



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 работе Совместного коллоквиума Исследовательских Комитетов А2 «Трансформаторы» и С4 «Технические характеристики энергосистем» и заседании Исследовательского Комитета А2 «Трансформаторы» в г. Цюрих, Швейцария, с 8 по 14 сентября 2013 года



Отчет подготовил:

Ларин Василий Серафимович
к.т.н., представитель РНК СИГРЭ в
исследовательском комитете А2
«Трансформаторы», начальник отдела
трансформаторов ФГУП ВЭИ

Контактные данные:

e-mail: vlarin@vei.ru
Тел: (495) 361-90-69

Дата составления отчета:

25.01.2014

Москва 2014

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Программа коллоквиума	5
3. Обзор докладов открытой сессии	7
3.1. ПТ 1 «Взаимодействие между трансформатором и электрической системой»	7
3.2. ПТ 2 «Опыт эксплуатации фазоповоротных трансформаторов».....	14
3.3. ПТ 3 «Планирование сетей в контексте парка состаренных трансформаторов»	20
4. Обзор докладов постер-сессии	29
4.1. ПТ 1 «Взаимодействие между трансформатором и электрической системой»	29
4.2. ПТ 2 «Опыт эксплуатации фазоповоротных трансформаторов».....	35
4.3. ПТ 3 «Планирование сетей в контексте парка состаренных трансформаторов»	35
5. Практические семинары	42
6. Заседание Исследовательского комитета А2 «Трансформаторы»	43
7. Техническая выставка	48
8. Технические экскурсии	48
Заключение.....	52

1. Введение

В период с 8 по 14 сентября 2013 года в г. Цюрих, Швейцария на базе Швейцарской высшей технической школы (Swiss Federal Institute of Technology, ETH) прошел совместный коллоквиум Исследовательских Комитетов А2 «Трансформаторы» и С4 «Технические характеристики энергосистем» Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ).

Официальный сайт коллоквиума: <http://www.cigre2013zurich.org/>

В работе совместного коллоквиума комитетов А2 и С4 приняли участие представители компаний – производителей трансформаторного оборудования и комплектующих, систем диагностики и мониторинга, представители электроэнергетических компаний, научно-исследовательских и образовательных институтов (рисунок 1.1). Всего было зарегистрировано около 250 участников из 38 стран мира.



Рисунок 1.1 – Групповое фото участников совместного коллоквиума комитетов А2 и С4

В рамках совместного коллоквиума комитетов А2 и С4 состоялись:

- открытая сессия – доклады приглашенных докладчиков и обычные устные доклады (рисунок 1.2);
- постер-сессия;
- практический семинар;
- закрытые заседания комитетов и рабочих групп;
- техническая выставка;

- технические экскурсии.

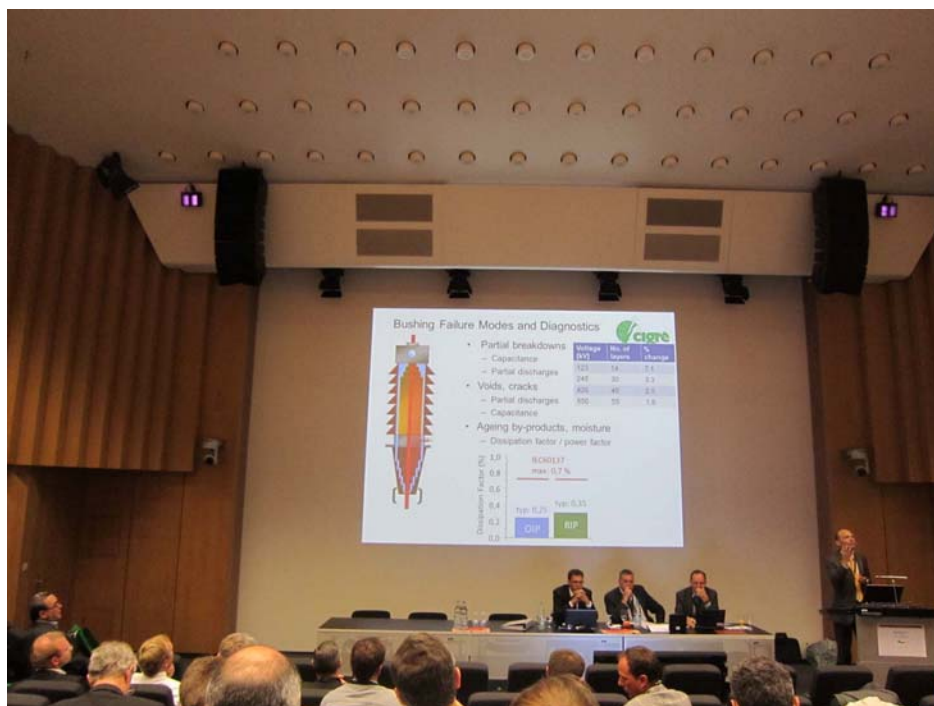


Рисунок 1.2 – Открытая сессия совместного colloквиума комитетов А2 и С4

Предпочтительные темы (ПТ) совместного colloквиума СИГРЭ:

ПТ 1: Взаимодействие между трансформатором и электрической системой

- резонансные и феррорезонансные явления между трансформаторами и электрической системой, смещение постоянным током, эффект геомагнитно-индуцированных токов, включение трансформаторов совместно с линиями, токи включения; эффекты, связанные с работой разъединителей; влияние управляемых шунтирующих реакторов, применение нелинейных ограничителей перенапряжений;

- точное моделирование сети с трансформаторами как ключевыми элементами, применение частотного анализа реакции обмоток для моделирования, взаимосвязь между электромагнитными переходными процессами и процедурой координации изоляции;

- интеграция возобновляемых источников энергии: потоки мощности, использование понижающих трансформаторов в качестве повышающих, динамическая нагрузка, регулирование.

ПТ 2: Опыт эксплуатации фазоповоротных трансформаторов

- применение и преимущества;

- технические требования, производство, транспортировка и установка фазоповоротных трансформаторов;

- характеристики, надежность, эксплуатация и обслуживание.

ПТ 3: Планирование сетей в контексте парка состаренных трансформаторов

- индикаторы старения трансформатора для обслуживания и новых инвестиций;
- эффективность трансформаторов, полная стоимость владения;
- практика нагрузки и перегрузки трансформаторов;
- онлайн-диагностика и мониторинг;
- методы предотвращения крупных аварий, требования и практика к резервным трансформаторам.

По этим предпочтительным темам было отобрано 73 доклада, из них 46 – устные доклады и 27 – постерные (стендовые) доклады. Распределение докладов по количеству среди предпочтительных тем показано в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Распределение докладов по предпочтительным темам

Предпочтительная тема	ПТ1	ПТ2	ПТ3	ПТ1+ПТ2+ПТ3
Устные доклады	14	12	20	46
Постерные доклады	11	2	14	27
Всего докладов	25 (34%)	14 (19%)	34 (47%)	73 (100%)

2. Программа коллоквиума

9 сентября 2013 - Понедельник

8:30 – 9:15 – Открытие конференции и приветственные выступления:

- Pascal Müller – председатель национального комитета Швейцарии;
- Klaus Fröhlich – Президент СИГРЭ;
- Claude Rajotte – председателя ИК А2;
- Pouyan Pourbeik - председатель ИК С4.

9:15 – 16:10 – Открытая сессия – ПТ 3 «Планирование сетей в контексте парка состаренных трансформаторов»:

- приветственное слово членов президиума – Peter Cole (Австралия) и Pierre Lorin (Швейцария);
- основной доклад – Pierre Boss (Швейцария);
- устные доклады и их обсуждение.

