отмечено, что на момент написания доклада в работе находятся уже восемь трансформаторов с заполнением натуральным эфиром.

**A2-317.** Y. LI (Австралия). *Experiences from Transformer Onsite Refurbishment (Опыт ремонта трансформаторов на месте установки).*

Сообщено о выполнении Австралийской электросетевой компанией на месте эксплуатации капитальных ремонтов 16 сетевых трансформаторов. Ремонты включали замену вводов, замену или восстановление системы охлаждения, замену резиновых уплотнений, очистку трансформаторного масла, осмотр и чистку контактов контактора и избирателя устройства РПН, восстановление лакокрасочного покрытия, а также установку систем мониторинга на отдельных трансформаторах, проверку и ремонт защитных устройств, проверку и восстановление силы прессовки обмоток. После ремонта на трансформаторах были выполнены высоковольтные испытания, включающие испытания приложенным переменным напряжением, испытания индуктированным переменным напряжением и испытания с измерением интенсивности частичных разрядов.

**A2-318.** C. BECKETT, J. LAI (Австралия). *Application of Conditional Probability in Risk Assessments to optimise Transformer Design, Operation and Maintenance practices (Применение условной вероятности при оценке рисков для оптимизации методов проектирования, эксплуатации и технического обслуживания трансформаторов).*

Рассмотрены вопросы оценки риска выхода из строя трансформаторного оборудования с использованием методологии множественных отказов оборудования. Отмечено, что независимое рассмотрение каждого из трансформаторов одной подстанции приводит к занижению риска повреждения оборудования, поскольку повреждения нескольких единиц оборудования могут быть связанными друг с другом.

**A2-319.** R.K. CHAUHAN, B.N. De BHOWMICK, V K. BHASKAR, S.B.R. RAO, D.R. SHAH, SHALINI, P. SEERVI (Индия). *Development and Implementation of Intelligent Condition Monitoring System for Transformers and Reactors (Разработка и внедрение интеллектуальной системы мониторинга состояния трансформаторов и шунтирующих реакторов).*

Электросетевая компания POWERGRID является крупнейшим в Индии оператором магистральных сетей и эксплуатирует парк с более чем 2800 силовыми трансформаторами и шунтирующими реакторами. Для управления парком трансформаторов и реакторов были разработаны два цифровых продукта – система мониторинга ТОСМС и система поддержки принятия решений по текущей эксплуатации PALMS. Приведены описание этих продуктов, их архитектура и особенности, а также показаны экранные формы этих программных продуктов.

**A2-320.** S. LAOHANAN, S. INRUN (Индия). *Increasing Reliability Tertiary Voltage Side of Power Transformer by Installing Relay Protection (Повышение надежности на стороне третичной обмотки силового автотрансформатора путем установки релейной защиты).*

Описаны случаи перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное короткое замыкание и повреждение оборудования, подключенного к третичным обмоткам автотрансформаторов класса напряжения 230 кВ. Третичные обмотки этих автотрансформаторов имели схему соединения «треугольник», работали в режиме с изолированной нейтралью и использовались для питания собственных нужд подстанции. Для защиты от замыканий на стороне третичной обмотки предложено решение с установкой дополнительных трансформаторов напряжения и релейной защиты от сверхтоков и повышения напряжения.

**A2-321.** R. COX, K. TREVOR, R. KOMMU (США, Великобритания), Y.V. JOSHI, A.J. CHAVDA, R.P. SATANI, H.D. SOLANKI (Индия). *An innovative solution to assess the Reliability of Transformers by Integrated Transformer Health Monitoring (Инновационное решение для оценки надежности трансформаторов с помощью встроенного мониторинга их состояния).*

Представлен опыт применения комплексной системы оценки состояния трансформаторного оборудования, позволяющей выявлять развивающиеся дефекты на ранней стадии путем анализа корреляций между результатами ХАРГ, тепловыми и электрическими параметрами трансформатора и построения соответствующих трендов. Представлен пример применения данной системы на автотрансформаторе мощностью 150 МВА напряжением 220/132 кВ, установленного в 1976 году на подстанции 220 кВ в Индии. Автотрансформатор имел отклонения по ХАРГ (превышения концентраций водорода и ацетилена), при этом имелись ограничения на вывод его из работы. На период работы до замены данный автотрансформатор был оснащен системой мониторинга состояния. В результате работы системы была выявлена корреляция скорости газообразования в масле с положением РПН, а также наличие дугового разряда в баке автотрансформатора как на холостом ходу, так и при нагрузке, которое снижалось с уменьшением напряжения.

