



Некоммерческое партнерство «Российский национальный комитет Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения» (РНК СИГРЭ)
109074, Россия, г. Москва, Китайгородский проезд, дом 7, стр.3. ОГРН 1037704033817. ИНН 7704266666 / КПП 770401001. Тел.: +7 (495) 627-85-70. E-mail: cigre@cigre.ru

ОТЧЕТ

Об участии в 5-ом Международном Коллоквиуме СИГРЭ «Научные подходы в области исследования трансформаторов и управление активами».

Опатия, Хорватия 09-12 октября 2019 г.



Отчет подготовил:

Славинский Александр Зиновьевич
д.т.н., Представитель РНК СИГРЭ в
Исследовательском Комитете D1,
Руководитель НИК D1 РНК СИГРЭ
«Материалы и разработка новых методов
испытаний и средств диагностики»
Генеральный директор ООО «Завод «Изолятор»

Контактные данные:

E-mail alexander.slavinskiy@mail.ru

Дата составления отчета:

октябрь 2019 г.

Москва 2019

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Обзор докладов	4
3. Техническая выставка	34
4. Заключение	34

1. Введение

С 09 по 12 октября 2019 года в г. Опатия (Хорватия) прошел 5-ый Международный Коллоквиум СИГРЭ «Научные подходы в области исследования трансформаторов и управление активами».

Организатор Коллоквиума - Национальный комитет СИГРЭ Хорватии совместно с Исследовательским комитетом A2 CIGRE «Силовые трансформаторы и реакторы», с факультетом электротехники и вычислительной техники г. Загреб и Центром повышения квалификации по исследованиям в области трансформаторов.

Коллоквиум объединил инженеров, руководителей, ученых, и других заинтересованных лиц в области силовых, специальных, распределительных и измерительных трансформаторов.

Международный Коллоквиум - прекрасная возможность для обмена знаниями и опытом с большим количеством отраслевых экспертов со всего мира, возможность принять участие в обучающих программах, ознакомиться с результатами новейших исследований, определить направления сотрудничества, а также посетить выставку оборудования и технологий.

Российскую делегацию на Коллоквиуме представляли: компания «Изолятор», зам. директора по качеству, координатор НИК D1 В.Н. Устинов, секретарь НИК D1 Г.С. Устинова, ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС», Л.А. Дарьян, д.т.н., директор по научно-техническому сопровождению, ОАО «Инспекция по контролю за техническим состоянием объекта электроэнергетики» П.В. Голубев, генеральный директор, А.М. Осипов, главный эксперт, ОАО «РЭТЗ Энергия» Д.А. Матвеев, зам. генерального директора по науке. К результатам изысканий российских ученых проявило интерес множество участников и гостей постер-сессии.

Специалисты приняли активное участие в дискуссиях по вопросам научных исследований и практического опыта эксплуатации трансформаторов.

Делегация от России также обменялась информационными материалами с участниками выставки, проводимой в рамках коллоквиума.

Официальная церемония открытия коллоквиума началась с приветственного слова Председателя Хорватского национального комитета СИГРЭ Miroslav Poljak, PhD.

Далее участникам Коллоквиума представлены 3 обучающие программы (Tutorials):

- 1) «Анализ эксплуатации трансформаторов», Андрей Фиелдсон;
- 2) «Измерение влажности в изоляционных жидкостях и изоляции трансформаторов- оценка твердотельных датчиков и химических методов», Иванка Анастасова;
- 3) «Оценка состояния силовых трансформаторов», Бриан Спарлинг.

На Коллоквиуме было представлено 54 доклада из 16 стран мира (Хорватии, России, Франции, Португалии, Швеции, Польши, Швейцарии, Германии, США, Канады, Словении, Австралии, Австрии, Болгарии, Нидерландов).

Предпочтительные темы докладов:

1) Материалы, комплектующие и новые технологии (17 докладов)

- изоляционные материалы
- электромагнитный материал и шумовые характеристики трансформатора
- компоненты трансформатора
- цифровизация и интеллектуальные сети
- новые технологии в трансформаторах и др.

2) Численное моделирование (19 докладов)

- электромагнитное поле
- переходные процессы
- численное моделирование в конструировании и др.

3) Трансформатор и срок службы (18 докладов)

- диагностика, мониторинг и отказы
- устойчивость
- управление активами, опыт работы и т. д.

Обзор докладов, представленных по тематике Коллоквиума

Предпочтительная тема 1

Материалы, комплектующие и новые технологии (17 докладов)

1) Further Creepage Discharge Investigations under Switching Impulse with Biodegradable Ester-Based Liquids *(Дальнейшие исследования пути утечки при воздействии коммутационного импульса биоразлагаемых жидкостей на основе сложных эфиров)* Mark Lashbrook, Russell Martin and Attila Gyore, Великобритания

В докладе представлено исследование, предназначенное для оценки характеристик пути утечки жидкости сложного эфира при стандартном коммутационном импульсе (250/2500 мкс), поскольку оно применимо в качестве рутинного испытания в стандартах для трансформаторов, работающих при напряжениях выше 170 кВ, и в качестве специального испытания выше 72,5 кВ. Представленные в докладе результаты исследований показали, что существует очень небольшая разница в напряжении пробоя между минеральным маслом и различными жидкостями на основе сложных эфиров.

2) Synthetic Ester Impact on Power Transformer Design, Manufacturing and Testing *(Влияние синтетического сложного эфира на проектирование, изготовление и испытания силовых трансформаторов)* Dario Šegović, Ana Orešković, doc.dr.sc. Žarko Janić, Хорватия

В докладе описывается влияние синтетического эфира, используемого в качестве изолирующей жидкости, на электрическую и тепловую конструкцию силового трансформатора, проблемы совместимости материалов и различия в процессе производства. Кроме того, подчеркивается более высокая пожаробезопасность и способность к биологическому разложению синтетических сложных эфиров.

Силовые трансформаторы, наполненные эфиром, по сравнению с аналогичными силовыми трансформаторами, наполненными минеральным маслом, являются более дорогим оборудованием. Более высокая цена является результатом различий в системах изоляции и охлаждения из-за более высоких коммерческих цен на сложные эфиры, чем у трансформаторных минеральных масел, и более продолжительного времени их производства. Эту более высокую цену за оборудование можно легко компенсировать за счет меньшей площади, необходимой для установки силового трансформатора, и снижения требований пожарной безопасности. Биоразлагаемость эфира также является важной особенностью, превращающей силовой трансформатор в «зеленый» и экологически чистый элемент оборудования.

Авторы представили результаты испытаний на опытном трансформаторе, который можно было испытать до пробоя и это оказалось не только очень важным для проверки проектных ограничений, но также и для выявления несовместимого материала, применяемого в трансформаторе, и критических точек в процессе производства.

3) Applications and Recent Studies on Aramid Enhanced Cellulose Paper (*Применение и последние исследования целлюлозной бумаги с улучшенной арамидной структурой*)
Richard P. Marek, Radosław Szewczyk, Польша

В статье представлены результаты исследований по применению целлюлозной бумаги с улучшенной арамидной структурой в качестве новой изоляции в распределительных трансформаторах. Эта смешанная изоляция, известная как Nomex® 910, представляет собой целлюлозную структуру с улучшенной арамидной структурой, которая обеспечивает температуру наиболее нагретой точки обмотки 120 °С в минеральном масле и температуру наиболее нагретой точки обмотки 130 °С в некоторых природных эфирах. Используемая при обычных температурах, типичных для целлюлозной бумаги, новая изоляция предлагает увеличенный срок службы и пониженную чувствительность к высоким температурам окружающей среды.

4) Consequences of Rubber Incompatibility with Transformer Oil (*Последствия несовместимости резины с трансформаторным маслом*)
Veronika Haramija, Božena Musulin, Dijana Vrsaljko, Vedran Đurina, Хорватия

Качество и срок службы электрооборудования во многом зависят от качества и долговечности используемых материалов. Поэтому подбор материалов имеет решающее значение для надежной работы. Однако недостаточно проводить только контроль качества поставляемого материала. Испытания на совместимость имеют решающее значение для долгосрочной надежности материалов в условиях эксплуатации.

В случае эластомеров существуют многочисленные вариации состава, и прежде, чем выбирать один, следует рассмотреть все аспекты его использования. В этой работе представлены многочисленные проблемы совместимости: образование осадка, значительное химическое загрязнение без визуальных индикаторов, коррозионная активность масла из-за извлечения серы из резины, набухание резины и снижение твердости резины.

Это лишь некоторые из проблем, которые могут возникнуть из-за несовместимости материалов. Настоятельно рекомендуется регулярно проверять материалы перед их использованием согласно соответствующим международным стандартам.

5) Energy Efficient Transformer with 3D Wound Core Technology (*Энергоэффективный трансформатор с 3D технологией*) *M. F. M. Rozi, A. Saadin, Z. A. Bakar, I. Hashim, Малайзия*

В докладе представлено исследование использования трехмерного сердечника трансформатора в электрической распределительной сети в качестве альтернативы для повышения эффективности трансформатора, а также эффективности использования энергии. Представлено сравнение между обычными набранными сердечниками распределительных трансформаторов с трехмерным набранным сердечником.

В отличие от обычного набранного сердечника, где снижение потерь достигается за счет использования дополнительных материалов, технология трехмерного набранного сердечника позволила снизить потери и снизить использование сырья на одном трансформаторе.

Сокращение потерь также помогает уменьшить выброс CO₂. Эти особенности делают трансформаторы с сердечником с трехмерным набором классифицируемыми как экологически чистые продукты. Развитие современных технологий производства сделало разработку и серийное производство энергоэффективных распределительных трансформаторов на основе 3D-технологии более привлекательным предложением.

6)The Use of Mobile Power Transformer 15 MVA 33/11 kV to Improve Network Reliability and Availability (*Использование мобильного силового трансформатора 15 MBA 33/11 кВ для повышения надежности и доступности сети*) М. F. M. Rozi, A. Saadin, I. Hashim, Z.A.Bakar, Малайзия

Многие коммунальные предприятия в мире использовали мобильные силовые трансформаторы для обеспечения доступности и надежности поставок для таких целей, как плановое обслуживание, принудительное отключение в случае ремонта трансформатора, восстановление питания из-за отказа трансформатора и временное питание в ожидании завершения ремонта подстанции. Мобильный силовой трансформатор является одной из новейших технологий, введенных для обеспечения бесперебойной подачи энергии потребителям. В докладе обсуждаются критерии проектирования мобильных силовых трансформаторов для обеспечения гибкости и надежности во время его эксплуатации, а также рекомендации по работе с ним. Одним из основных компонентов мобильной подстанции является мобильный силовой трансформатор. Это новая технология, представленная в качестве дополнения к первичной коммутационной станции (SSU) при формировании полной подстанции. Мобильные силовые трансформаторы будут полностью оснащены первичным двигателем для возможности бесперебойной работы. Это гарантирует, что блок питания может быть восстановлен в короткие сроки. Обзор мобильного силового трансформатора показан на рисунке 1.



Рис. 1 Обзор мобильного силового трансформатора

- (1) Силовой трансформатор 15 MBA 33/11 кВ Dyn11
- (2) Вспомогательный трансформатор 100 кВА 11 / 0,433 кВ Dyn11
- (3) Сопротивление заземления нейтрали (NER)
- (4) Панель дистанционного управления устройством РПН (RTCC)

На принципиальной схеме ниже показано, как мобильный силовой трансформатор подключен к первичной коммутационной станции, которая расположена на подстанции.