16:10 – 18:00 – Постер-сессия (вторая половина дня).

10 сентября 2013 – Вторник

8:30 – 13:00 – Открытая сессия – ПТ 1 «Взаимодействие между трансформатором и электрической системой»

- приветственное слово членов президиума – Angelica Rocha (Бразилия) и René Wimmer (Германия);

- основной доклад – Yukiyasu Shirasaka (Япония);

- устные доклады и их обсуждение.

14:00 – 18:00 – Открытая сессия – ПТ 2 «Опыт эксплуатации фазоповоротных трансформаторов»:

- приветственное слово членов президиума – Danielle McNabb (Канада) и Jos Veens (Нидерланды);

- основной доклад – Sheila Batey (Великобритания);

- устные доклады и их обсуждение.

11 сентября 2013 – Среда

Открытые практические семинары:

- JWG A2/C4.39 (309) – «Электрические переходные взаимодействия между трансформатором и электрической системой»;

- A2.33 – «Практика пожаробезопасности»;

- D1.30 – «Стабильность жидкостей к окислению»;

- A2.36 – «Руководство по процессу закупки трансформаторов»;

- C4.307 – «Резонансы и феррорезонансы в электрических сетях».

Заседания рабочих групп комитетов A2 и C4.

12 сентября 2013 – Четверг

Закрытые рабочие заседания комитетов A2 и C4.

13 сентября 2013 – Пятница

Технические экскурсии (по выбору):

- ABB Micafil Bushing (производство трансформаторных вводов с твердой изоляцией);

- Weidmann (производство электрокартона и изделий из него для трансформаторов) и гидроэлектростанции;

- электростанции «Grimsele» в Швейцарских Альпах.

3. Обзор докладов открытой сессии

3.1. ПТ 1 «Взаимодействие между трансформатором и электрической системой»

ID019. *Усовершенствование программы испытаний трансформаторов сверхвысокого напряжения для Hydro-Québec с целью предотвращения повреждений от внутренних высокочастотных резонансов (Improving Hydro-Québec's EHV Transformer Test Program to Prevent Failures due to Internal High-Frequency Resonances. Marc-Olivier Roux, Claude Rajotte, Pierre Riffon; Hydro-Québec, Канада)¹*

В докладе отмечено, что установленные МЭК 60073-3 схемы испытаний электрической прочности изоляции при воздействии напряжений грозových импульсов, в которых следует заземлять все неиспытываемые выводы обмоток, не отражают все возможные условия работы трансформаторов и являются недостаточными для надежного испытания изоляции трансформаторов в отношении резонансных перенапряжений в обмотках. В частности, в эксплуатации нередко бывают ситуации, когда трансформаторы работают с ненагруженными обмотками, в которых даже в случае их защиты ограничителями перенапряжений возможно развитие резонансных перенапряжений. Авторами предложено дополнить стандартную процедуру испытаний трансформаторов 735 кВ специальными (по требованию заказчика) испытаниями напряжением грозových импульсов, в которых выводы неиспытываемых обмоток разземляются и защищаются ограничителями перенапряжений.

ID020. *Включение трансформатора от удаленного слабого источника напряжения – два практических примера (Transformer energization from remote weak voltage sources – two study cases. Lubomír Kočíš u Martin Švancar; EGU- HV Laboratory a.s., Чешская республика)*

В докладе рассмотрены два случая подключения генераторных трансформаторов к «слабым» удаленным источникам питания – сетям малой мощности – посредством линий электропередач длиной несколько километров. Представлены результаты компьютерного моделирования и отмечено, что при определенных сочетаниях параметров возможно развитие параллельного феррорезонанса между трансформатором и питающей линией.

ID021. *Полевые измерения переходного восстанавливающегося напряжения на РПН с вакуумными камерами и сравнение с результатами моделирования (On-site Transient Recovery Voltage (TRV) measurement in OLTC with vacuum interrupter in*

¹ Здесь и далее названия докладов даны в переводе автора отчета.

comparison with simulation results. Johannes Gebauer, Axel Krämer, Thomas Strof, Hartmut Sakwa, Oliver Sterz – Maschinenfabrik Reinhausen, Германия; Paul Dyer – UK Power Networks, Англия; Deepak Maini – Wilson Transformer Co Pty Ltd, Австралия)

В докладе представлены результаты полевых измерений переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) на РПН с вакуумными камерами, которые были проведены с целью определения электрических воздействий на одной ступени регулирования регулировочной обмотки трансформатора. Измерения проведены на трансформаторе мощностью 66,6 МВА напряжением 132 кВ с устройством РПН типа VRC III 550Y-72,5/B-10 1W. Для обеспечения регистрации высокочастотных ПВН была выполнена специальная доработка контактора РПН с установкой двух вспомогательных проходных изоляторов. Отмечено, что по результатам измерений не выявлено значимых перенапряжений, вызванных работой РПН; опасения о перенапряжениях в трансформаторе в результате работы РПН с вакуумными камерами не подтвердились и выбор таких РПН для рассмотренного применения следует считать оправданным.

ID031. *Применение управляемых шунтирующих реакторов в сетях высокого напряжения (Application of Variable Shunt Reactors in High Voltage Networks. Kjetil Ryen, Øyvind A. Rui – Statnett SF, Осло, Норвегия; Claes T. Bengtsson – ABB, Швеция)*

В докладе рассмотрены вопросы применения управляемых шунтирующих реакторов (УШР) производства компании АВВ (рисунок 3.1). Отмечено, что в сетях Норвегии уже находятся в работе восемь УШР (из них 6 шт. – 420 кВ, 90/120-200 Мвар и 2 шт. – 300 кВ, 80-150 Мвар), в 2013 году будет установлено еще семь единиц, а к 2018 году планируется установка дополнительно шесть единиц. В конструкции реакторов АВВ (рисунок 3.2) регулирование мощности реакторов выполнено ступенчато путем переключения с помощью РПН отпаек отдельной регулировочной обмотки или обмоток, расположенных снаружи основной обмотки. Возможный диапазон регулирования зависит от класса напряжения реактора и равен примерно двухкратной величине. Отмечено, что в планах компании разработка УШР большей мощности (300 Мвар) и устройства РПН с тонким и грубым регулированием для применения в УШР.



Рисунок 3.1 – Управляемый шунтирующий реактор 120-200 Мвар, 420 кВ, используемый в электрических сетях Норвегии



Рисунок 3.2 – Активная часть УШР 50-100 Мвар, 242 кВ

ID044. *Электромагнитные переходные процессы вследствие взаимодействия между трансформаторов и электрической системой при воздействии геомагнитно-индуктированных токов (Electromagnetic transients due to interaction between power transformers and network during a GIC attack. S. A. Mousavi, C. Carrander, G. Engdahl – Royal Institute of Technology, KTH, Stockholm, Sweden)*

Рассмотрены вопросы воздействия на силовые трансформаторы геомагнитно-индуктированных токов (ГМИТ), возникающих в линиях электропередач в результате активности Солнца и представляющих собой медленно изменяющийся постоянный ток. В трансформаторах с соединением обмоток в звезду с заземленной нейтралью такой ток может привести к насыщению стали, увеличению потерь и перегреву их магнитной системы. В докладе представлены результаты расчетных исследований и отмечено о значительном влиянии типа трансформатора, схемы соединения обмоток, параметров сети на процессы при воздействии ГМИТ.