**A2-322.** E.G. TENYENHUIS, M.M. LANLOUB (Канада). *Advancements in Transformer Site Dryouts (Достижения в области сушки трансформаторов на месте установки).*

Представлен способ сушки изоляции трансформаторного оборудования с использованием токов низкой частоты. Отмечено, что при нагреве обмоток переменным током возможны большие градиенты температуры вдоль высоты обмоток, в т.ч. из-за добавочных потерь в обмотках, в то время как добавочные потери могут быть снижены при снижении частоты питающего напряжения. Для выравнивания нагрева обмоток по высоте предложено использование токов низкой частоты, получаемых в обмотках путем подачи напряжения низкой частоты от статического преобразователя частоты (СПЧ) на обмотку ВН и закорачивания обмотки НН. Рассматриваемая система сушки трансформатора помимо СПЧ включает также вакуумный насос, установку по обработке масла и контрольную аппаратуру. Представлены примеры сушки на месте установки двух трансформаторов 287/25 кВ мощностью 65 МВА (достигнуто снижение влагосодержания твердой изоляции с 1,8% до 0,5%) и трех генераторных трансформаторов 275 МВА напряжением 500/22,8 кВ (сушка при температуре около 110 °С, достигнуто снижение



влажностности твердой изоляции с 1,6–1,4% до 1,0–0,9%). Также представлены примеры применения системы для сушки активной части после ремонтов с заменой обмоток на месте установки, выполненных на трансформаторе 127,7 МВА напряжением 138/13,8 кВ, автотрансформаторе 340 МВА напряжением 345/138/12,47 кВ, а также преобразовательном трансформаторе 132 МВА напряжением 345/55/55 кВ.

**A2-323.** Т. O'NEILL, J. CARPENTER, Т. NOONAN (Ирландия). *Power Transformer Life Extension Rebuilds (Модернизация для продления срока службы трансформаторов)*.

Рассмотрены вопросы оценки состояния и остаточного срока службы твердой изоляции, а также проведения ремонтов с модернизацией конструкции трансформаторов с целью продления их срока службы. Приведен пример модернизации трансформатора с заменой крышки бака трансформатора и уплотнителей верхнего разъема бака, в котором были использованы 200-тонный мобильный кран и защитная оболочка наружной установки. Представлен пример модернизации трехфазного автотрансформатора 500 МВА класса напряжения 400 кВ с заменой вводов 400 кВ типа «масло-воздух» на «масло-элегаз» для подключения к трансформатору газоизолированной линии. Также приведен пример восстановительного ремонта автотрансформатора 250 МВА 220/110 кВ, изготовленного в 1981 году и установленного в прибрежной зоне. Автотрансформатор имел удовлетворительное состояние внутренних частей, при этом его внешние элементы были сильно повреждены коррозией. Объем ремонта в этом примере включал замену труб и запорной арматуры, установку новых радиаторов, антикоррозионную обработку и покраску, установку новых силовых кабелей по стороне СН, ремонт устройства РПН, восстановления бака расширителя и трубопроводов системы охлаждения, а также установку газоанализатора и системы мониторинга состояния вводов.

### **3. Дискуссионное заседание ИК А2**

Согласно формату проведения сессий СИГРЭ по каждой предпочтительной теме комитетом А2 были утверждены составители «специальных отчетов», которые сделали обобщение принятых к сессии докладов и сформулировали вопросы для дискуссионного обсуждения. Составителями «специальных отчетов» являлись:

ПТ1 – Т. Н. OLESEN (Дания);

ПТ2 – Alvaro PORTILLO (Уругвай);

ПТ3 – J. JAGERS (Южная Африка), Stephan TENBOHLEN (Германия).