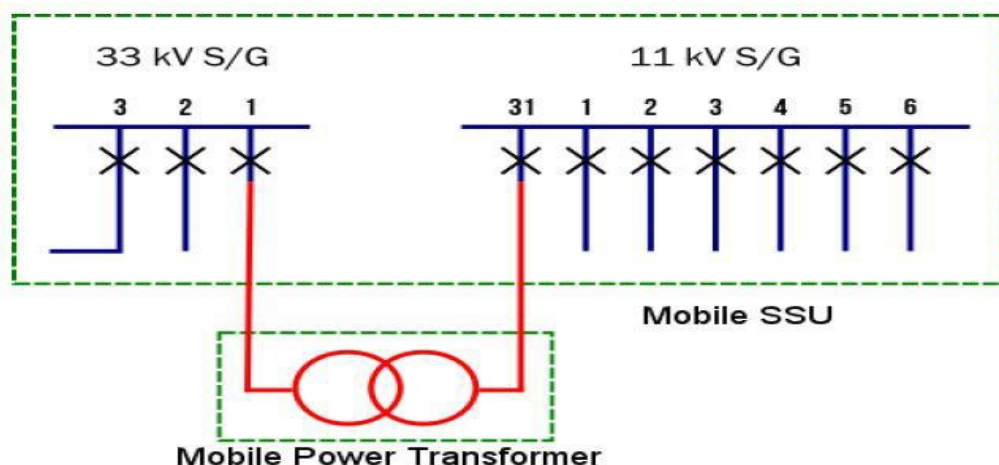


Рис. 2: Принципиальная схема мобильного силового трансформатора

7)Power Voltage Transformers: Applications in Transmission Utilities (Силовые трансформаторы напряжения: Применение в передающих устройствах) Vijitha Kulatilake P.Eng., Colin Clark P.Eng., Канада.

Силовые трансформаторы напряжения (PVT) - это специально разработанные трансформаторы напряжения, которые можно подключать к высоковольтным линиям или шинам для передачи электропитания при более низких напряжениях от 120 В до 600 В.

В докладе представлены результаты по сравнительному исследованию, проведенному на подстанции, где в качестве основного источника доступен источник распределения низкого напряжения, но для повышения надежности обслуживания станции необходим второй независимый источник питания. Исследование подтвердило, что PVT, подключенный к шине, является наиболее эффективным и экономичным решением. Эти устройства устанавливаются для обеспечения низковольтных источников питания от высоковольтной коммутационной станции с доступными уровнями напряжения 138 кВ или 240 кВ.

Кроме того, PVT полезны для обеспечения небольших источников питания при низких напряжениях, когда распределительные системы недоступны, а высоковольтные линии электропередачи находятся вблизи нагрузки.

Пример подключения силового трансформатора напряжения шинам линии электропередачи представлен на рис. 3 а) и б).



а)



б)

рис.3 а) три PVT 50 кВА подключены к работе шины 138 кВ

б) PVT 25 кВА, подключенный к линии электропередачи 69 кВ

8) Internal arc withstand test for transformers HV graded bushings (*Испытание на стойкость к короткому замыканию для трансформаторных высоковольтных вводов*) *M. Ryadi, L. Paulhiac, Франция*

Целью данной работы является описание опыта, который привел к разработке спецификации по испытаниям на стойкость к короткому замыканию для трансформаторных вводов. В докладе представлены обсуждения дефекта, характеристики испытаний (длительность и амплитуда дуги с учетом класса напряжения вводов), а также основные наблюдения и извлеченные уроки, ущерб, нанесенный окружающим объектам. Возгорание, вызванное отказом ввода из-за повреждения между фланцем ввода и баком представлено на рис.4.



Рис. 4

Доступность и надежность трансформаторов является ключевым элементом для мощных электростанций и / или распределительных станций, где любой сбой может оказать значительное экономическое влияние не только из-за затрат на замену, но также из-за производственных потерь, вызванных незапланированными отключениями.

Международные исследования ясно показывают, что отказ проходного изолятора является одной из основных причин (от 18% до 20%) отказа трансформатора и составляет 40% воспламенения (особенно для вводов масла - воздух). В большинстве случаев причиной пожара является потеря целостности фланца проходного изолятора, что дает возможность выходу масла из трансформатора. Испытанные вводы предварительно подвергаются рутинным испытаниям, проводимым на заводе изготовителе.

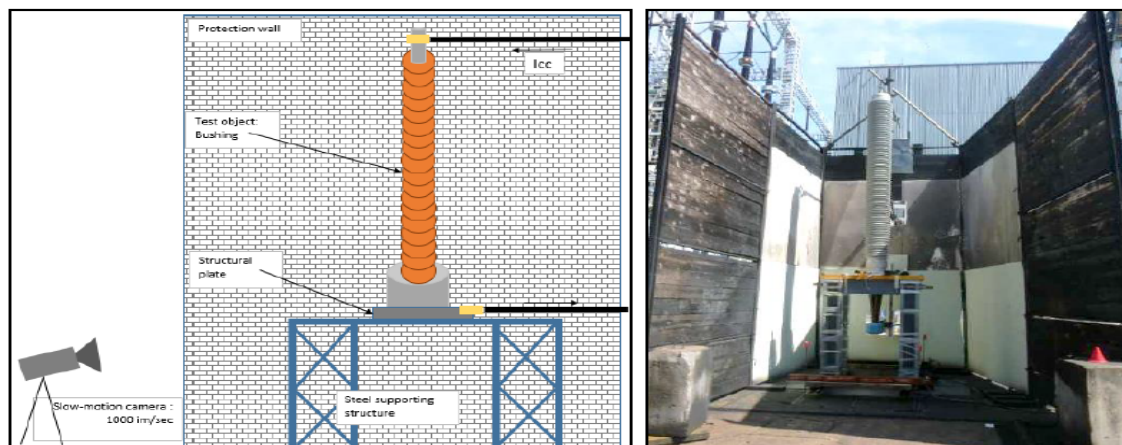


Рис. 5 Испытательная установка для испытаний на к.з.

Ввод монтируется на конструкционной плите (имитирующей интерфейс с крышкой бака) с учетом диэлектрических расстояний воздуха. Опорная конструкция изолируется от земли и затем зажимается, как показано на рис. 5. Вся установка заключена в защитные стены, расположенные так, чтобы ограничить на земле круг диаметром около трех метров вокруг вертикальной оси.

Гибкие соединения используются, чтобы гарантировать, что соединение источника питания не оказывает механического воздействия, которое может ослабить проходной изолятор (особенно изолятор и фланец).

Тестируемая область снимается быстрой камерой с открытой диафрагмой для распознавания событий вне помещения (замедленная съемка) и видеокамерой. Быстрая камера автоматически активируется при текущей настройке.

Существующие стандарты охватывают множество аспектов квалификации проходного изолятора: термический, диэлектрический, механический и др.

Принимая во внимание различные воздействия (финансовые потери, сопутствующие убытки, безопасность и пожар) от отказа ввода, EDF¹ в сотрудничестве с некоторыми из основных поставщиков вводов определила специальный, но простой тест для проверки поведения ввода, подвергаемой воздействию к.з.

Основные параметры (текущая амплитуда и форма, продолжительность и т. д.) и критерии оценки. Испытание устанавливает достижимые критерии, которые могут пройти не все вводы, что явно означает, что некоторые конструкции лучше подходят для других, касающихся способности проходного изолятора обеспечивать внутреннее короткое замыкание. Наконец, стоит отметить, что:

- из-за высокой летучести масла, которое заполняет ввод OIP, эту технологию невозможно проверить;
- независимо от технологии, внешний изолятор должен быть композитным (фарфор слишком хрупкий, чтобы выдерживать любое повышение давления)

На рис.6 представлено разрушение при испытании на к.з. ввода сухого типа. Наблюдение за испытаниями и критерии, которые должны быть выполнены, не позволяют маслonaполненному вводу успешно пройти все испытания. Что касается некоторых сухих изоляционных вводов, следует учитывать свойства материала, используемого при изготовлении проходных изоляторов, чтобы уменьшить риск возникновения пожара.



Рис. 6: Испытание на к.з. на вводе сухого типа

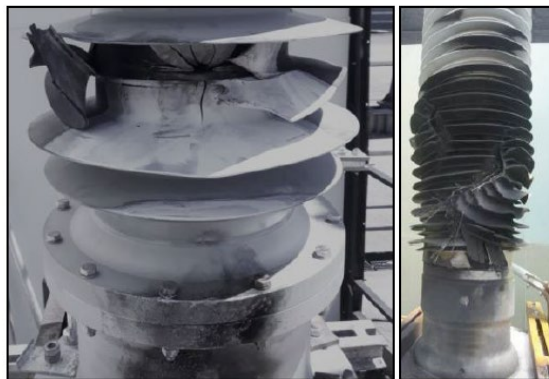


Рис. 7: Наружные повреждения на вводе

9) Difference between 50 Hz and 60 Hz transformer no-load noise levels (*Разница между уровнями шума холостого хода трансформатора 50 Гц и 60 Гц*) М. Pirnat, Словения

¹ EDF - крупнейшая государственная энерго-генерирующая компания Франции

Необъяснимая разница между уровнями шума трансформаторов частоты 50 и 60 Гц была представлена в предыдущей опубликованной работе рабочей группы CIGRE A2.54 под названием «Уровни звуковой мощности без нагрузки для целей спецификации, полученные из более чем 1000 измерений – типичный пример для трехфазных трансформаторов». Цель этой статьи - дать дополнительное объяснение этому явлению на основе предсказуемых и непредсказуемых эффектов, которые являются источником наблюдаемой разницы в шуме без нагрузки между трансформаторами частоты 50 и 60 Гц.

Теоретически было установлено, что разница, обусловленная предсказуемыми эффектами, находится в диапазоне 3,6-4 дБА. Этот диапазон был подтвержден средним числом нестандартных измерений шума от нескольких производителей. Остальная часть различий объясняется рядом непредсказуемых эффектов, которые невозможно измерить количественно из-за их сложности. Изменения в эффективности излучения из-за различных проектных требований и особенностей рассматриваются как основные причины оставшейся части наблюдаемой разницы уровней шума между трансформаторами 50 Гц и 60 Гц. В этой области требуется больше исследований.

10) Reproducibility estimation of sound power level of large power transformers (*Оценка воспроизводимости уровня звуковой мощности крупных силовых трансформаторов*)
Zdenko Godec, Filip Razum, Davor Švarc, Хорватия

Уровень звуковой мощности является уникальной характеристикой больших силовых трансформаторов, используемых для оценки влияния шума на окружающую среду. Он определяется по прямому измерению уровня звукового давления или уровня интенсивности звука. В докладе приводятся методы оценки воспроизводимости уровня звуковой мощности и процедуры оценки неопределенности уровня звукового давления и уровня интенсивности звука измеренные в точках вокруг трансформатора.

Методы определения уровней звуковой мощности путем измерения уровней звукового давления или уровней интенсивности звука, описанные в соответствующем стандарте обычно обеспечивают стандартное отклонение воспроизводимости, равное или меньшее 3 дБ.

Реалистичная оценка стандартного отклонения воспроизводимости уровня звуковой мощности крупных силовых трансформаторов составляет приблизительно 1 дБ.

Во избежание недоразумений между производителем и покупателем необходимо определить правило принятия решения о соответствии, а также метод определения уровня звуковой мощности на основе измерения звукового давления или интенсивности звука.

11) Power Transformer Automatic Cooling System Using PLC (*Автоматическая система охлаждения силового трансформатора с использованием программируемого логического контроллера*) Tatjana Šimović, Miro Krilčić, Vedran Bogati, Krešo Bilušić, Хорватия

Целью данной работы является демонстрация процесса разработки принципиальной схемы управления охлаждением и программирования соответствующего промышленного программируемого логического контроллера (PLC). Внедрение устройства PLC в автоматическом режиме управления охлаждением позволит изменять группы охлаждения в рабочем режиме в соответствии с интервалом по умолчанию, установленным в программируемом логическом контроллере. Дополнительным преимуществом использования PLC - возможность изменять процесс без изменения каких-либо проводов или устройств.

12) Stressed Oil Volume Theory in Transformer Winding Corner Stress Analysis (*Теория напряженного объема масла в экспериментальных исследованиях*)

Petar Gabrić, Ana Orešković, Vjenceslav Kuprešanin, Antun Mikulecky, Vladimir Podobnik, Хорватия

В докладе показано, как теория SOV² может быть использована для анализа влияния радиальной составляющей электрического поля на осевой масляный зазор при воздействии импульсного напряжения, что является важным шагом в разработке критериев проектирования при воздействии комбинированных напряжений.