ID052. *Соединение с электрической сетью и анализ проектных решений морской ветровой электростанции Triton Knoll (Triton Knoll Offshore Wind Farm Connection and Design Studies. K. L. Koo, Z. Emin – Parsons Brinckerhoff, Великобритания; S. Wijesinghe, D. Griffiths – RWE NPower Renewables, Великобритания)*

Морские ветровые электростанции (МВЭ) соединяют, как правило, с расположенными на берегу подстанциями магистральной сети с помощью кабелей переменного напряжения. Проект МВЭ «Triton Knoll» включает строительство свыше 200 ветроэнергетических установок в Северном море в 33 км от побережья Англии. Проектная установленная мощность МВЭ «Triton Knoll» составляет до 1200 МВт. Для передачи

столь большой мощности планируется применить кабельную линию 220 кВ общей длиной 114,2 км, из них 54,5 км – подводный кабель. Генерируемая реактивная мощность кабельной линии оценивается значением 330 Мвар. Это обстоятельство, а также значительный диапазон изменения генерируемой мощности электростанции в зависимости от скорости ветра, которая изменяется в широких пределах на протяжении дня, недели и в разные периоды года, требует применения соответствующих решений по компенсации реактивной мощности, в том числе установки шунтирующих реакторов со стороны морской подстанции. В статье рассмотрены ряд возможных вариантов компенсации реактивной мощности и сделаны выводы о предпочтительности отдельных вариантов по условиям минимизации потерь в системе и уменьшения требуемого диапазона регулирования трансформаторов.

ID053. *Краткий обзор резонансов и феррорезонансов в электрических системах (An Overview of Resonance and Ferroresonance in Power Systems. Z. Emin – Parsons Brinckerhoff, Великобритания; M. Martinez Duro – EdF, Франция; M. Val Escudero – Eirgrid, Ирландия)*

Доклад представлен от имени рабочей группы СИГРЭ С4.307. В докладе приведен краткий обзор ожидаемой к публикации Технической брошюры СИГРЭ «Резонансы и феррорезонансы в электрических системах». Рассмотрены различные конфигурации сети, которые могут приводить к резонансным и феррорезонансным явлениям. Рассмотрены вопросы резонансов в компенсированных линиях, феррорезонансные процессы в схемах с электромагнитными трансформаторами напряжения и силовыми трансформаторами, а также меры по предотвращению резонансов и феррорезонансов.

ID059. *Влияние расчетных моделей трансформаторов на переходное восстанавливающееся напряжение при подпитываемых от трансформаторов коротких замыканиях на двух подстанциях в Бразилии (Impact of transformer modeling on Transformer-fed fault TRVs in Two Brazilian Substations. A.L. Heinlein – TBE – Transmissoras Brasileiras de Energia; A.C.O. Rocha, D.H.V. Lisboa – Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG); P.A.P. Lima – WEG T&D; S.A. Morais, T.A.O. Rosa – SNC-Lavalin Marte; Бразилия)*

В докладе рассмотрены переходные процессы при отключении короткого замыкания (КЗ) выключателем, который установлен непосредственно у силового трансформатора, а короткое замыкание происходит за отключаемым трансформатором. Отмечено, что хотя ток КЗ в этом случае не превышает предела отключающей способности выключателя, но переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН) за счет взаимодействия трансформатора с электрической сетью имеет большую скорость

роста и может превышать нормируемые для выключателей пределы этого параметра. Результаты моделирования высокочастотных ПВН в значительной степени зависят от используемых расчетных моделей силовых трансформаторов. Общепринятые упрощенные расчетные модели не отражают в полной мере частотной зависимости входного сопротивления трансформаторов и могут приводить к завышенным расчетным воздействиям и, как следствие, к неоправданному выбору более дорогого оборудования при проектировании подстанций. По выводам авторов, детализированные расчетные модели трансформаторов дают более правдоподобные результаты и позволяют тем самым избежать неоправданного увеличения стоимости при проектировании подстанций.

ID063. *Включение трансформаторов в систему с кабельными линиями и КРУЭ (Switching of Transformers in Cable Connected Systems with GIS. Th. Aschwanden, F. Imhof – Kraftwerke Oberhasli AG; G. Koepl – Koepl Power Experts, Швейцария)*

В докладе рассмотрены резонансные перенапряжения, возникающие при включении в систему посредством КРУЭ силовых трансформаторов вместе с подключенными к ним кабельными линиями. Представлены результаты расчетного исследования переходных процессов в системе, содержащей подстанцию 150/220 кВ с КРУЭ 150 кВ и подключенными к ней через кабельные линии блочные трансформаторы. При моделировании трансформаторы в схеме замещения представлялись их входной емкостью. Рассмотрен вариант подавления резонансных перенапряжений посредством установки имеющих сравнительно небольшое рабочее напряжение ОПН, подключаемых к экранам питающих трансформаторы кабельных линий со стороны подстанции. Отмечено, что применение такого простого и экономичного решения позволяет существенно снизить воздействия на изоляцию силовых трансформаторов.

ID064. *Усовершенствование конструкции обмоток трансформаторов для ветряных турбин для более надежной работы при резонансных перенапряжениях (Upon the improvement of the winding design of wind turbine transformers for safer performance within resonant overvoltages. Amir Hayati Soloot, Hans Kristian Høidalen – Electrical Power Eng. Dep.-Norwegian University of Science and Technology- Trondheim N-7491; Bjørn Gustavsen – SINTEF Energy Research-Trondheim N-7465, Норвегия)*

Поскольку коммутационные перенапряжения и короткие замыкания на землю могут стать причиной резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов, одним из путей решения этой проблемы является проектирование трансформаторов с обеспечением требуемой электрической прочности изоляции с учетом условий их применения. В докладе приведены результаты экспериментальных исследований влияния типа и конструкции обмоток на распределение напряжения в первичной обмотке и

наводимые на вторичной обмотке трансформатора напряжения, вызванные резонансными явлениями. Исследования выполнены на прототипе трехфазного трансформатора напряжением 11/0,23 кВ мощностью 500 кВА, имеющего фольговые обмотки низшего напряжения (НН) и обмотки высшего напряжения (ВН) трех разных типов – слоевую, дисковую и непрерывную; все обмотки ВН имели одинаковые число витков, высоту, радиальный размер и сечение провода. По результатам исследований получено, что наименьший уровень напряжений, наведенных на вторичной обмотке на резонансных частотах, имеет место в случае непрерывной обмотки ВН, а наибольший уровень – в случае слоевой обмотки ВН. При этом на основных резонансных частотах в непрерывной обмотке ВН получены значительно большие значения напряжений относительно земли и градиенты напряжений по сравнению со слоевой и дисковой обмотками ВН. На основании полученных результатов авторы делают вывод о предпочтительности применения дисковых обмоток в трансформаторах для ветряных турбин.