Вопросы для дискуссионного обсуждения:

**ПТ1 «Трансформаторные технологии для интеграции распределенных возобновляемых источников энергии»:**

Вопрос 1.1: В связи с проблемами, связанными с интеграцией возобновляемых источников энергии, какие изменения требуются в спецификациях на силовые трансформаторы для обеспечения их надежной работы?

Вопрос 1.2: Какой виды испытаний следует провести, чтобы убедиться в соблюдении особых требований к трансформаторам для возобновляемых источников энергии? Когда испытания невозможны, в какой степени можно/следует полагаться на передовые инструменты моделирования в качестве замены испытаний?

Вопрос 1.3. Каковы наилучшие стратегии объединения сбора данных с аналитическими инструментами для наблюдения и оптимизации работы трансформаторов в приложениях, использующих возобновляемые источники энергии? Какие наиболее

важные данные необходимо собрать, чтобы обеспечить получение необходимых знаний с течением времени?

Вопрос 1.4: Могут ли решения, рассматриваемые в настоящее время для решения проблемы интеграции возобновляемых источников энергии, привести к другим важным проблемам в будущем? Например, может ли подход для компенсации насыщения постоянным током создавать больше гармоник или проблем с шумом?

Вопрос 1.5: Может/должна ли существовать стратегия, позволяющая эффективно координировать решение проблем интеграции возобновляемых источников энергии между передающими и распределительными трансформаторами на системном уровне?

### ***ПТ2 «Достижения в проектировании и испытании изоляции»:***

Вопрос 2.1: Какие испытания могут быть включены в стандарты для проверки способности трансформаторов выдерживать переходные перенапряжения с очень крутыми фронтами (VFTO)?

Вопрос 2.2: Что известно о способности изоляционных материалов, масла и бумаги, противостоять VFTO?

Вопрос 2.3: Каково современное состояние в области моделирования высокочастотных трансформаторов с использованием моделей белого ящика?

Вопрос 2.4: Какие испытания могут быть включены в стандарты, чтобы наилучшим образом учесть соединения выводов трансформаторов в условиях эксплуатации?

Вопрос 2.5: Какие методы наиболее эффективны для локализации частичных разрядов?

Вопрос 2.6: Какой передовой уровень техники контроля состояния вводов с бумажно-масляной изоляцией с использованием метода узкополосной и широкополосной диэлектрической спектроскопии?

### ***ПТ3 «Повышение надежности трансформаторов»:***

*а) Использование новых материалов (например, натуральный эфир):*

Вопрос 3.1: В нескольких статьях показан хороший опыт использования натуральных эфиров. Когда и в каких случаях натуральные эфиры заменят обычное минеральное масло?

Вопрос 3.2: При каких обстоятельствах минеральное масло может быть заменено натуральными эфирами без изменения изоляционной и тепловой конструкции?

*б) Технические характеристики и продление срока службы:*

Вопрос 3.3: Во многих частях мира происходит значительный переход к возобновляемым источникам энергии и электромобилям. Учитывая, что ожидается, что силовой трансформатор прослужит 50 лет или около того, необходимо ли учитывать в спецификации любые изменения нагрузок на трансформатор, которые могут повлиять на его надежность (и, следовательно, должны быть приняты во внимание сейчас)?

Вопрос 3.4: Как можно определить усадку изоляции из-за интенсивной сушки?

Вопрос 3.5: В стандарте IEC 60076-7 в качестве критерия истечения срока службы бумажной изоляции рассматривается снижение механической прочности на растяжение до 25% от начального значения, что примерно соответствует значению степени полимеризации (СП) около 250. При этом, в Японии используют более высокое значение СП=450. Проводилось ли какое-либо обсуждение экономических выгод от вывода трансформатора из эксплуатации раньше, чем СП достигнет значения 200? Можно ли соотнести усилие прессовки обмоток со значением СП?