13) Relative permittivity assessment of oil-impregnated cellulose insulation (*Оценка относительной диэлектрической проницаемости бумажной изоляции, пропитанной маслом*) *Mladen Marković, Marijana Majić Renjo, Хорватия*

Изоляционная система силового трансформатора состоит из изолирующей жидкости (минеральное масло или эфирная жидкость) и на основе целлюлозных материалов (бумага и картон). Комбинация жидкой и твердой изоляции позволяет превращать изоляционную жидкость в пористый целлюлозный материал. Этот новый вид пропитанного маслом материала имеет более высокое значение относительной диэлектрической проницаемости, чем просто целлюлозный материал. Диэлектрические свойства изоляционного материала могут быть выражены через диэлектрическую проницаемость и проводимость материала. Проводимость материала влияет на электрические поля в силовых трансформаторах, подверженных воздействию постоянного тока, напряжения (например, трансформаторы HVDC³), тогда как относительная диэлектрическая проницаемость более актуальна в силовых трансформаторах, подвергаемых воздействию частоты (50 или 60 Гц).

В докладе приведены примеры измерения относительной диэлектрической проницаемости бумажной изоляции для двух образцов материала на основе целлюлозы: материал, используемый в настоящее время в ф. КОНЧАР («материал К»), а именно крафт-бумага, склеенная поли- (виниловым) спиртовым клеем и прессшпан типа В.4.1 в соответствии с ИЕС 60641-3-1 («материал S»). Оба материала были испытаны в двух условиях: высушены и не пропитаны, высушены и пропитаны минеральным маслом.

Измеренные значения образцов соответствуют аналитически рассчитанным значениям (пропитанных и непропитанных), что означает, что аналитический подход может быть использован для будущей оценки относительной диэлектрической проницаемости разных видов целлюлозных материалов и изоляционных жидкостей.

14) CO₂ footprint for distribution oil immersed transformers according to ISO 14067:2018 (*CO₂ - для распределительных масляных трансформаторов в соответствии с ISO 14067:2018*) *Vlatka Šerkinić, Marijana Majić Renjo and Viktor Ucović Хорватия*

В последние несколько десятилетий изменение климата и глобальное потепление стали важными экологическими проблемами. Причиной глобального потепления является увеличение выбросов парниковых газов (ПГ). Существует несколько парниковых газов, ответственных за глобальное потепление: водяной пар, диоксид углерода (CO₂), метан, оксиды азота, хлорфторуглероды и другие. Они в основном являются результатом сжигания ископаемого топлива в автомобилях, зданиях, на заводах и электростанциях. Газ, ответственный за большую часть глобального потепления, является углекислым газом (CO₂). Это увеличение выбросов парниковых газов приводит к большей заинтересованности потребителей, руководства и заинтересованных сторон в воздействии

² SOV- напряженный объем масла

³ HVDC- система постоянного тока высокого напряжения

их деятельности, продуктов и услуг на окружающую среду. Проверка углеродного следа распределительного масляного трансформатора, представленного в этом документе, была признана компанией как возможность понять свое собственное воздействие на окружающую среду.

15) Innovative solutions for flammable gases indication from Buchholz relay
(Инновационные решения для индикации горючих газов от реле Бухгольца)
Л.А. Дарьян, П.В. Голубев, А.М. Осипов, А.А. Арутюнян, Россия

Дан обзор практического применения диагностических приборов в связи с срабатыванием газо-защиты. В статье представлено обоснование разработки и применения специализированных приборов для индикации горючих газов в реле Бухгольца силовых трансформаторов. Описаны принципы проектирования и технические требования к устройствам. Приведены основные технические характеристики разработанных устройств. Предложены перспективы развития этой области исследований.

16) Uncertainty estimation of low voltage LI measurements with recurrent surge generator and oscilloscope (Оценка неопределенности измерений низкого напряжения грозового импульса с помощью генератора периодических импульсов и осциллографа)
Zdenko Godec, Vjenceslav Kuprešanin, Filip Razum, Хорватия

Измерение LI (грозового импульса) низкого напряжения с помощью генератора периодических импульсов и осциллографа - это метод, используемый для исследования распределения LI в обмотках трансформатора или в прототипах моделей для различных условий. В статье приведена процедура оценки погрешности измерения характеристических величин напряжения и времени. Процедура аналогична процедуре, описанной в стандарте МЭК 60076-2 для испытаний высоким напряжением, но она полностью адаптирована для измерения низкого напряжения с помощью генератора периодических импульсов и осциллографа. В целях уменьшения неопределенности измерения и времени измерения предлагается новая процедура.

Новая процедура уменьшает как погрешности измерений, так и время, необходимое для выполнения измерений. Новое программное обеспечение для сбора данных и анализа грозовых импульсов разработано на языке программирования National Instruments™ Labview. Все результаты измерений были получены с помощью этого приложения. Хотя процедура определения параметров импульсного напряжения в основном введена для импульсных испытаний высокого напряжения, разумно применять тот же алгоритм для измерений низкого напряжения, что делает его лучшим средством моделирования и прогнозирования.

17) High-voltage bushings with RIN (RIS) insulation Research, Testing, Prospects

Высоковольтные вводы с изоляцией RIN (RIS) Исследования, испытания, перспективы
Ю. Никитин, В. Устинов, Россия

В статье рассматриваются виды внутренней изоляции высоковольтных вводов и их отличия. Технология изготовления RIN – изоляции, испытания и перспективы применения RIN-изоляции.

Предпочтительная тема 2 **Численное моделирование (19 докладов)**

1) On Site Measurement and Simulation of Transferred Lightning Overvoltages Through Power Transformers (*Измерение и моделирование грозовых перенапряжений в силовых трансформаторах*) B. Jurišić, T. Župan, G. Plišić, B. Filipović-Grčić, G. Levačić (Хорватия), Xemard (Франция)

Высоковольтные электрические устройства, такие как силовые трансформаторы, часто испытывают перенапряжения, возникающие во время переключения и атмосферных разрядов. Следовательно, особый интерес представляет мониторинг этих событий в сети электропитания. В настоящее время силовые трансформаторы могут быть оснащены регистраторами переходных процессов, которые измеряют напряжения на измерительных отводах проходного изолятора. В EMTP⁴ можно моделировать события, записанные этими регистраторами.

В статье представлены три модели широкополосных трансформаторов: черный ящик, серый ящик и белый ящик. На моделях проверены измерения переданного перенапряжения в лаборатории высокого напряжения. Затем представлены результаты моделирования переходного процесса, записанного на подстанции 220/110 кВ, и сравниваются с результатами измерений в лаборатории. Перенапряжения, а также напряжения могут быть измерены на измерительном отводе соответствующего вводного трансформатора с помощью системы управления TMS⁵. Соединение с измерительным отводом, показанным на рисунке 8 (а), осуществляется с помощью специально разработанного адаптера. в то время как связь между адаптером и схемой согласования импедансом осуществляется с помощью коаксиального кабеля. Встроенная карта сбора данных достаточно быстрая с временным разрешением 0,5 мкс, что достаточно для переходных процессов, содержащих частотные составляющие ниже 1 МГц. Количество знаков, записанных за событие, составляет 60000, что приводит к общей время записи 30 мс на событие (оборудование начинает запись за 0,3 мс до запуска).

Возникающие перенапряжения, необходимо постоянно измерять, чтобы обнаруживать изменения емкости ввода (C , $\tan\delta$).



рис. 8. (а) Подключение к измерительному выводу; (б) Система контроля переходного перенапряжения, установленная на шунтирующем реакторе мощностью 100 МВА

⁴ EMTP (Electromagnetic Transients Program - программа электромагнитных переходных процессов)

⁵ TSM Transformer monitoring system- система контроля трансформатора

2) Calculation of Circuit Parameters of High Frequency Models for Power Transformers using FEM (finite element method) (*Расчет параметров высокочастотных моделей силовых трансформаторов методом конечных элементов*) *Álvaro Portillo, Luiz Fernando de Oliveira Federico Portillo, Бразилия*

Для изучения переходного взаимодействия между трансформаторами и энергосистемой необходимо использовать точные модели трансформаторов, учитывающие зависимость затухания от частоты. В этой работе рассматриваются основы расчета параметров трансформатора для высокочастотных переходных процессов методом конечных элементов (FEM), и предлагается метод эквивалентного преобразования схемы на основе анализа результатов измерений переходных процессов, полученных CIGRE JWG A2 / C4.52 в двух трансформаторах производства WEG⁶ в Мексике.

3) Small Signal Internal Voltage Transfer Measurements and White-Box Transient Calculations for Non-Standard Test Conditions of a Shell-Form Power Transformer (*Измерения при низком напряжении сигнала и расчеты переходного процесса для нестандартных условий испытаний силового трансформатора на макете*) *Bjørn Gustavsen, Ariana Martins, Carlos A. Sá, Luis Braña, Ricardo Castro Lopes, Pedro Lima, Andrea Soto, and Mário Soares, Португалия*

Исследовательские испытания проводились на модели автотрансформатора по более строгой методике импульсных испытаний, чем традиционный метод осциллографа с периодическим откликом. Отклики испытательного напряжения были получены с использованием измерений развертки частоты передачи напряжения, которые были преобразованы в формы волны во временной области. Результаты измерений сравнивались с результатами моделирования, демонстрируя удовлетворительную точность расчета переходных процессов.

4) Internal fault performance of instrument transformers with sectioned active part (*Характеристика внутренних повреждений измерительных трансформаторов с секционной активной частью*). *Igor Žiger, Danije, Krajtner, Boris Bojanić, Хорватия*

В данной статье представлены теоретические основы характеристик внутренних повреждений измерительных трансформаторов с секционной активной частью.

Основные теоретические соображения подтверждаются численными расчетами, выполненными для классов напряжения от 72,5 до 550 кВ. Численный подход был подтвержден несколькими испытаниями, выполненными на индуктивном трансформаторе напряжения 123 кВ. Корреляция результатов была очень хорошей, что делает численное моделирование основанием для оценки критических мест повреждения и ожидаемого поведения трансформатора в указанных условиях.

Результаты, представленные в этом докладе, будут использованы в качестве основы для дальнейших испытаний и расчетов. Представленная работа - необходимое основание для проверки работоспособности внутренних отказов блоков с секционными активными частями.

Типичный пример трансформатора напряжения с открытым сердечником с секционной активной частью представлен на рис. 9 (а).

⁶ WEG ведущий мировой производитель электродвигателей и приводной техники

Упрощенное представление системы изоляции показано на рис. 9 (б). Как видно из рис. 9, активная часть блока состоит из емкостно-градиентной основной изоляции проходного типа и секционной первичной обмотки. Идея состоит в том, что каждая секция (катушка) первичной обмотки изолирована от соседних секций (катушек). Кроме того, как показано на рис. 9(б), каждая секция первичной обмотки соединена с соответствующим экраном основной изоляции. Следовательно, каждая пара катушек и смежного экрана содержит один сегмент основной активной части. Есть несколько целей для такой установки. Одной из целей является выравнивание электрических напряжений при различных перенапряжениях, включая импульсные и очень быстрые переходные процессы.

Другой способ заключается в локализации неисправностей в активной части трансформатора.

Существует два возможных режима отказа для этих устройств; отказ в основной изоляции или отказ в первичной обмотке. В зависимости от происхождения, серьезности и других параметров неисправности время распространения неисправности может быть различным, но обычно длительным.