ID073. *Резонансы в трансформаторе, вызванные удаленным включением в кабельной системе (Transformer resonance caused by remote closing of cable system. T.Kobayashi, K.Aoki – Tokyo Electric Power Company; S.Yoshida – Toshiba Corporation, Япония)*

В докладе рассмотрены резонансные перенапряжения на примере кабельной системы 500 кВ, где имело место повреждение силового трансформатора, а также феррорезонансные перенапряжения на примере кабельной системы 275 кВ. В первом примере повреждение автотрансформатора 500/275 кВ в результате резонансных перенапряжений произошло непосредственно после коммутации на соседней подстанции, связанной кабельной линией 500 кВ, во время пускового периода, когда автотрансформатор проходил испытание длительным рабочим напряжением и был ненагружен. В результате разборки автотрансформатора на заводе были выявлены следы перекрытия на землю с нижней части последовательной обмотки, вблизи линейного вывода стороны среднего напряжения (СН). По итогам моделирования в ЕМТР было установлено, что уровень перенапряжений превышает испытательное напряжение коммутационного импульса стороны СН. Для защиты от перенапряжений стороны СН предложена установка ОПН. Во втором примере представлены результаты анализа феррорезонансных перенапряжений при неполнофазном включении в сеть кабельной линии и силового трансформатора. По результатам моделирования получено, что выделяемая энергия в ОПН, установленного со стороны трансформатора, значительно варьируется в зависимости от положения переключающего устройства трансформатора. С

целью снижения выделяемой в ОПН энергии предложено ограничить диапазон регулирования трансформатора.

ID077. *Краткий обзор исследований включения трансформаторов (An Overview of Transformer Energization Studies. Z. Emin – Parsons Brinckerhoff, Великобритания; M. Martinez Duro – EdF, Франция; M. Val Escudero – Eirgrid, Ирландия)*

Доклад представлен от имени рабочей группы СИГРЭ С4.307. В докладе приведен краткий обзор ожидаемой к публикации Технической брошюры СИГРЭ «Включение трансформаторов в электрические системы: Руководство по изучению». Рассмотрен ряд вопросов, связанных со включением трансформаторов в электрическую систему, таких как токи включения, резонансные перенапряжения, моделирование элементов электрических сетей и процессов включения, а также мероприятия по защите от перенапряжений.

ID084. *Подход к анализу резонансных явлений и перенапряжений при взаимодействии между трансформатором и внешней сетью² (Approach to analysis of resonance phenomena and overvoltages due to interaction between power transformer and external network. В.С.Ларин – ФГУП ВЭИ; Д.А. Матвеев и А.В. Жуйков – НИУ «МЭИ», Москва, Россия)*

Представлены результаты исследований резонансных явлений в обмотках трансформаторов. Изложен подход к численному моделированию и показаны возможности компьютерной программы ТТ, разработанной для расчёта параметров схемы замещения трансформатора и импульсных перенапряжений в его обмотках. Для исследования взаимодействия трансформатора с электрической сетью применена ещё одна разработанная авторами статьи программа EMTLab, в которую параметры модели трансформатора экспортируются из программы ТТ. Предложен аналитический способ оценки частот колебаний в системе «питающий кабель – трансформатор», основанный на применении входных ёмкостей трансформатора. Показано, что неучет входного сопротивления трансформатора при оценке частот колебаний системы «питающий кабель – трансформатор» может приводить к существенным ошибкам, а оценка частот колебаний по предложенному подходу дает приемлемое совпадение результатов расчёта с экспериментом.

ID116. *Феррорезонансные перенапряжения при управляемом включении больших повышающих трансформаторов, последствия и меры противодействия (Ferroresonance Overvoltages at Controlled Closing of a Large Step-up Transformer, Consequences and*

² Доклад на русском языке с дополнением опубликован в журнале «Энергетик», 2013, №12.

Countermeasures. Olav Knudsen, Michael Stanek – ABB Switzerland Ltd; Georg S. Koepl – Koepl Power Experts, Швейцария)

В докладе приведен расчетный анализ произошедшего однофазного короткого замыкания в КРУЭ, вероятной причиной которого являются феррорезонансные перенапряжения при управляемом включении блочного трансформатора 21/405 кВ мощностью 932 МВА в электрическую сеть 380 кВ. Характерными особенностями описываемого случая являются возможность работы трансформатора с разземлением нейтрали с целью ограничения токов однофазного КЗ в сети 380 кВ (большую часть времени трансформатор работает с разземленной нейтралью) и наличие управляемой коммутации трансформатора с целью ограничения токов включения³. В условиях работы с разземленной нейтралью управляемая коммутация реализована путем одновременного включения первых двух фаз в максимум соответствующего междуфазного напряжения и последующего включения оставшейся фазы спустя 35 мс. По мнению авторов, изолированная нейтраль и управляемое включение, а также сравнительно большое время между коммутациями фаз стали причиной развития феррорезонансных перенапряжений вследствие взаимодействия нелинейной индуктивности неподключенной фазы трансформатора и емкости этой фазы. В качестве контрмер предлагается заземление нейтрали трансформатора, по крайней мере при его включении в сеть, адаптация алгоритма управляемого включения, снижение интервала времени между включениями разных фаз до четверти периода, а также установка ОПН со стороны трансформатора.

3.2. ПТ 2 «Опыт эксплуатации фазопоротных трансформаторов»

ID017. *Фазопоротные трансформаторы – проблема соединения двух баков (Phase-Shifting Transformers – The Challenge of Connecting Two Tanks. Ch. Krause, G. Schenk, B. Schlittler, U. Strubreiter, K.-H. Witte – Weidmann Electrical Technology AG, Швейцария)*

В докладе рассмотрены проблемы соединения двух баков фазопоротных трансформаторов с помощью отводов, размещаемых внутри маслонеполненных соединительных адаптеров. Представлено соответствующее техническое решение (рисунок 3.3), основанное на применении в каждом из двух баков узла для вывода высоковольтного отвода сквозь заземленную стенку (Faltenbalg), и описаны преимущества этого решения.

³ *Прим. автора отчета:* Еще одной характерной особенностью является установка ОПН в КРУЭ со стороны приходящей кабельной линии, а не со стороны блочного трансформатора. В этом случае при неполнофазном включении третья фаза трансформатора оказывалась незащищенной соответствующим ОПН.