Вопрос 3.6. Как соотносятся характеристики старения и диагностические данные термостабилизированной бумаги и крафт-бумаги?

*в) Методологии Управления Активами:*

Вопрос 3.7. Каковы минимальные требования к данным (мониторинг состояния, электрические испытания, системные данные и т.д.) для разработки надежного индекса технического состояния парка трансформаторов?

Вопрос 3.8: Как можно преобразовать данные оценки состояния / индекс технического состояния в вероятность отказа трансформатора?

Вопрос 3.9: Какие конкретные правила необходимы для проверки парка и оценки рисков преобразовательных трансформаторов для систем постоянного тока?

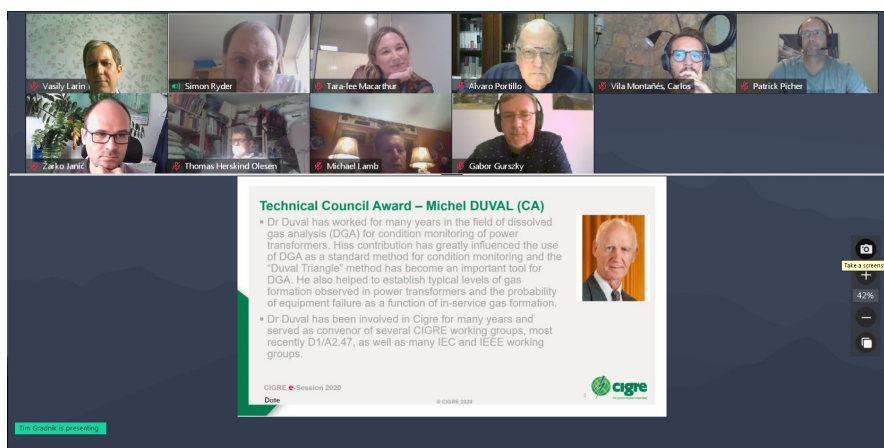
*г) Низкочастотные токи:*

Вопрос 3.10: Авторы были удивлены, обнаружив геомагнитно индуцированные токи (ГМИТ) в Австрии, поскольку считается, что эти низкочастотные токи сосредоточены вокруг областей, близких к полюсам. В связи с этим возникает вопрос: могут ли пострадать также национальные сети в странах, граничащих с Австрией?

Вопрос 3.11: Какие требования должны содержать спецификации, чтобы конструкция трансформатора соответствовала требованиям ГМИТ?

#### 4. Заседание Исследовательского комитета А2

В рамках 48-й сессии СИГРЭ в онлайн формате состоялось закрытое заседание Исследовательского комитета А2 «Силовые трансформаторы и реакторы» (рисунок 4.1). В заседании приняли участие регулярные члены и члены-наблюдатели комитета А2 – представители национальных комитетов стран-участников СИГРЭ, а также гости, присутствие которых было одобрено руководством комитета А2.



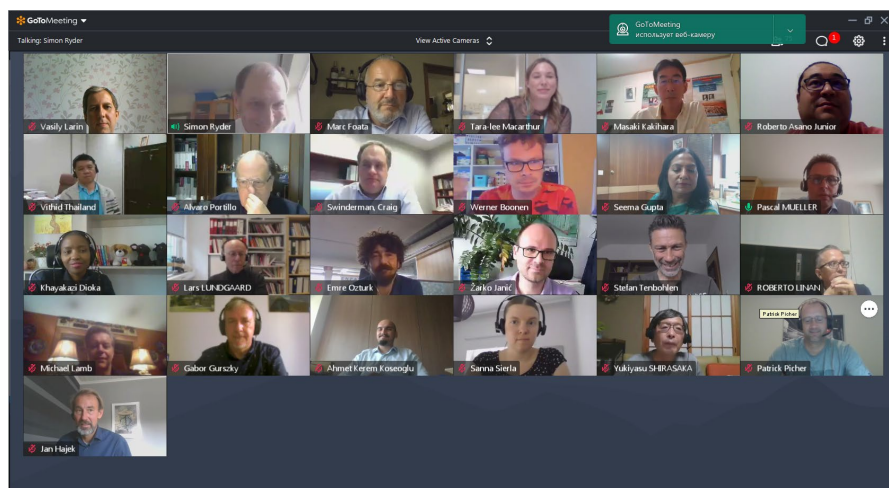


Рисунок 4.1 – Заседание ИК А2 «Трансформаторы»