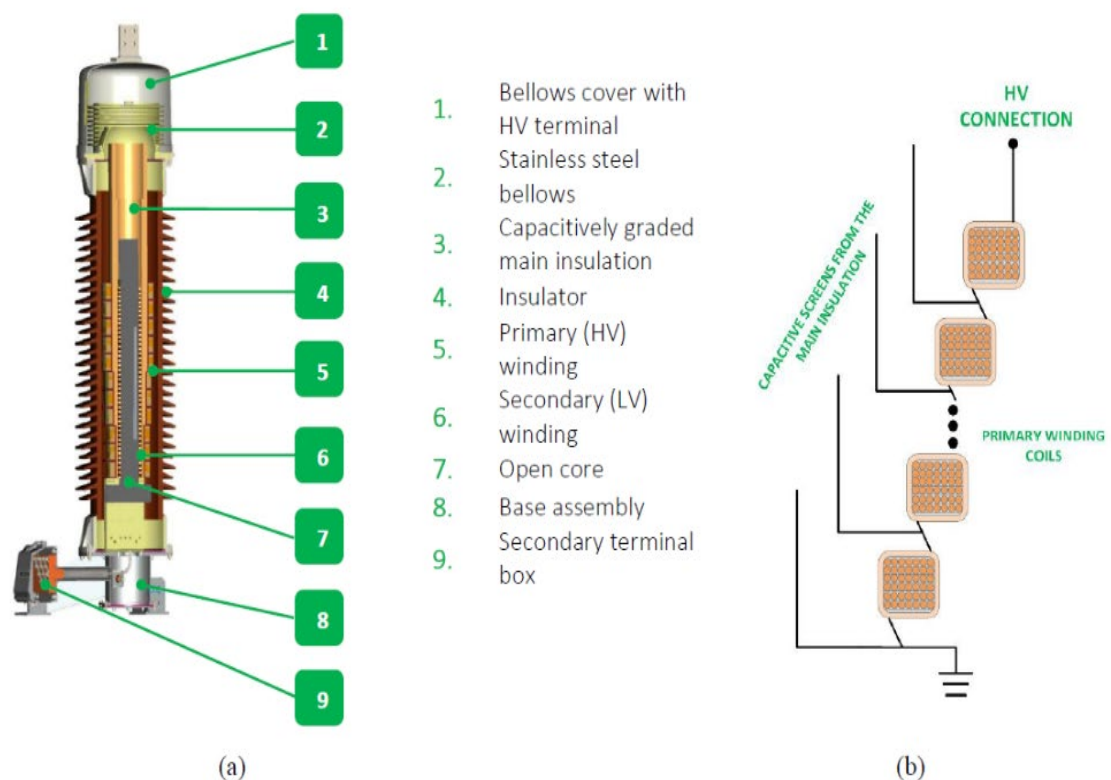


Рис. 9: (а) Сечение трансформатора напряжения с открытым сердечником

(б) Упрощенное представление активной части

Первоначальная экспериментальная проверка проводилась на высушенной пропитанной маслом активной части. Чтобы разрешить доступ ко всем сегментам активной части и обоим интересующим потокам (т.е. I_{FP} и I_{CP}), из устройства слили масло. Это означает что все испытания должны были проводиться при пониженном напряжении, что удобно, поскольку позволяет увеличить время испытаний и упростить схему испытаний. Схема испытательной схемы показана на рис. 10 (а), а фотография испытательной установки показана на рис. 10 (б).

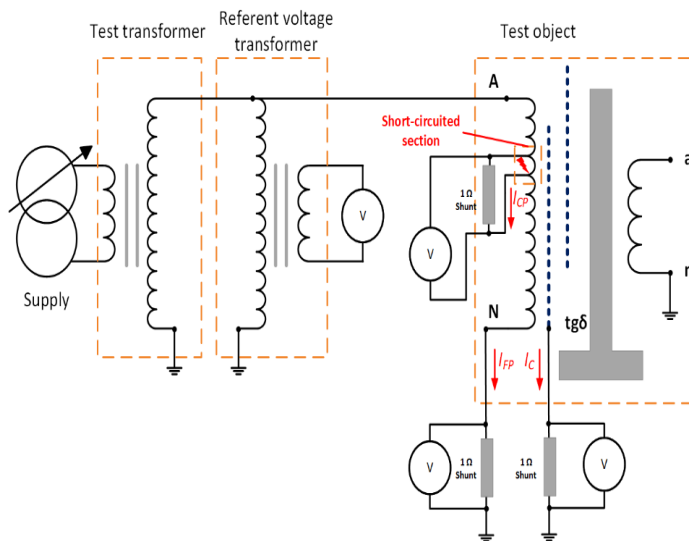


Рис. 10: (а) Схема испытательной схемы

(б) Испытательная установка

Во время каждого испытания были записаны I_{Σ} (суммарный ток), $I_{\Sigma R}$ (ток к.з.) и емкостный ток через основную изоляцию (показаны как I_C на рис. 10 (а)). В измерительной цепи на пути прохождения тока – сопротивление 1 Ом. Три идентичных калиброванных мультиметра FLUKE 179 были использованы для регистрации напряжения на каждом шунте. Помимо проверки численного расчета, было проанализировано влияние повреждения первичной обмотки на основную изоляцию. Это было сделано путем измерения емкостного тока I_C во время каждого испытания. Первые испытания были выполнены для проверки линейности модели. Численные расчеты достаточно точны, чтобы продемонстрировать поведение трансформатора в условиях внутреннего повреждения. Вывод заключается в том, что, если неисправность возникает в первичной обмотке, основная изоляция не изменяется, как это показано на рис. 9.

Неисправности измерительного трансформатора редко бывают тривиальными, поэтому комплексный подход имеет решающее значение для их сокращения.

5)Simulation of long-term transformer operation with a dynamic thermal, moisture and aging model *Моделирование длительной работы трансформатора с динамической тепловой, увлажненной и состаренной моделью J. Raith, Ch. Bonini, M. Scala*

В данной работе представлена динамическая модель термогидравлической сети применительно к трансформаторам. Модель включает в себя динамические характеристики температур, потоков масла и температурно-зависимых потерь, разделенных в отдельных обмотках и отдельных положениях. Термогидравлическая модель включает в себя динамические свойства влаги в твердой и жидкой изоляции для определения локальных уровней влажности и значений ЧР в изоляции. Моделирование также указывает на разницу между моделью старения по МЭК и моделью, разработанной производителем трансформаторов. Кроме того, генерация влаги во время старения целлюлозы и изменение способности абсорбции влаги при старении являются частями моделирования. В докладе продемонстрирована мощная модель, которая позволяет динамически моделировать тепловые характеристики трансформатора вместе с соответствующим поведением влаги. Эти два аспекта, в сочетании с подходящими формулами старения для различных компонентов изоляции трансформатора, дают возможность долгосрочного моделирования для различных конструкций трансформаторов, чтобы оценить их специфические характеристики старения уже на этапе проектирования.

6) Prediction of Outdoor Air Core Reactor Coil Vibro-Acoustics Properties (*Прогнозирование виброакустических свойств катушки реактора с наружным воздушным сердечником*) A. Daneryd, K. Sahu, C. Lagerström, Швеция, L. De Mercato Швейцария

В докладе представлен эксперимент, моделирование и имитирование шумовых и вибрационных характеристик одного участка ОАСР⁷.

Реактор с наружным воздушным сердечником – это крупногабаритная катушка индуктивности, работающая в любых погодных условиях в течение всего срока эксплуатации. Проектный срок службы должен превышать 30 лет, и обслуживание не требуется. Эти устройства могут быть установлены не слишком далеко от жилых районов, поэтому шум, создаваемый их вибрацией, должен соответствовать допустимым уровням. Чтобы убедиться, что конкретная конструкция не будет генерировать чрезмерный шум, необходимо провести предварительный анализ этой системы методом виброакустики. Кроме того, была разработана специальная технология моделирования методом конечных элементов в COMSOL Multiphysics⁸ для создания надежной структурно-акустической численной модели.

7) Axial Vibration Response of an Oil-immersed Transformer Winding-set (*Осевая вибрационная характеристика маслонаполненной обмотки трансформатора*) Bart van der Aa; Luc Dormannns, Нидерланды

В данной работе измерены и смоделированы осевые виброхарактеристики обмотки трансформатора, погруженной в масло. Для характеристики осевого механического отклика было проведено дискретное частотное возбуждение переменной частоты в диапазоне частот от 40 до 70 Гц, с шагом 1 Гц. На всех частотах было приложено 25% от номинального тока. Измеренный отклик вибрации содержит гармоники на основной частоте, удвоенной частоте, но без существенных высших гармоник. Результаты измерений вибрации сравниваются с результатами моделирования, и показали хорошее качественное согласование. Далее показано, что при значительном увеличении измерений между 50 и 60 Гц не отражалось на измеренных уровнях интенсивности звука.

Полученные результаты будут применены для оптимизирования поведения шума и вибрации.

8) The magnetic flux density distribution in the anisotropy transformer core (*Распределение плотности магнитного потока в сердечнике анизотропного трансформатора*) J. Wojtkun, B. Bródka, D. Stachowiak, Польша

В статье рассматривается распределение плотности магнитного потока в сердечнике трансформаторов средней мощности. Трехфазные трансформаторы обычно изготавливаются из электротехнической стали с зернистой структурой, характеризующейся анизотропией. Потери в сердечнике, помимо прочего, в основном зависят от марки материала. Показаны отдельные результаты расчета и измерения потерь холостого хода трансформаторов средней мощности.

9) A Numerical Procedure for Rapid Seismic Assessment of Transformers (*Цифровой метод быстрой сейсмической оценки трансформаторов*) L. De Mercato, Швейцария

⁷ ОАСР (Outdoor Air Core Reactor)- реактор с наружным воздушным сердечником

⁸ COMSOL Multiphysics -универсальная среда для моделирования сложных физических процессов

В данной статье описана процедура быстрого расчета методом конечных элементов для оценки прочности конструкции трансформатора на сейсмические нагрузки. Эта процедура делает все необходимые шаги для предварительной обработки, анализа и последующей обработки автоматически и прозрачно для конечного пользователя, который просто должен определить параметры построения в формате Excel. Эти данные затем напрямую передаются в код ANSYS⁹. Результаты были сопоставлены с экспериментом и сделан вывод, что эта процедура значительно сокращает время, необходимое для сейсмической оценки, и предоставляет ценный инструмент для анализа чувствительности и оптимизации.

10) Novel Calculation Method for Power Transformer Winding Fault Detection using Frequency Response Analysis *Новый метод расчета обнаружения неисправностей обмотки силового трансформатора с использованием анализа частотной характеристики M. Tahir, S. Tenbohlen, Германия*

Анализ частотной характеристики (FRA) является одним из самых мощных методов оценки механической целостности обмотки трансформатора. Процедуры измерения для FRA хорошо документированы в стандартах IEC и IEEE. Однако интерпретация результатов FRA и критерии диагностики силовых трансформаторов через FRA не были полностью установлены. В докладе предлагается новый метод количественной оценки отклонения между двумя интерпретациями FRA. Предложенный метод основан на том факте, что степень отклонения определяется количественно путем оценки среднего отклонения разностей между двумя переменными, и это отклонение затем стандартизируется с помощью общего числа выборок, что называется стандартным отклонением разности (SDD). Новизна этого метода заключается в том, что он дает возможность построить график отклонения в зависимости от частоты, и, что наиболее важно, степень отклонения оценивается без определения частотных поддиапазонов в записи FRA. Применимость представленного метода обсуждается в шести тематических исследованиях, где предложенный метод применяется к передаточным функциям реальных силовых трансформаторов с деформациями и без них. Кроме того, результаты также сравниваются с хорошо известными алгоритмами оценки обмотки, т. е. Китайским стандартом DL / T911-2004, стандартом NCEPRI и т. д. Результаты показали преимущество предложенной методологии над другими методами, поскольку она успешно установила отклонения во всех неисправных трансформаторах. На основе представленных тематических исследований предложен объективный критерий для диагностики механических неисправностей трансформатора. Но предложенный критерий проверен на нескольких трансформаторах, поэтому он является ориентировочным. Однако необходимы дальнейшие исследования, особенно с крупными силовыми трансформаторами в эксплуатации, чтобы установить критерий. Это исследование показывает раннюю функциональность и потенциал предлагаемой методологии для улучшения и стандартизации интерпретации результатов FRA.