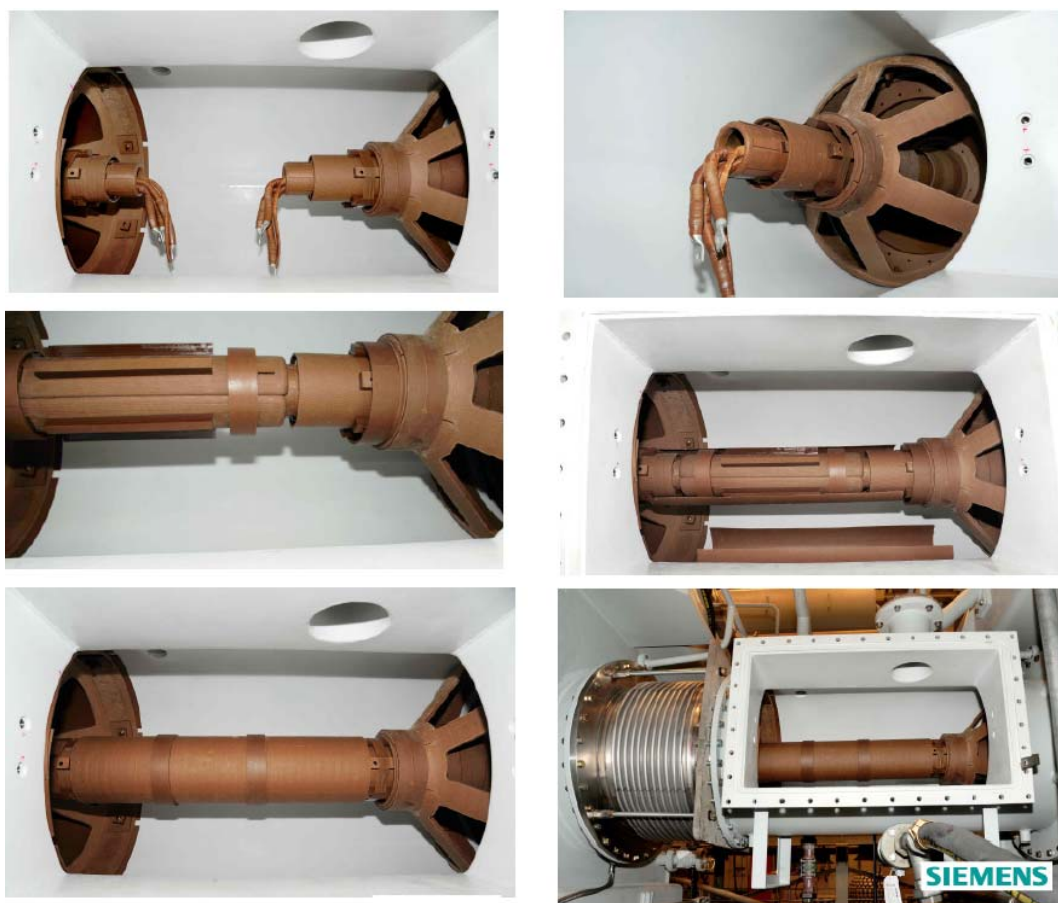


Рисунок 3.3 – Соединение двух баков фазоповоротных трансформаторов
(на примере трансформатора компании Сименс)

ID022. *Распределение магнитного потока в магнитопроводе фазоповоротных трансформаторов (Flux distribution in transformer cores of Phase-Shifting transformers. Björn Riemer, Kay Hameyer – Institute of Electrical Machines, RWTH Aachen University, Aachen, Германия; Dietrich Vonmann – ABB AG, Bad Honnef, Германия)*

Особенность фазоповоротных трансформаторов состоит в том, что при работе ток нагрузки имеет фазовый сдвиг около $\pm 90^\circ$ к напряжению возбуждения, что эквивалентно емкостной или индуктивной нагрузке обычного трансформатора. В результате наложения магнитных полей возбуждения и полей рассеяния возможно значительное изменение магнитного потока в элементах магнитной системы. В докладе анализируется влияние составляющей магнитного потока, связанного с нагрузкой, на изменение общего магнитного потока в стержне магнитной системы. Для анализа использована модель трансформатора с сосредоточенными параметрами, которая состоит из активных сопротивлений обмоток, определенных аналитически, и индуктивностей, определенных по двумерной конечно-элементной модели. Отмечено, что

использованием двухмерного конечно-элементного моделирования позволяет определить долю связанного с нагрузкой потока в стержне с достаточной точностью.

ID070. *Опыт полевых испытаний фазопоротных трансформаторов в Великобритании (Experience with Field Testing of Phase-Shifting Transformers in Great Britain. Norbert Gilbert – Doble Engineering, США; Paul Jarman – National Grid, Великобритания; John Lapworth, Simon Ryder – Doble Engineering, Великобритания)*

Особенностью конструкции фазопоротных трансформаторов является наличие двух активных частей, связанных электрически между собой, что значительно затрудняет их отдельные испытания и проверки с целью оценки состояния в полевых условиях. В докладе описан опыт полевых испытаний фазопоротных трансформаторов и сообщено о разработке методологии и стандартной процедуры для оценки их состояния, включающей проведение измерений токов намагничивания, измерения емкости обмоток и тангенса угла диэлектрических потерь, сопротивления обмоток и других параметров, а также высоковольтные испытания индуктированным напряжением.

ID074. *Опыт Японии по применению фазопоротных трансформаторов (Japanese Experience with the use of Phase-Shifting transformers. Makoto Kadowaki – Hitachi Ltd.; Kazuhito Dobashi – Tohoku Electric Power Company, Япония)*

В докладе представлены примеры применения фазопоротных трансформаторов в электрических сетях Японии, дано сравнение конструкций фазопоротных трансформаторов и силовых трансформаторов с фазопоротной функцией. Приведено описание улучшенной конструкции силового трансформатора с фазопоротной функцией, отличающейся меньшими габаритами и реализацией функций регулирования напряжения и фазы в одном баке трансформатора без дополнительного вольтодобавочного трансформатора.

ID076. *Исследование типовых междуфазных уровней напряжения коммутационных импульсов на фазопоротных трансформаторах 275 кВ (Study of typical phase-phase Switching Impulse Voltage Levels on a 275 kV Phase Shifting Transformer. J. Veens, B. Simons, L. Dorpmanns – Smit Transformatoren B.V., Нидерланды)*

В докладе рассмотрены особенности испытаний электрической прочности изоляции напряжением коммутационного импульса фазопоротных трансформаторов 275 кВ с квадратурным регулированием. В стандартах МЭК и IEEE для силовых трансформаторов подразумевается, что, в общем случае, при испытании коммутационным импульсом изоляции одной фазы напряжение на неиспытываемых фазах будет составлять около –50%, таким образом, напряжение на междуфазной изоляции будет около 150% от испытательного напряжения относительно земли. В случае фазопоротных

трансформаторов напряжение на междуфазной изоляции при испытаниях может оказаться значительно больше 150%. В докладе представлены результаты моделирования, измерений при питании от низковольтного генератора импульсов и при импульсных испытаниях напряжений на междуфазной изоляции фазопоротного трансформатора 275 кВ. Отмечено, что расчеты и измерения при низком напряжении для стандартной формы коммутационных импульсов дают несколько завышенные результаты междуфазного напряжения по сравнению с результатами измерений при импульсных испытаниях. Это обстоятельство авторы доклада связывают с тем, что при импульсных испытаниях фактические значения длительности фронта и импульса оказываются значительно больше значений, указанных в стандартах.

ID099. *Фазопоротные трансформаторы для управления потоками мощности – опыт Бразилии (Phase Shifting Transformer on Power Control - A Brazilian Experience. A.L.N. Vita, G.M. Bastos, F.C. Neto – Furnas Centrais Elétricas; Dr. J.C. Mendes – ABB, Бразилия)*

В докладе описан опыт применения фазопоротного трансформатора напряжением 138 кВ проходной мощностью 400 МВА (рисунок 3.4), установленного на подстанции Angra dos Reis последовательно с трехфазной группой 3x133 МВА однофазных автотрансформаторов 500/138 кВ для управления перетоками мощности между системами 138 кВ и 500 кВ. Фазопоротный трансформатор – трехфазного исполнения, имеет диапазон регулирования фазового сдвига $\pm 21,6^\circ$. Отмечено, что применение фазопоротного трансформатора значительно улучшило ситуацию с энергоснабжением региона без значительных изменений в структуре энергосистемы.



Рисунок 3.4 – Фазопоротный трансформатор напряжением 138 кВ проходной мощностью 400 МВА на подстанции Angra dos Reis

ID104. *Анализ конструкций трансформаторов с двумя активными частями (Analysis of 2 Core Transformer Designs. R. Ahuja u R. M. Del Vecchio – SPX Transformer Solutions, Inc., США)*

Описан подход к расчету токов и напряжений в обмотках трансформаторов с двумя активными частями на основе уравнений многообмоточного трансформатора. Сообщено о разработке соответствующей программы для анализа конструкций трансформаторов с двумя активными частями и отмечено о том, что токи в обмотках, полученные в расчетах по разработанной программе, могут быть использованы в других программах для расчета потерь, перегревов, электродинамических сил и усилий. Рассмотрено применение этого подхода к расчету параметров фазоповоротного трансформатора с двумя активными частями.