На закрытом заседании комитета были рассмотрены:

- активность комитета А2 «Трансформаторы» СИГРЭ;
- активность рабочих группы ИК А2 (таблица 5.1);
- планируемые к публикации брошюры рабочих групп;
- предложения по новым рабочим группам;
- сообщения представителей ТК 10 «Изоляционные материалы» и ТК 14 «Силовые трансформаторы» МЭК, IEEE и ИК D1.

Таблица 5.1 – Действующие рабочие группы ИК А2

Название РГ	Срок действия	Председатель	Представители от РФ
JWG A2-D1.51 «Совершенствование методов измерений частичных разрядов для заводских испытаний и испытаний на месте установки силовых трансформаторов»	2014 – 2021	Sebastian Coenen (Германия)	Нет
JWG A2-C4.52 «Высокочастотные модели трансформаторов и реакторов»	2014 – 2021	Bjorn Gustavsen (Норвегия)	Д.А. Матвеев (НИУ МЭИ)
A2.54 «Требования к уровню звука силовых трансформаторов»	2015 – 2021	Christoph Ploetner (Германия)	Нет
A2.55 «Продление срока службы масляных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов»	2016 – 2021	Pascal Mueller (Швейцария)	Нет
A2.56 «Энергоэффективность трансформаторов»	2016 – 2021	Zarko Janic (Германия)	Нет
A2.57 «Влияние подмагничивания постоянным током»	2016 – 2021	Dejan Susa (Норвегия)	Нет
A2.58 «Монтаж и пуско-наладочные работы на трансформаторах и реакторах»	2017 – 2021	Ross Willoughby (Австралия)	Нет
A2.59 «Сборка, капитальный ремонт и испытания силовых трансформаторов на месте установки»	2017 – 2021	Yukiyasu Shirasaka (Япония)	Нет
A2.60 «Динамические тепловые характеристики силовых трансформаторов»	2019 – 2023	Tim GRADNIK (Словения)	Нет

Название РГ	Срок действия	Председатель	Представители от РФ
трансформаторов»			
A2.61 «Передовая практика по устройствам РПН»	2019 – 2022	Axel KRAEMER (Германия)	Нет
A2.62 «Анализ надежности трансформаторов для систем переменного тока»	2019 – 2022	Stefan TENBOHLEN (Германия)	Нет
A2.63 «Импульсные испытания»	2019 – 2023	Ebrahim RAHIMPOUR (Германия)	Д.А. Матвеев (НИУ МЭИ), М.В. Фролов (НИУ МЭИ), В.С. Ларин (ВЭИ – филиал РФЯЦ-ВНИИТФ)
A2.64 Состояние целлюлозной изоляции масляных трансформаторов после заводских испытаний	2019 – 2022	Claes BENGTTSSON (Швеция)	Нет

Сообщено о завершении работы отдельных рабочих групп (РГ), публикации соответствующих статей в журнале *Electra* и технических брошюр (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Публикации рабочих групп ИК А2 в 2019-2020 г.г.