11) Line discharge capability of inductive voltage and combined transformers *(Линейная разрядная способность индуктивных трансформаторов напряжения и комбинированных трансформаторов) I. Konta, D. Papić, D. Filipović-Grčić, D. Brezak, Хорватия*

⁹ ANSYS - это программный пакет конечно-элементного анализа

В данной работе авторы проанализировали разрядную способность индуктивных трансформаторов напряжения и комбинированных трансформаторов. Основное внимание в докладе уделено двум основным аспектам деятельности линии разряда: тепловой и механической способности. Цель - доказать, что разрядная способность индуктивных и комбинированных трансформаторов может быть смоделирована с достаточной точностью. Кроме того, предлагаемый подход обеспечивает незаменимый инструмент для определения и оптимизации соответствующих электрических и механических параметров трансформатора для достижения требуемой разрядной способности, даже если технические характеристики или требования проекта превышают разрядную способность стандартной конструкции измерительного трансформатора. Наконец, в докладе представлены соответствующие процедуры испытаний, которые проверяют разрядную способность индуктивных трансформаторов.

12) Influence of conductor transposition on transformer winding RLC parameters (*Влияние транспозиции проводников на параметры RLC обмоток трансформатора*)
Ana Drandić, Bojan Trkulja, Željko Štih, Хорватия

В докладе проанализировано влияние непрерывного транспонированного проводника на параметры RLC обмотки и распределение электрического поля. Исследование проводится на двух типах обмоток: обмотка с и без транспонирования проводника. Для расчета электрического поля и вычисления RLC матриц обмоток использовался 3-D метод конечных элементов (FEM) на основе программного обеспечения.

13) Dimensioning Stabilizing Windings for Y-Y Transformers (*Определение размеров стабилизирующих обмоток для Y-Y трансформаторов*) *S. Goglia, T. Župan, B. Jurišić, K. Capuder, Хорватия*

В докладе представлены методы расчета сил, стабилизирующих повышение температуры обмотки и повышение температуры металлических деталей в случае трансформатора с дельта-стабилизирующей обмоткой и без нее.

Стабилизирующая уравнивающая обмотка представляет собой дельта-подключенную третичную обмотку, не предусмотренную для целей нагружения, часто добавляемую к Y-Y подключенным трансформаторам или автотрансформаторам для стабилизации нейтральной точки напряжений основной частоты. Это делается главным образом для защиты трансформатора и системы от чрезмерных напряжений и токов третьей гармоники, а также для предотвращения помех по телекоммуникационным цепям из-за токов третьей гармоники в линиях и заземлении. В последние несколько десятилетий количество трансформаторов без стабилизирующей обмотки увеличивается. Поэтому очень важно обсудить, когда они необходимы и как их можно использовать. Необходимость стабилизирующей обмотки зависит от характеристик нулевой последовательности и третьей гармоники трансформатора и его совместимости с конфигурацией сети, в которой он будет установлен. Кроме того, при определении размеров стабилизирующей третичной обмотки необходимо учитывать такие события, как несимметричная нагрузка трансформатора, короткие замыкания и различные переходные процессы. В настоящее время помехи в телекоммуникационной цепи не являются серьезной проблемой, поскольку большинство телекоммуникационных линий оснащены волоконной оптикой или различными фильтрами. Отсутствие стабилизирующих обмоток также может привести к перегреву металлических деталей, поэтому для предотвращения перегрева необходимо рассчитать поток нулевой последовательности и связанные с ним потери паразитного потока в металлической детали.

Общепринятой практикой является указание номинальной мощности для стабилизации на $1/3$ номинальной мощности главных обмоток. Эта номинальность достаточна для поддержания случая, когда “трансформатор $Y_{un} + d$ (трансформатор, снабженный уравнивающей обмоткой) может иметь свою вторичную нейтральную клемму, нагруженную током до номинального тока, при условии, что дельта-подключенная обмотка имеет номинальную мощность, равную по меньшей мере одной трети номинальной мощности вторичной обмотки“, или в более простой формулировке, однофазную нагрузку с одной нейтральной клеммой, надежно заземленной, а другой изолированной.

Для достижения своей цели стабилизирующая обмотка должна быть рассчитана по двум критериям-выдержка короткого замыкания и тепловая оценка для реальных случаев нагрузки трансформатора, для которых должна быть известна допустимая асимметрия между фазами.

14) Measurement of Circulating Currents in Split-Winding Transformer and Comparison with Numerical Calculation (*Измерение циркулирующих токов в трансформаторе с разделенной обмоткой и сравнение с численным расчетом*) Leonardo Štrac, Juraj Haramustek, Matej Dorešić, Davor Švarc, B. Jurišić, Хорватия

Трансформатор с разделенной обмоткой - это один из распространенных типов трансформаторов: одна низковольтная обмотка расположена над другой низковольтной обмоткой и совместно с высоковольтной и регулировочной обмоткой. В докладе исследуются циркулирующие токи, возникающие в высоковольтных и регулировочных обмотках при несимметричной нагрузке. Кроме того, измерение циркулирующих токов для случая трансформатора на 240 МВА, 220 кВ представлено вместе с численным расчетом циркулирующих токов и сравнивается с измерением.

15)Appropriate Modelling of Transformer High Current Leads in 3D FEM (*Соответствующее моделирование сильнотоочных выводов трансформатора в 3D FEM*) Karlo Petrović, Bruno Jurišić, Tomislav Župan, Хорватия

В повышающих силовых трансформаторах (GSU) обмотки низкого напряжения несут достаточно высокие токи, которые генерируют высокие уровни магнитного поля. Поэтому, когда речь заходит о трехмерном расчете методом конечных элементов (FEM) паразитных потерь таких трансформаторных блоков, недостаточно моделировать обмотки низкого напряжения как два цилиндра. Также следует смоделировать отводы низкого напряжения, и необходимо знать, как точно моделировать и подключать отводы к обмоткам. Моделирование обмоток и ответвлений в 3D FEM очень требовательно, а расчеты отнимают много времени, поэтому подходящая модель отводов может уменьшить размер сетки и время решения. В докладе представлено несколько подходов к моделированию с последующей проверкой и сравнением с моделью обмоток и отводов.

16)Coupled Electromagnetic-Thermal Model Applicable for Distribution Transformers (*Связанная электромагнитно-тепловая модель, применимая для распределительных трансформаторов*) Ž. Tašner, B. Ćićić, Хорватия

В докладе показана применимость моделей на основе FEM в электромагнитных и тепловых расчетах. Представленный подход может быть полезен в научно-исследовательских и опытно-конструкторских целях для оценки точек перегрева при проектировании трансформаторного бака.

17) Calculation of Eddy Current Losses in Iron Core of Transformer (*Расчет вихревых потерь в сердечнике трансформатора*) *Stjepan Frljić, Bojan Trkulja, Željko Štih, Хорватия*

Трансформаторы являются неотъемлемым компонентом энергосистемы. Вихревые токи генерируются в сердечнике трансформатора как побочный эффект. Потери из-за вихревых токов представляют собой значительную потерю энергии в большом масштабе времени. Наслаивание на сердечник трансформатора является стандартным подходом к минимизации потерь на вихревые токи. FEM является наиболее подходящим численным методом для анализа вихревых токов на компьютере, на этапе проектирования. Из-за большого соотношения размеров сердечника трансформатора к толщине наслоения, ядро наслоения требует недопустимо большого числа конечных элементов в конечном элементе сетки. Следовательно, преобразование многослойного сердечника в объемную модель является общим подходом для включения вихревых токов и подлежит расчету.

18) Numerical Computation of the Vibroacoustic Behaviour of an Oil-Immersed Power Transformer (*Численный расчет виброакустического поведения масляного силового трансформатора*) *Bruno Bosnjak, Dariusz Nowak, Sever Michalowski, Швейцария*

В докладе представлен численный метод расчета, который позволяет моделировать механическое и акустическое поведение бака трансформатора. Для моделирования виброакустического поведения масляного силового трансформатора была создана акустически-механическая модель трехмерного метода конечных элементов трансформатора. Моделирование выполняется в частотной области на частотах, смежных с частотой возбуждения. Источник вибрации, очень похожий на действующую активную часть трансформатора, расположен внутри маслonaполненного бака, который механически представляет собой акустическую полость с гибкими стальными границами. Через интерфейс структуры и жидкости источник вибрации генерирует акустические волны в масляной среде, которые частично передаются через конструкцию стенки бака и частично отражаются в стальном баке трансформатора через интерфейс структуры жидкости. Вибрационный бак затем соединяется с внешней акустической воздушной средой, и соответствующее звуковое поле рассчитывается и оценивается в соответствии с МЭК 60076-10. Этот численный расчет позволяет непосредственно рассчитать полное колебательное и акустическое поведение трансформатора.

19) Determining Natural Resonant Frequencies of Large Power Transformer Windings (*Определение собственных резонансных частот обмоток большого силового трансформатора*) *Igor Telalović, Janko Novosel, Franjo Kelemen, Хорватия*

Проектирование, процесс сборки и подготовки обмоток для больших силовых трансформаторов являются сложными процедурами. Очень важно распознавать резонансные частоты обмоток на этапе проектирования, чтобы избежать увеличения вибраций, напряжений или уровня шума при нормальной работе трансформатора. Повышенные вибрации и напряжения могут возникать, когда частота возбуждения близка к собственной резонансной частоте системы. В этом случае амплитуды будут увеличиваться, и их значения будут зависеть, помимо прочего, также от величины демпфирования, присутствующего в системе. Поэтому, чтобы избежать очень большой амплитуды колебаний при резонансе, необходимо знать собственную частоту. В докладе описан аналитический расчет собственных частот высоковольтных и низковольтных обмоток. Численный анализ (ВЭД) выполняется в программном комплексе Ansys. Анализ содержит описания упрощений геометрии, граничных условий, проверки сетки и прикладываемых нагрузок. Результаты, полученные с помощью численного анализа (ВЭД) сравниваются с аналитическими результатами.

Предпочтительная тема 3

Трансформатор и его срок службы (18 докладов)

1) Future Trends in Transformer Online Monitoring (*Будущие тенденции в онлайн-мониторинге трансформаторов*) T. Auronen, T. Hanninen (Финляндия), I. Murat, S. Keitoue (Хорватия)

В докладе представлены будущие тенденции в онлайн-мониторинге трансформаторов на основе предыдущих разработок и в соответствии с концепцией технического обслуживания силовых трансформаторов. В качестве ключевой функциональности силовой трансформатор представлен с использованием числового или графического моделирования, позволяющего понять общее состояние оборудования (индекс работоспособности). Это даст пользователю руководство о том, как ранжировать трансформаторы в их сети, чтобы принять решение о графике и точно определить компонент трансформатора, который необходимо обслуживать. Для этой цели система должна учитывать другую доступную информацию, такую как результаты автономных диагностических тестов, данные о конструкции трансформатора и историю известных неисправностей. Такой подход позволит реализовать стратегию управления активами, в которой пользователь может осуществлять техническое обслуживание на основе полученной информации о неисправностях, что приведет к снижению затрат и повышению надежности и безопасности в отношении силовых трансформаторов.

2) Lessons Learned when Introducing and Applying Continuous Condition Monitoring Systems (*Уроки, извлеченные при внедрении и применении систем непрерывного мониторинга состояния*) Brian Sparling, Австралия

В настоящее время на рынке представлено множество датчиков, IED-устройств (интеллектуальных электронных устройств) и онлайн-систем непрерывного мониторинга с алгоритмами анализа и программными системами для оценки состояния оборудования подстанции высокого напряжения. Однако для тех владельцев подстанций, которые мало знакомы с этими системами, но чувствуют, что в них есть необходимость, внедрение мониторинга может быть большой задачей без каких-либо указаний о том, как начать. На эту тему нет письменных руководств из стандартов IEC или IEEE. Однако есть публикации, опубликованные IEEE и Cigré, в которых даются рекомендации о том, как лучше всего подходить к этому проекту. Однако, прежде чем начинать процесс, необходимо изучить и проанализировать мифы и недоразумения относительно того, что будут делать устройства мониторинга состояния. В докладе рассмотрены и подробно описаны методы, используемые другими владельцами активов подстанции для перехода от обслуживания на основе времени к обслуживанию на основе условий, что влияет на повышение надежности системы, снижение риска неожиданного отказа оборудования и повышение осведомленности о ситуации для безопасности работников, общественности и компании.