ID109. *Фазоповоротный трансформатор 1200 МВА 400 кВ $\pm 40^\circ$: применение, преимущества, описание реализации и особенности работы (1200 MVA, 400 kV, $\pm 40^\circ$ Phase Shifting Transformer: application, benefits, realization description and performance aspects. Günther LINORTNER, Martin KALCHER, Mario SCALA, René WIND – SIEMENS, Германия; Rafael MIHALIČ, Uni Ljubljana, Словения; Pavel OMAHEN, Marko HRAST, Aleksander POLAJNER – ELES, Словения)*

В докладе описан опыт реализации проекта в электрических сетях Словении по применению двух включенных параллельно фазоповоротных трансформаторов напряжением 400 кВ мощностью 600 МВА каждый. Потребность в фазоповоротных трансформаторах столь большой мощности продиктована необходимостью регулирования перетоков мощности в энергосистеме Европы между Австрией, Хорватией и Италией. Каждый фазоповоротный трансформатор трехфазного исполнения, состоит из двух активных частей, размещенных в отдельных баках, и имеет диапазон регулирования фазового сдвига $\pm 40^\circ$. Регулирование фазового сдвига выполняется автоматической системой управления в зависимости от требуемого уровня перетока мощности на границе Словения – Италия. Отмечено, что в результате реализации проекта удалось снизить до 50% потери на транзит электроэнергии в Италию.

ID110. *Заводские испытания крупных фазоповоротных трансформаторов (Factory Testing of Large Phase Shifting Transformers. Ian McConnachie, Sheila Batey, Daniel Hardy, William Young – Alstom Grid; Paul Jarman – National Grid, Великобритания)*

Фазоповоротные трансформаторы большой мощности, как правило, состоят из двух электрически связанных активных частей, размещаемых либо в одном баке, либо в двух отдельных баках. Наличие двух активных частей и сложных взаимосвязей между ними усложняют процесс заводских испытаний таких трансформаторов. Так, например, с

целью проведения ряда испытаний, таких как испытание индуктированным напряжением, испытание на нагрев и пр., необходимо подключить напряжение от источника к обмоткам, не связанным со штатными вводами фазопоротных трансформаторов («линия» и «источник»), и для целей испытаний в конструкции таких трансформаторов предусматривают возможность установки на время испытаний испытательных вводов для доступа к этим обмоткам. В докладе рассмотрены практические вопросы проведения типовых и приемо-сдаточных испытаний, включая испытания на нагрев, испытания электрической прочности изоляции и измерения уровня звука.

ID112. *Применение фазопоротных трансформаторов в магистральных сетях Чили (Use of phase-shifting transformers in the Chilean transmission network. Gunter Fromm, Nelson Nelis, Pedro Bello, Arturo del Valle – Transelec S.A., Чили)*

В докладе описан опыт применения двух фазопоротных трансформаторов для управления потоком мощности в сети 220 кВ и перераспределения потоков мощности по сетям 110 кВ и 500 кВ (рисунок 3.5). Трансформаторы имеют номинальное напряжение 230 кВ, номинальную проходную мощность 235/290/350 МВА и диапазон регулирования фазового сдвига +/-18,5°. В докладе представлены основные технические параметры трансформаторов, алгоритмы управления фазовым сдвигом, построение системы управления и описание системы релейной защиты.

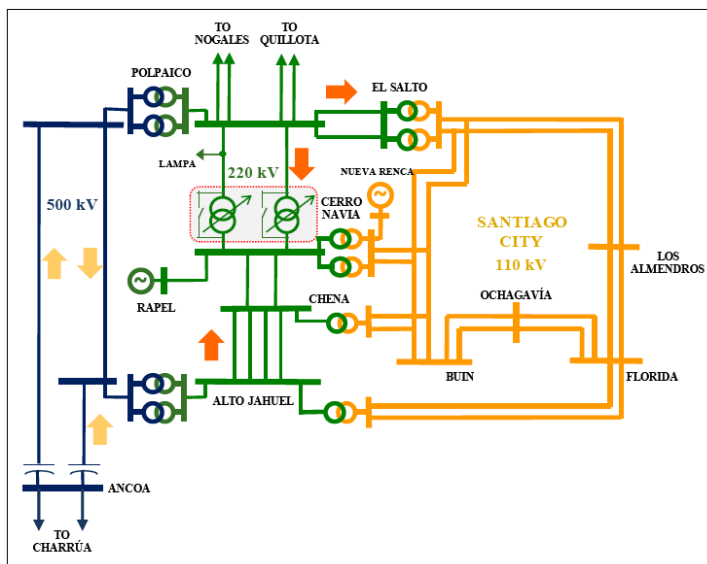


Рисунок 3.5 – Упрощенная однолинейная схема

ID113. *Применение фазопоротных трансформаторов – основа обеспечения управления потоками мощности в Нью-Йорке (Application of phase shifting transformers - Essential to facilitate load flow control in NYC. A. Schrammel, St. Ausserhofer – Siemens AG Österreich, Transformers Weiz, D. Chu – Consolidated Edison Company of New York, США)*

В докладе рассмотрены вопросы проектирования фазоповоротного трансформатора напряжением 345 кВ мощностью 575 МВА, имеющего диапазон фазового сдвига +/- 40° и предназначенного для замены существующего фазоповоротного трансформатора. Отмечено, что помимо типовых требований к трансформатору предъявлялись особые требования к стойкости к геомагнитно-индуцированным токам, к обеспечению низкого уровня звука, к возможности параллельной работы, а также габаритные ограничения и пр., что отразилось на сложности решаемой разработчиками задачи создания рассматриваемого трансформатора.

ID114. *Монтаж и обслуживание фазоповоротных трансформаторов (Assembly and Maintenance of Phase shifting transformers. Christian Ettl – Siemens AG Österreich, Transformers Weiz – Австрия)*

В докладе описан процесс монтажа на месте установки крупных фазоповоротных трансформаторов, состоящих из двух отдельных баков. Представлены пошаговые иллюстрации процесса установки основных частей, сборки соединительных адаптеров между двумя баками и соответствующих соединений между двумя активными частями, монтажа звукоизолирующих панелей, установки элементов системы охлаждения и других элементов.

3.3. ПТ 3 «Планирование сетей в контексте парка состаренных трансформаторов»

ID023. *Онлайн-мониторинг электрооборудования на крупных электростанциях (On-Line Monitoring of Electrical Apparatus in Large Power Plants. Maik Koch – Omicron Energy Solutions; Michael Lukas – Vattenfall Europe Generation AG, Германия)*

В докладе рассмотрены технические вопросы использования онлайн-мониторинга электрооборудования на крупной электростанции. Рассмотрены особенности мониторинга состояния мощных турбогенераторов, в т.ч. регистрация и подходы к обработке сигналов частичных разрядов. Изложены аспекты мониторинга состояния силовых трансформаторов, опыт интерпретации результатов анализа растворенных газов, опыт мониторинга состояния трансформаторных вводов, регистрации перенапряжений, частичных разрядов при рабочем напряжении. Отмечено об опыте реализации на энергоблоке мощностью 900 МВт тепловой электростанции комплексной системы онлайн-мониторинга, включающей мониторинг турбогенератора, силовых трансформаторов, трансформаторных вводов, измерение частичных разрядов на двух трансформаторах электрическим и ультравысокочастотным методами, а также цифровую регистрацию (осциллографирование) перенапряжений.