№ брошюры	Год публикации	Название	Рабочая группа
755	2019	Надежность вводов	A2.43 «Надежность трансформаторных вводов»
761	2019	Оценка состояния трансформаторов	A2.49 «Оценка состояния»
771	2019	Достижения в интерпретации ХАРГ	D1/A2.47 «Достижения в интерпретации ХАРГ»
779	2019	Практический опыт применения маркеров старения трансформаторов	A2-D1.46 «Практический опыт применения маркеров старения трансформаторов»
783	2019	Системы мониторинга растворенных газов	D1/A2.47 «Достижения в интерпретации ХАРГ»
812	2020	Достижения в интерпретации измерений частотных характеристик силовых трансформаторов (FRA)	A2.53 «Достижения в интерпретации измерений частотных характеристик силовых трансформаторов»

#### **Сообщение о 49-й сессии СИГРЭ в 2022 году**

Очередная 48-я сессия СИГРЭ запланирована на период 28 августа – 2 сентября 2022 года в г. Париж, Франция.

Официальный сайт: <https://www.cigre.org/GB/events/cigre-session-2022>

Основные сроки:

- представление тезисов в центральный офис – до 28.06.2021;
- подтверждение участия – до 24.09.2021;
- представление полных докладов в центральный офис – до 24.01.2022.

Сообщено о следующих предварительных предпочтительных темах:

***ПТ1 – Опыт и новые требования к трансформаторам для возобновляемых источников энергии:***

- опыт эксплуатации: проблемы, обслуживание, оценка состояния, мониторинг, уровень повреждаемости, срок службы, обобщение полученного практического опыта;
- проектирование, испытания, изоляция, мониторинг, обслуживание повышающих трансформаторов, трансформаторов собственных нужд и преобразовательных трансформаторов;
- проектирование и эксплуатационные требования для будущих применений: ветро- и солнечные электростанции.

***ПТ2 – Альтернатива масляным трансформаторам и реакторам***

- альтернативные технологии для повышения безопасности и экологических показателей: газонаполненные, заполненные эфиром, сухие и твердотельные трансформаторы;
- опыт эксплуатации трансформаторов с использованием этих новых технологий;
- преимущества и ограничения, влияние на технические характеристики, применение при высоких температурах, бизнес-кейсы.

***ПТ3 – Передовой опыт в области закупок трансформаторов и реакторов:***

- сбор информации о опыте пользователей: квалификация на заводе, анализа конструкции, внедрение новых технических требований, очная приемка испытаний и виртуальное наблюдение;
- контроль качества и испытания: производственные контрольные точки, квалификация субпоставщиков, срок действия типовых испытаний, усовершенствования стандартов, специальные испытания, испытание на стойкость при коротком замыкании, измерение степени полимеризации на бумаге;
- устранение несоответствий, обеспечение работоспособности, гарантия.

## Заключение

1. По итогам 48-й сессии по комитету А2 СИГРЭ можно отметить следующие наиболее обсуждаемые ключевые вопросы:

- повышение надежности трансформаторного оборудования;
- применение новых видов трансформаторного оборудования;
- применение новых материалов и технологий для повышения экологичности, взрыво- и пожаробезопасности, энергоэффективности.

2. В части повышения надежности трансформаторного оборудования следует отметить имеющийся интерес к следующим вопросам:

- развитие методов количественной оценки технического состояния, оценки рисков повреждения и ранжирования парка трансформаторного оборудования;

- развитие систем мониторинга и методов диагностики трансформаторного оборудования и его компонентов;

- развитие техники и оборудования для капитального ремонта и модернизации силовых трансформаторов на месте установки;

- применение ВЧ-моделей и измерений для подтверждения стойкости трансформаторов к высокочастотным перенапряжениям (очень быстрым перенапряжениям, резонансным перенапряжениям);

- развитие технических требований на трансформаторное оборудование.

3. В части применения новых видов трансформаторного оборудования следует отметить имеющийся интерес к следующим вопросам:

- трансформаторы для схем выдачи мощности возобновляемых источников энергии (ВЭС, СЭС).

4. В части применения новых материалов и технологий для повышения экологичности, взрыво- и пожаробезопасности, энергоэффективности следует отметить имеющийся интерес к следующим вопросам:

- применение альтернативных трансформаторному маслу жидких диэлектриков (натуральных и синтетических эфиров) для повышения экологичности, взрыво- и пожаробезопасности;

- расширение применения сухих трансформаторов.