3) Advantage of Online Condition Based Assessment for Transformers in enhancing the maintenance strategy (*Преимущество онлайн-оценки состояния трансформаторов в улучшении стратегии технического обслуживания*) Ibrahim Al Balushi, Султанат Омана

Управление техническим обслуживанием является одной из основных задач, стоящих перед любым объектом. Проблемы заключаются в том, как оптимизировать три основных

фактора: риск, производительность и стоимость. Кроме того, нет никакой полезности от типа обслуживания, всегда есть комбинация этих различных видов обслуживания, таких как поломка, профилактика, основанная на риске, основанная на условии, и т. д. Итак, каков ответ на вопрос: какой тип обслуживания необходимо соблюдать, чтобы поддерживать исправную работу трансформатора? На этот вопрос нет правильного ответа, потому что каждый тип обслуживания может быть применен на основе компонента трансформатора. Однако в большинстве применяется профилактическое и техническое обслуживание. Чтобы оправдать этот ответ, необходимо проанализировать некоторые данные, чтобы оценить эффективность технического обслуживания, чтобы порекомендовать, какие улучшения необходимо добавить. Одним из таких подходов является применение онлайн-оценки состояния для изучения состояния активов на основе текущей практики обслуживания. Кроме того, изучение как исторических данных о техобслуживании, так и частоты отказов трансформатора поможет понять взаимосвязь между техобслуживанием и производительностью. Это отношение может прийти в двух формах. Одна из форм – это «набор действий по обслуживанию, которые необходимо выполнять во время обслуживания, чтобы обеспечить его эффективность». Вторая форма заключается в том, чтобы делать все правильно, расширяя возможности и компетенции обслуживающей бригады для обеспечения высокой эффективности. После анализа всех факторов отмечено, что онлайн-оценка состояния трансформатора является мощным инструментом, который можно использовать для улучшения и построения эффективной стратегии. Он будет включать не только ряд действий во время технического обслуживания, он охватывает весь жизненный цикл трансформатора. Кроме того, в нем подчеркиваются пробелы в процессе и процедурах технического обслуживания, а также приводятся указания на необходимость совершенствования на основе международной практики. Эти изменения были отмечены в отношении затрат и производительности в сравнительном исследовании, которое было проведено в рамках Международного исследования эксплуатации и технического обслуживания трансмиссии (ITOMS), которое было хорошим показателем эффективности стратегии, используемой для трансформаторов.

4) Analysis of Overvoltages on Power Transformer Recorded by Transient Overvoltage Monitoring System *(Анализ перенапряжений на силовых трансформаторах, зарегистрированных системой мониторинга переходных перенапряжений)*

B. Filipovic-Grcic, B. Jurisic, S. Keitoue, I. Murat, D. Filipovic-Grcic, A. Zupan, Хорватия

В докладе приводится пример использования онлайн системы мониторинга силовых трансформаторов для измерения перенапряжений на вводе трансформатора. Основное внимание в докладе уделяется анализу переходных перенапряжений, вызванных ударами молнии, зарегистрированными на клеммах силового трансформатора. Анализируются зарегистрированные перенапряжения, их амплитуды и частотный спектр представлены и сопоставлены с теми, которые относятся к стандартным импульсным напряжениям по МЭК. Собранные данные включают количество, амплитуду и длительность зарегистрированных переходных перенапряжений и могут использоваться для оценки состояния изоляции трансформатора и оценки индекса работоспособности. Данные, записанные TOMS, также имеют большое значение, поскольку система изоляции силового трансформатора и другого оборудования на подстанции может быть повреждена молнией или перенапряжением.

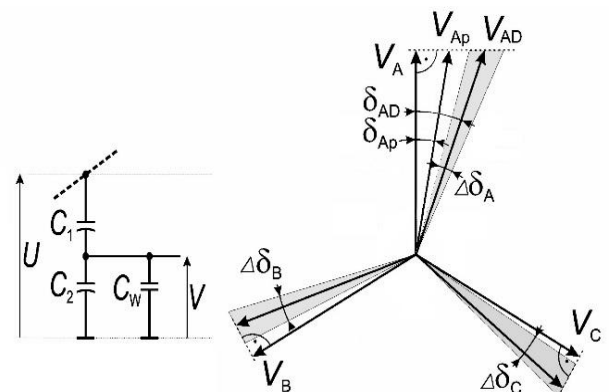
5) Overvoltages & Transients Identification In On-line Bushing Monitoring (Идентификация перенапряжений и переходных процессов в режиме онлайн мониторинга вводов) W. Gil, W. Masłowski, P. Wroniek, Польша

Перенапряжения и переходные процессы иногда признаются причиной быстрого отказа вводов и возникновению опасных резонансных явлений в обмотках трансформатора. Этот факт подтверждается исследованиями, опубликованными на сессии СИГРЭ в 2018 году. Идентификация очень быстрых перенапряжений, характеризующихся высокой динамикой изменений напряжения, так называемых «переходных процессов», затруднена из-за ограниченной частотной характеристики трансформаторов напряжения станции. Для этой цели могут быть успешно использованы системы контроля проходного изолятора, основанные на «методе напряжения». В Польше существует несколько работающих систем мониторинга проходных изоляторов. Переходные процессы регистрируются осциллографами в TMS. TMS интегрированы со станционными системами, что значительно увеличивает вероятность анализа явлений перенапряжений.

Принцип измерения указанных систем основан на методе контроля напряжения проходного изолятора в режиме реального времени. Метод не получил широкого применения из-за трудностей с точным измерением фазовых углов векторов напряжения на измерительных отводах проходного изолятора. Это привело к неточной оценке $\text{tg}\delta$. В последнее время эти проблемы были преодолены с учетом временной асимметрии линейного напряжения и синхронизации времени измерения. Преимущества этого метода подтверждаются также результатами анализа, учитывающего возможность измерения высших гармоник линейных напряжений в системах контроля проходного изолятора. Емкостные датчики, установленные в измерительных выводах проходных изоляторов, являются основным компонентом измерительной системы (рис.12а). Принцип измерения этого датчика показан на рисунке 12б.



а)



б)

Рис. 12 а) Зонд установлен в измерительной ленте

б) Принцип работы емкостного зонда и относительная оценка $\text{tg}\delta$

Устройства и структура оперативного мониторинга состояния вводов представлены на рис. 13. Сигналы напряжения от измерительных зондов подключаются к модулю мониторинга, который выполняет необходимые расчеты и локальное хранение данных. Основная

функция установленного оборудования состоит в том, чтобы точно определить значение емкости C_1 и значение коэффициента потерь в диэлектрике $\tan \delta$ ввода, в которой установлен датчик.

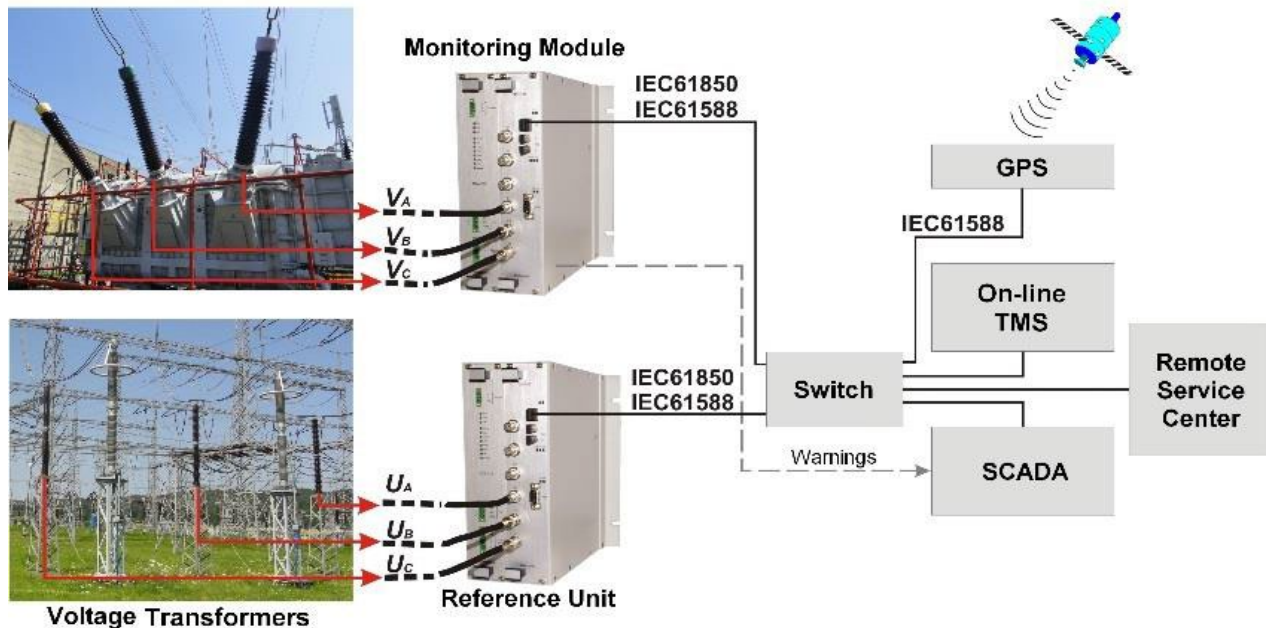


Рис. 13 Структура оперативного мониторинга ввода

Информация о скачках напряжения наряду с информацией о времени их возникновения передается в оперативном режиме в ТМС в виде событий с записями осциллографа переходных процессов и среднеквадратичными формами колебаний в стандартных файлах. Возможные предупреждения и сигналы тревоги, создаваемые ТМС, направляются в систему станции SCADA. Экспертный доступ к собранным данным на сервере мониторинга возможен из удаленного сервисного центра или через защищенные механизмы сайта.

6) Power Transformer Efficiency – survey results and assessment of efficiency implementation (Эффективность силового трансформатора - результаты опроса и оценка эффективности внедрения) *Žarko Janić, (Хорватия), Anthony Walsh (Ирландия), Adesh Singh (Южная Африка), Yordan Botev (Болгария)*

В докладе изложены выводы рабочей группы СИГРЭ А2.56 «Эффективность силовых трансформаторов» по опросу среди энергопредприятий во всем мире, проведенные с целью определения максимально допустимых потерь для оценки эффективности работы силовых трансформаторов.

7) Reliable Power Transformer Efficiency Tests (Надежные испытания эффективности силовых трансформаторов) *Gert Rietveld, Ernest Houtzager, Dennis Hoogenboom, Gu Ye VSL, Нидерланды*

В докладе описаны новые разработки и представлены некоторые аспекты, которые важны для точных и надежных измерений потерь силовых трансформаторов. Это включает в себя разработку передовых промышленных систем измерения потерь (LMS), оптимизированных подходов к калибровке LMS и эталонной системы для калибровки LMS на месте.

8) Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Fluids, Technologies and the Importance of Accuracy (*Анализ газов, растворенных в электроизоляционных жидкостях, технологии и точность*) J. Hinshaw, D. Skelly T. Waters, D. Bidwell, США

Анализ растворенных газов (DGA) и воды в электроизоляционных жидкостях позволяет операторам электрооборудования отслеживать наличие или отсутствие различных неисправностей, а также наблюдать за нормальным или ускоренным старением оборудования. DGA может быть достигнуто путем прямого влажного измерения в масле или анализа газов, извлеченных из изолирующей жидкости. Прямое измерение некоторых целевых соединений, таких как водород или вода, может быть выполнено различными погруженными твердотельными датчиками. Извлечение газа в сочетании с хроматографическими, спектроскопическими и твердотельными измерениями в газовой фазе широко применяется для более детального анализа нескольких газов. Стандарты, опубликованные ASTM, IEEE и IEC, представляют различные методы извлечения и интерпретации веществ, растворенных в изоляционном масле. В докладе рассматриваются предпосылки, важность точности для успешной диагностики и современное состояние методов и технологий DGA.