ID027. *Моделирование принятия решений по управлению активами с использованием индекса исправности для планирования обслуживания и замены оборудования (Asset management decision support modelling, using a health index, for maintenance and replacement planning. Mischa Vermeer, Jos Wetzter – DNV KEMA Energy & Sustainability, Нидерланды)*

В докладе рассмотрены разработки в области индексов исправности и моделирования принятия решений по эксплуатации электрооборудования. Модель принятия решений предназначена для помощи в управлении активами и объединяет в себе индексирование исправности и анализ рисков. Представлен пример реализации индекса исправности и предлагаемых моделей принятия решений в крупной энергокомпании, имеющей около двух тысяч подстанций и более двух миллионов потребителей в плотно населенных и промышленных районах Нидерландов.

ID032. *Новое средство для динамической широкомасштабной оценки состояния силовых трансформаторов (A Novel Dynamic Fleet Wide Condition Assessment Tool of Power Transformers. Luiz Cheim, Lan Lin, Poorvi Patel, John Vines – ABB, США; Pierre Lorin – ABB, Швейцария)*

В докладе представлены результаты разработки и реализации нового программного обеспечения, имеющего функции экспертной базы знаний, оценки состояния оборудования, управления рисками, обработки нерегулярных событий (ввод сведений об обслуживании и работе оборудования), хранения истории последних событий и данных диагностики состояния, а также обработки данных онлайн-мониторинга.

ID035. *Моделирование методом конечных элементов оптимальной конструкции трансформаторов (FEM simulation for optimal transformer design. M. Aigner, P. Hamberger – Siemens AG Transformers Linz; K. Hollaus, J. Schöberl – Institute for Analysis and Scientific Computing, Vienna University of Technology, Австрия)*

В докладе представлен подход к моделированию методом конечных элементов магнитных полей трансформатора, в котором реализован приближенный учет неоднородности структуры магнитопроводов, собираемых из большого числа тонких пластин электротехнической стали. Суть метода состоит в разделении базисных функций на «грубые» функции, содержащие информацию о средних значениях объемного потенциального магнитного поля, и дополнительные функции формы, которые с приемлемой точностью отражают отклонения от средних значений из-за наличия слоев тонких пластин электротехнической стали. Отмечено, что предложенный подход дает существенный выигрыш по времени при расчете магнитных полей с учетом пластин

магнитопровода по сравнению с расчетом трехмерного поля с разбиением тонких пластин электротехнической стали сеткой конечных элементов.

ID036. *Оценка коррозионности масла (Assessment of oil corrosivity. I. Atanasova-Hoehlein – Siemens E T TR; U. Sundermann – Amprion GmbH; J. Steidtner – RWE Power AG, Германия)*

В докладе затронуты вопросы коррозионности трансформаторного масла и проблемы «коррозионной серы», могущей стать причиной образования проводящих отложений на поверхности изоляции и ухудшения контактных сопротивлений переключающих устройств. Описан новый метод количественной оценки реакционно-способной серы, который включает в себя реакцию масла с иммобилизованным серебром и последующую газохроматографию.

ID039. *Проектирование силовых трансформаторов для регионов с опасностью землетрясений (Design of power transformers for earthquake hazard areas. Alexander Hackl, Peter Hamberger – Siemens AG Österreich, Transformers Linz, Австрия)*

В докладе рассмотрены вопросы проектирования трансформаторов с учетом требований сейсмостойкости. В общем случае, подтверждение способности оборудования выдерживать землетрясения может быть выполнено путем испытаний на вибростенде или расчетным путем. Однако проведение испытаний силовых трансформаторов, особенно большой мощности, на вибростендах затруднено. Для подтверждения сейсмостойкости, как правило, прибегают к соответствующим расчетам. В докладе представлена краткая характеристика существующих международных и европейских стандартов в части сейсмостойкости, рассмотрены вопросы динамических и статических расчетов сейсмостойкости трансформаторов и их сравнение, а также вопросы обеспечения сейсмостойкости трансформаторов на месте установки.

ID040. *Развитие систем мониторинга состояния силовых трансформаторов с целью повышения их достоверности (Improvements of Power Transformer Condition Monitoring Systems to Increase Their Plausibility. Jan Doncuk, Jiri Velek – CEPS, a.s., Чехия; Vaclav Mentlik – University of West Bohemia, Чехия)*

В докладе описан опыт применения систем мониторинга состояния силовых трансформаторов в магистральных электрических сетях Чехии (CEPS), где, как отмечается в докладе, такие системы устанавливаются на каждый новый трансформатор. Из имеющегося опыта эксплуатации систем мониторинга следует, что установленные системы выдают больше ложных предупреждений и сообщений об аварийной ситуации, чем правильных, что снижает доверие к таким системам. В докладе проанализирован ряд случаев, включая сгенерированные сообщения и контролируемые величины, с целью

выявления истинных причин и природы ложной генерации этих сообщений. Отмечено, что производители систем мониторинга главным образом ориентированы на разработку новых датчиков, расчетных моделей и программного обеспечения. В виду наличия значительного числа ложных сообщений авторы доклада отмечают о необходимости более детального рассмотрения вопросов правдоподобности и надежности информации от систем мониторинга.

ID041. *Метод диагностики ухудшения характеристик в результате старения силовых трансформаторов с использованием волокон целлюлозы в трансформаторном масле (Diagnosis Method of Aging Degradation for Power Transformer Using Cellulose Fibers in Insulating Oil. M. Yoshida – Chubu Electric Power Company, Япония; M.Kato and Y.Konishi – Yuka Industries, Япония)*

В докладе представлен новый метод оценки степени деградации твердой изоляции, основанный на оценке степени полимеризации находящихся в масле волокон целлюлозы. В докладе показано, что имеется хорошая корреляция между степенью полимеризации и коэффициентом преломления света волокон целлюлозы, причем для состаренных волокон целлюлозы характерен больший коэффициент преломления. Для оценки степени полимеризации предложено использовать метод дисперсной окраски (Dispersion Staining Method, DSM), позволяющий преобразовать коэффициент преломления в соответствующий цвет.

ID046. *Обнаружение и дифференциация различных источников частичных разрядов внутри и снаружи силовых трансформаторов с использованием УВЧ-сенсоров (Detection and differentiation of different partial discharges sources In and out of power transformer Using UHF sensors. G.Luna, R.Lebreton, S.Louise – ALSTOM Grid TICC, Франция)*

В докладе рассмотрены вопросы практического применения регистрации сигналов частичных разрядов (ЧР) в диапазоне ультравысоких частот⁴ (УВЧ). Представлены результаты исследований, проведенных на двух полномасштабных макетах однофазного трансформатора с установленными УВЧ-сенсорами для регистрации сигналов ЧР. Отмечено, что УВЧ метод регистрации ЧР может быть использован для определения того, где находится источник сигнала – внутри или снаружи бака, а также для локации источника ЧР внутри бака.

ID054. *Способный к быстрой переброске мобильный трансформатор с гибридной изоляцией для сетей высокого напряжения: решение против крупных событий (Fast-*

⁴ Прим. автора отчета: Радиочастоты в диапазоне 300 – 3000 МГц (ГОСТ 24375-80).

deployable HV network transformer with hybrid insulation: a solution against major events. M. Cuesto, M. Oliva, A. Prieto – ABB, Испания; J.C. Sanchez, L. Navarro – REE, Испания)

В докладе представлен мобильный автотрансформатор 400 кВ (рисунок 3.6), предназначенный для обеспечения быстрой замены в случае повреждений или необходимости вывода в ремонт установленных на подстанциях трансформаторов. Особенностью мобильного автотрансформатора является наличие нескольких уровней напряжений на сторонах среднего и низшего напряжения (СН и НН). Так, напряжение стороны СН может быть установлено равным 220, 138 или 110 кВ, а напряжение НН – 33, 26,4 и 24 кВ, что определяет возможность замены одним мобильным автотрансформатором нескольких типов автотрансформаторов 400 кВ. Номинальная мощность данного автотрансформатора составляет 250 МВА при напряжении СН 230 кВ, 120 МВА – при 138 кВ и 110 МВА – при 110 кВ. Для улучшения массогабаритных показателей мобильного автотрансформатора применена гибридная изоляция с использованием арамидной бумаги и картона в наиболее нагретых частях обмоток, за счет чего обеспечивается увеличение допустимого превышения температуры наиболее нагретой точки.