9) Optimal cooling and life time management for power transformers (*Оптимальное охлаждение и управление сроком службы силовых трансформаторов*) L. Paulhiac (Франция), J. Raith (Австрия)

Доклад демонстрирует возможности определения оптимальных пороговых значений для системы охлаждения силовых трансформаторов с целью минимизации общего потребления потерь и максимального увеличения срока службы без дополнительных затрат на обслуживание. Для достижения этой цели исследуется переходное тепловое режимы силового трансформатора для различных варианты температуры окружающей среды вместе с поведением влаги в течение полного жизненного цикла, что является важным параметром для определения условий старения целлюлозной изоляции. В докладе указывается, как можно определить подходящие значения для настройки охлаждения конкретного силового трансформатора и его конкретного местоположения.

10) Asset Management Model Implementation in ELES Company (*Внедрение модели управления активами в компании ELES*) Saša Jamšek, Andrej Bučar, Anton Urankar, Словения

ELES¹⁰ принимает активное участие во внедрении эффективного управления активами с тех пор, как CIGRE начала формировать концепцию управления активами в передающих компаниях. Внедрение прозрачной модели управления активами вместе с четкой организационной структурой является одним из наиболее важных факторов успеха управления активами. В докладе описываются проблемы реализации модели и формирования процесса в ELES. ELES стремится быть одним из ведущих TSO в области управления активами. Недавно компания разработала и внедрила модель управления активами в соответствии со стандартом ISO 55000. Модель связывает воедино шесть субъектов для формирования прозрачной системы управления активами. Подход основан на управлении жизненным циклом для обеспечения оптимального баланса рисков,

¹⁰ ELES (Elektro-Slovenija - государственной электропередачей компаний Словении)

производительности и стоимости для всех критических классов активов, которыми владеет компания. В докладе конкретно показано согласование проекта замены силового трансформатора на подстанции Divaşa.

11) Power Transformers Long Term Maintenance Strategy (*Стратегия долгосрочного технического обслуживания силовых трансформаторов*)

Mohammed Said Dad Allah AlZadjali¹ Nooh A H Al Zadjali Оманская электросетевая компания

Силовые трансформаторы играют ключевую роль в передаче электроэнергии. По мере увеличения количества трансформаторов из-за расширения системы ОЕТС¹¹ обеспечивает высокий уровень к техническому обслуживанию силовых трансформаторов не только потому, что это самый дорогой актив в сети, но также и потому, что он является одним из самых важных активов, которые вносят вклад в надежную электрическую сеть, где любое повреждение в трансформаторе приведет к серьезным потерям в снабжении. Трансформатор похож на любое другое оборудование, которое не может жить вечно, но его срок службы может быть увеличен / увеличен путем постоянного мониторинга его состояния, производительности и соответствующего обслуживания. Надлежащее техническое обслуживание означает не только указание того, какой тип технического обслуживания, но также и то, когда его следует выполнять, принимая во внимание финансовый аспект. В последние годы режим технического обслуживания трансформаторов, используемый в ОЕТС, представлял собой периодическое техническое обслуживание, при котором каждый трансформатор обслуживается ежегодно, но из-за увеличения количества трансформаторов по сравнению с коротким периодом технического обслуживания режим технического обслуживания трансформатора изменился, и каждый трансформатор будет поддерживаться один раз в три года с некоторым корректирующим обслуживанием на основе дефектов активов. Компания искала способ организации и улучшения процесса технического обслуживания, чтобы гарантировать, что надежность трансформатора не пострадает от старения трансформаторов, и заключается в улучшении долгосрочной стратегии, которую можно пересматривать и разрабатывать каждый год, чтобы эта стратегия могла применяться в это конкретное время с учетом ситуации в организации и ее потребностей.

12) Managing Transformers Risk through Failure Codification (*Управление риском трансформаторов с помощью кодификации отказов*)

Abdullah Mohammed Al Qabtan, Mohammed Said Dad Allah AlZadjali, Omran Omar AL Balushi Оманская компания по передаче электроэнергии,

Цель этой статьи - установить план, определяющий процессы создания кода сбоя, который может создать библиотеку режимов сбоя с его последствиями и рисками. Это позволяет поставщику услуг быстро понять проблему. Кроме того, он идентифицирует большинство функциональных сбоев, которые могли произойти в критическом активе в сети ОЕТС.

Избирательные процессы создания кода отказа дают организации более целостное представление о риске трансформаторов, который будет использоваться для улучшения стратегии обслуживания путем интеграции этих кодов в систему рабочих заданий, такую как CMMS¹².

¹¹ ОЕТС (Oman Electricity Transmission Company- Оманская электросетевая компания)

¹² CMMS компьютеризированная система управления техническим обслуживанием.

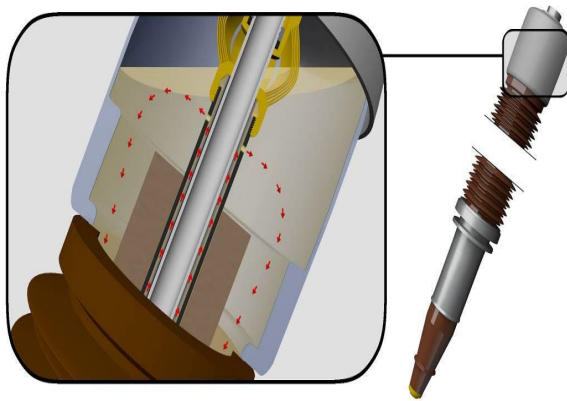
13) Implementation of Enterprise Asset Management system at OETC *(Внедрение системы управления активами предприятия в OETC) Omran Al Balushi, Haitham Al Rawahi*
Султанат Оман

В докладе изложен опыт и знания по внедрению системы управления активами предприятия в OETC и о том, как она поддержала руководство OETC в принятии решений. Также выделены проблемы и трудности, которые возникли при внедрении e-AM¹³ перечислены некоторые особенности и преимущества e-AM в управлении активами, профилактическом обслуживании и управлении затратами на техническое обслуживание.

14) Generation of small amounts of combustible gases in oil-filled transformer bushings
(Генерация небольших количеств горючих газов в маслонаполненных трансформаторных вводах) L. Jonsson, H. Löfås, G. Eriksson, C. Forssen, Швеция

Оценка состояния в области емкостных высоковольтных вводов снижает риск сбоев в обслуживании и, таким образом, существенно повышает доступность трансформатора, особенно в тех случаях, когда вводы могут подвергаться воздействию чрезмерного напряжения в сети. Доклад посвящен случаям, когда ацетилен является единственным горючим газом, превышающим нормальные уровни концентрации, и определяет области с образованием газа внутри обычно используемой конструкции ввода с (OIP) и представляет собой сводные результаты нескольких исследованных высоковольтных вводов. Конструкция ввода с OIP состоит из трех основных компонентов: внешняя изоляция для минимизации токов утечки и предотвращения внешнего пробоя; внутренняя изоляция для распределения электрического поля (сердечник конденсатора); и система проводников для переноса токовой нагрузки. Во внутренней изоляции имеется несколько очень точно расположенных коаксиальных слоев проводящего материала в бумажном полотне. Внутренняя изоляция пропитана минеральным трансформаторным маслом и помещена в изолирующую оболочку из масла и фарфора, которая предотвращает смешивание масла во вводе с трансформаторным маслом. Конкретный тип ввода, участвующей в том исследовании, создается с использованием нескольких коаксиальных трубок - количество трубок и некоторых других компонентов варьируется в зависимости от класса напряжения. Система предварительно напряжена и служит пружинами, которые удерживают основные компоненты вместе и обеспечивают адекватное давление на прокладки при всех ожидаемых условиях температуры и нагрузки. Кольцевое пространство, образованное между трубами, создает эффективный канал охлаждения для отвода тепла, тем самым улучшая пропускную способность и термическую стабильность. Эта функция также очень важна для обработки ситуаций перегрузки рис.14а. Конвективный поток масла во время эксплуатации обозначен красными стрелками. Некоторые компоненты в конструкции варьируются между различными классами напряжения.

¹³ e-AM¹³ (Enterprise Asset Management - управление активами предприятия),



а)



б)

Рис. 14 а) Принципиальная схема пропитанного маслом высоковольтного ввода.

б) Установка ввода сверхвысокого напряжения для высоковольтных испытаний

15) Who is Monitoring the Monitor? (Кто контролирует монитор?) Jeff Benach, США

Испытание проходного изолятора в эксплуатации традиционно ограничивалось измерением емкости и тангенсом угла диэлектрических потерь в автономном режиме, во время отключения с умеренной температурой и низкой влажностью: IEEE и IEC определяют стандарты тестирования проходного изолятора для автономного испытания проходного изолятора (IEEE). C57.19.00-1997 и IEC 60137 / 2003-08). Он-лайн мониторинг высоковольтных вводов важен для выявления зарождающихся отказов в период между автономными испытаниями. Однако информация, собираемая в режиме онлайн, должна быть подключена к SCADA¹⁴, чтобы оперативный монитор мог эффективно оповещать о ухудшающемся состоянии проходного изолятора.

Трансформатор GSU¹⁵ на крупной газовой электростанции вышел из строя в июле 2017 года, рис. 16. Трансформатор контролировался 24 часа в сутки, 365 дней в году, с помощью встроенного монитора проходного изолятора и встроенного моногазового DGA-монитора. Мониторы были установлены в 2010 году и фиксировали события, приведшие к выходу из строя ВН.



Рисунок 16: Трансформатор GSU после выхода из строя вводов фазы А

¹⁴ SCADA (диспетчерский контроль и сбор данных),

¹⁵ GSU (Georgia State University- Университет штата Джорджия)

Ввод был полностью разрушен, а также наблюдались повреждением в баке трансформатора, рис. 16. Анализ после отказов был выполнен на основе данных монитора высоковольтных вводов и содержания H_2 газа в уровнях масла. К сожалению, он-лайн мониторы не были подключены к SCADA, и поэтому не были получены ранние предупреждения, которые могли бы предотвратить отказ проходного изолятора. Уровни H_2 , сообщаемые онлайн-монитором DGA (InsuLogix®H), находились в диапазоне 10 промилль, пока не произошел сбой, что является очень безопасным уровнем H_2 .

Заказчик признал важность контроля вводов высоковольтных трансформаторов во время эксплуатации трансформатора, поскольку автономные испытания являются периодическими и не могут проводиться при любых нагрузках и погодных условиях. Собранные данные и последующий анализ указывают на то, что неисправность произошла из-за неисправности низковольтного конденсатора C2(наружные слои изоляции ввода). Есть признаки искрения и сажи в основании ввода. Отказы C2 происходят быстрее, чем отказы высоковольтного конденсатора C1. Рекомендуется постоянное подключение к SCADA с использованием соответствующего протокольного интерфейса (DNP3, IEC 61850 и т. д.) И физических подключений к аварийным сигналам, чтобы можно было своевременно принять решение о состоянии проходного изолятора и отключении трансформатора для устранения проблемы путем профилактического обслуживания. В этом случае было бы достаточно предупреждений, чтобы принять обоснованное решение о выводе этого трансформатора из строя и проведении дополнительных испытаний для обнаружения и замены / ремонта проходного изолятора до катастрофического отказа и последующего дополнительного повреждения.

16)Fire and safety aspects of flashovers in high voltage transformer bushings

(Противопожарные и защитные аспекты от искрения в вводах высоковольтных трансформаторов)

L. Jonsson, R. Hedlund, A. Andersson, H. Skoogh, P. Mindykowski, M. Försth, Швеция

Высоковольтный ввод с градуированной емкостью является критическим компонентом, обнаруженным во всех электрических сетях, и выход которого из строя может иметь серьезные последствия. Хотя пробой между фазой и землей может иметь много причин - как из-за выхода из строя самого ввода, так и из-за электрических, механических и термических напряжений, возникающих в энергосистеме, - пробой во вводе почти всегда приводит к взрыву. Последствия особенно серьезны, когда загораются трансформаторы. Существует несколько различных концепций ввода, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки в отношении технических характеристик. Однако, поскольку все сбои являются уникальными, представляет интерес оценить различные концепции, касающиеся динамики пожара в идентичных условиях.

Для проведения полномасштабного разрушающего испытания были выбраны три различные концепции ввода масло-воздух 245 кВ:

- Пропитанная маслом бумага (OIP) с керамическим изолятором.
- Пропитанная маслом бумага (OIP) с композитным изолятором.
- Сухая пропитанная смолой бумага (RIP) с композитным изолятором, заполненным гелем.

Чтобы имитировать самый серьезный тип пробоя внутри секции, находящейся под напряжением, вводы были оснащены очень точно расположенными внутренними дуговыми разрядниками, которые могли бы вызвать значительное повышение воздействия при пропуске тока короткого замыкания. Исследование включало исследования вероятности возгорания масла, а также термических повреждений эпоксидного покрытия, изоляции кабеля и силиконовой резины на трансформаторе. Чтобы ответить на эти вопросы, температуру возгорания оценивают по измеренным значениям плотности падающего лучистого потока. Из этой оценки и с использованием уравнения теплопередачи можно получить приблизительное значение температуры для твердых материалов (эпоксидное покрытие, силиконовая резина и изоляция кабелей), а также для жидкости (масло). Выводы из исследования заключаются в том, что тепловое воздействие двух маслонаполненных вводов повлияет на другие компоненты; Эпоксидное покрытие, силиконовая резина и изоляция кабеля не обязательно могут воспламениться, но, по крайней мере, будут серьезно повреждены, а масло, высвобождаемое из основного бака трансформатора, может воспламениться. С другой стороны, пропитанная сухой смолой бумажный ввод с композитным изолятором имеет излучаемый тепловой поток, который значительно ниже, чем у маслонаполненных вводов, что указывает на значительно более низкое воздействие. Высоковольтные вводы для трансформаторов емкостного типа состоят из трех основных компонентов: внешняя изоляция для минимизации токов утечки и предотвращения внешнего пробоя; внутренняя изоляция (сердечник конденсатора) для распределения электрического поля; и система проводников для переноса тока. Во внутренней изоляции имеется несколько очень точно расположенных коаксиальных слоев проводящего материала в бумажном полотне (рис.17).

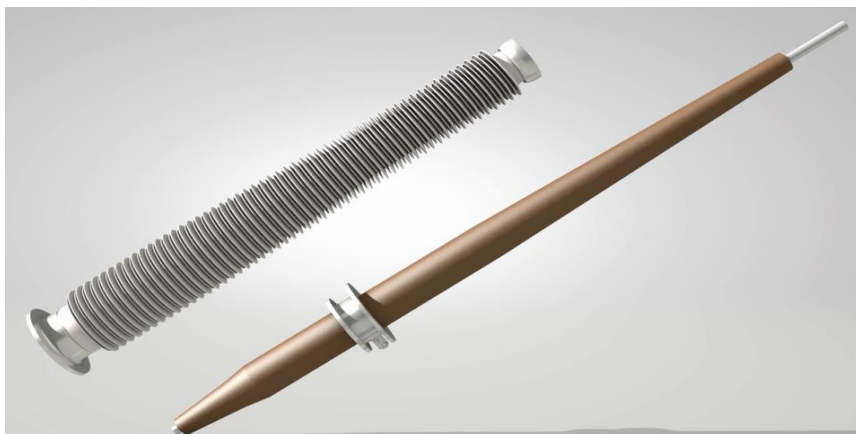


Рис. 17. Основные компоненты ввода: внешняя изоляция слева и внутренняя изоляция с монтажным фланцем и проводящей трубкой справа.

Важно было убедиться, что все вводы были подготовлены одинаково, чтобы вспышка происходила в одном и том же месте. Вводы были сконструированы специально для дугового промежутка, расположенного в сильно напряженной зоне, где высока вероятность внутреннего пробоя, основываясь на опыте многих аварийных анализов. Проводник проходного изолятора был соединен с заземленным фланцем через медный проводник и электродную систему. Точные параметры испытаний и форма электродов были установлены на основе подробных исследований и экспериментальных испытаний и разработаны таким образом, чтобы дуга горела в течение точного времени, создавая тем самым избыточное внутреннее давление, возникающее в случае фактического отказа. Электроды изготовлены из меди диаметром 16 мм с зазором 20 мм между ними и оснащены

небольшим медным проводом в зазоре. Вводы были помещены в отдельный открытый испытательный резервуар, заполненный песком, к которому был прикреплен фланец ввода. Вводы были соединены с генератором через систему винопроводов, которая снабжала энергией. Повышенные меры безопасности были приняты, так как ожидалось пожары. Для записи испытания были использованы шесть видеокамер (рис.18).

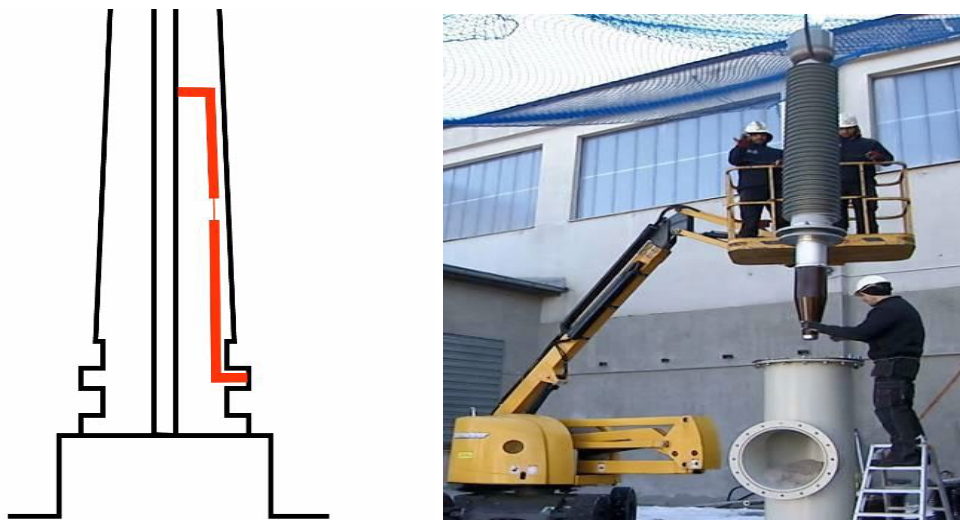


Рисунок 18. Принцип расположения дугового электрода внутри вводов (слева). Ввод для испытания (справа)

Как и ожидалось, все три испытанных ввода получили серьезные повреждения, которые не подлежали ремонту, и очень хорошо продемонстрировали жесткость внутренних пробоев и риск повреждения смежных компонентов (рисунки 19 и 20).



Рис. 19. Выполнение теста; ОИР с керамическим изолятором (слева), ОИР с композитным изолятором (посередине) и РИР с композитным изолятором, заполненным гелем (справа).



Рис. 20. Визуальный эффект на разных вводах. ОИР с керамическим изолятором (слева), ОИР с композитным изолятором (посередине) и РИР с композитным изолятором, заполненным гелем (справа).

Выводы этого исследования заключаются в том, что тепловое воздействие двух маслonaполненных вводов повлияет на другие компоненты трансформаторной станции; Эпоксидное покрытие, силиконовая резина и изоляция кабеля могут не обязательно воспламениться, но будут серьезно повреждены, и масло, высвобождаемое из основного бака трансформатора, может воспламениться.

С другой стороны, пропитанный сухой смолой ввод с композитным изолятором обладает излучаемым тепловым потоком, который значительно ниже, чем у маслonaполненных вводов, что указывает на значительно меньшее воздействие.

17) Verification of Maintenance Intervals for Vacuum On-Load Tap-changers (*Проверка интервалов технического обслуживания для вакуумных устройств РПН*) Niklas Gustavsson, Швеция

Большие интервалы технического обслуживания вакуумных устройств РПН требуют тщательных испытаний. С момента появления резистивных вакуумных устройств РПН, появившихся на рынке в 2000-х годах, очень мало таких, которые эксплуатировались 10-15 лет без какого-либо технического обслуживания и, вероятно, вообще не имели опыта работы с установками с более длинными интервалами обслуживания. Чтобы действительно убедиться, что устройство РПН может выдерживать 30-40 лет в условиях разностной нагрузки и приложений, необходимы испытания, выходящее за рамки обычного типа испытаний.

18) Mitigating Murphy's Law While Test Volume 2 (*Смягчение закона Мерфи во время теста Том 2*) Фредерик Доллингер, Швейцария

В докладе приведены тематические исследования за последнее десятилетие, чтобы предоставить важную информацию и распространить ключевые результаты, которые помогут осветить ранее скрытые проблемы, фокусированные на измерении частичного разряда, измерении $C / \tan \delta$.

Автор акцентирует внимание на том, что работая в тесном контакте с нашими клиентами, мы видели или даже неожиданно обнаруживали ситуации, в которых тестирование проводилось ненадлежащим образом: обычно это закон Мерфи. Это связано с различными причинами, такими как неправильная интерпретация стандарта (IEC / IEEE), неправильная интерпретация настроек прибора или неадекватная измерительная аппаратура. Это может привести к неподтвержденным стандартным (IEC / IEEE) измерениям или неверным результатам измерений, вплоть до даже повреждения объекта испытаний или системы испытаний.

В этом первом томе Закона о смягчении мерфи во время тестирования мы сосредоточимся только на следующих тестах; измерение частичного разряда и измерение $C / \tan \delta$. На втором этапе каждый случай будет ранжироваться в соответствии с трудностью определения места сбоя, типом сбоя, если сбой можно избежать и если ситуация опасна. Этот второй подход поможет определить общий подход, чтобы избежать большинства случаев, представленных в исследовании.

Анализ тематического исследования показывает, что большинства проблем можно напрямую избежать, просто модернизировав систему с использованием самых современных технологий, а тем временем повысив уровень безопасности системы.

3. Техническая выставка.

В период с 09 по 12 сентября 2017 года в рамках коллоквиума прошла техническая выставка.

Среди павильонов крупные международных компаний такие как: KONCAR, SIEMENS, ENPAY, SoftTeam Group, TRENCH, MIR, Tectra, Megger, HAEFELY, WEIDMANN и другие.

Основной целью выставки является ознакомление профессионального сообщества инженеров, специалистов, ученых, экспертов, менеджеров и инвесторов, а также делегатов Коллоквиума с передовыми достижениями мировой науки и техники в электроэнергетике. Это площадка для демонстрации новейших технологий, оборудования, продуктов и решений в области электрических систем высокого напряжения и обмена научно-технической информацией.

4. Заключение

По итогам Коллоквиума можно отметить следующие ключевые вопросы:

- влияние синтетического эфира, используемого в качестве изолирующей жидкости, на электрическую и тепловую конструкцию силового трансформатора, проблемы совместимости материалов и различия в процессе производства;
- испытание на стойкость к короткому замыканию для трансформаторных высоковольтных вводов;
- инновационные решения для индикации горючих газов от реле Бухгольца;
- измерение и моделирование грозовых перенапряжений в силовых трансформаторах;
- основы расчета параметров трансформатора для высокочастотных переходных процессов с использованием метода конечных элементов (FEM), и предлагается метод эквивалентного преобразования схемы на основе анализа результатов измерений переходных процессов;
- анализ влияния непрерывного транспонированного проводника на параметры RLC обмотки и распределение электрического поля;
- определение собственных резонансных частот обмоток большого силового трансформатора;
- идентификация перенапряжений и переходных процессов в режиме онлайн мониторинга высоковольтных вводов;
- противопожарные и защитные аспекты в вводах высоковольтных трансформаторов;
- будущие тенденции в онлайн-мониторинге трансформаторов;
- стратегия долгосрочного технического обслуживания силовых трансформаторов.