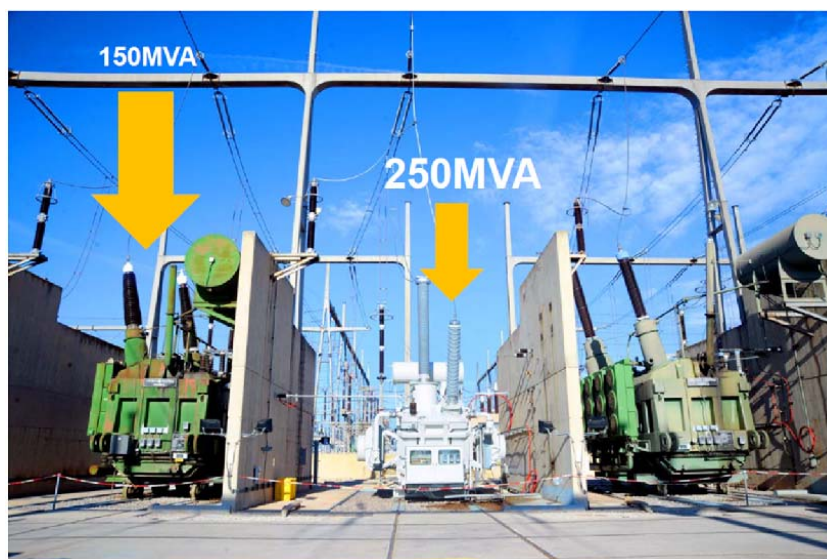


Рисунок 3.6 – Мобильный трансформатор 400 кВ 250 МВА на месте установки

ID055. *Оценка вероятности отказов длительно эксплуатируемых силовых трансформаторов, вызванных температурными напряжениями (Assessment of probability of thermal stress induced dependent failure of aged power transformers. Selma Awadallah, Jovica V. Milanović – The University of Manchester, Великобритания; Paul N. Jarman – National Grid, Великобритания)*

В докладе рассматриваются вторичные отказы трансформаторов из-за температурных воздействий на изоляцию, когда в результате выхода из строя одного

трансформатора увеличиваются нагрузка и рабочие температуры других оставшихся в работе трансформаторов, что может стать причиной каскадных повреждений. Для ранжирования трансформаторов по степени возможности вторичных отказов предложены два вероятностных индикатора – индикатор инициирования каскадных повреждений и индикатор восприимчивости к каскадным повреждениям. Отмечено, что эти индикаторы могут быть полезны при кратко- и долгосрочном планировании работы энергосистем.

ID056. *Стратегический подход к рациональному методу обслуживания и планированию обновления силовых трансформаторов (Strategic Approach to Rational Maintenance Method And Refurbishment Plan of Power Transformers . Н. Okubo – Aichi Inst. of Tech.; К. Ogata – Chubu Electric Power Co., Inc.; Т. Kobayashi – Tokyo Electric Power Co., Inc.; Y. Matsushita – Kansai Electric Power Co., Inc.; М. Kadowaki – Hitachi Ltd.; S. Yamada – Toshiba Co.; Н. Murakami – Mitsubishi Electric Co.)*

В докладе отражены вопросы планирования обновления трансформаторного парка. Отмечено, что в дополнение к оценке износа и обнаружению «неисправностей» на основе анализа растворенных газов и других методов, при планировании обновления парка трансформаторов следует принимать во внимание такие факторы, как воздействие на энергосистему, ремонтпригодность, экономический эффект при длительной эксплуатации и возможность проведения работ по обновлению. Представлены два примера оценки состояния трансформаторов и принятия решений о восстановлении/замене.

ID061. *Оценка состояния трансформаторов с использованием индекса исправности (Transformer Asset Management Using Health Index – Hungarian Practice. В. Németh, Cs. Vörös, G. Csépes – Budapest University of Technology and Economics, Венгрия)*

В докладе представлен опыт специалистов Венгрии в области экспертных систем оценки состояния силовых трансформаторов, основанных на национальных и международных методах диагностики и использовании систем мониторинга. Приведено описание используемого индекса исправности, получившего название Индикатор статуса трансформатора (TSI) и определяемого на основе рассмотрения электрических, механических и химических характеристик, эксплуатационных параметров и параметров окружающей среды. Представлен пример использования индикатора TSI для оценки состояния силовых трансформаторов распределительных сетей Венгрии.

ID071. *Приложение для мобильного телефона для мониторинга силовых трансформаторов (Mobile Phone Application for Power Transformer Monitoring. Neda Vafamand, Robert Saers, Jonas Brönmark, Björn Weström – ABB AB, Швеция)*

В докладе представлен новый подход к удаленному мониторингу состояния силовых трансформаторов с использованием смартфонов. Рассмотрены вопросы разработки и реализации приложения для мобильных телефонов, которое взаимодействует с системами мониторинга посредством беспроводной сети интернет и обеспечивает возможность и доступность мониторинга состояния трансформаторов в любом месте и в любое время. Данное приложение позволяет одновременно отслеживать состояние нескольких трансформаторов и оперативно сообщать эксплуатационному персоналу, отвечающего за эти трансформаторы, о предупреждениях и аварийных сигналах систем мониторинга.

ID078. *«Отпечаток» силового трансформатора для обслуживания по фактическому состоянию (Fingerprints for Condition Based Maintenance on Power Transformers. J. Fuhr, L. Eggimann, M. Zbinden, Th. Graenicher, Th. Heizmann – BKW Energie AG; P. Fehlmann, R. Braeunlich – FKH, High Voltage Engineering and Testing Commission; M. Haessig – Axpo Power AG, Швейцария)*

В докладе рассмотрен подход к оценке состояния трансформаторов на основе сравнения «отпечатков» – совокупности параметров, характеризующих состояние сложной системы в некоторый момент времени. Суть оценки состоит в сравнении текущего «отпечатка» с контрольным «отпечатком», сделанным когда оборудование находилось в исходном новом состоянии, например, перед пуском в эксплуатацию, после завершения монтажа на месте установки. Контрольный «отпечаток» силового трансформатора включает в себя сопротивление обмоток постоянному току, коэффициент трансформации, электрические и физико-химические характеристики масла, результаты измерений методом частотного анализа реакции обмоток, анализа диэлектрического отклика, интенсивности частичных разрядов при напряжении до 1,2 от номинального, емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, а также результаты анализа растворенных газов.

ID083. *Борьба с шумом в трансформаторах (Noise management in Transformers. Toufann Chaudhuri, Miljenko Hrkac, Grzegorz Kmita, Michal Kozupa, Philippe Stefanutti, Roberto Zannol – ABB, Италия, Польша, Швейцария)*

В докладе представлены подходы к борьбе с шумом, примеры концепций проектирования и современные техники классификации источников шума. Рассмотрены различные типы трансформаторов и методы контроля уровня шума, вопросы моделирования и современные методы измерений шума, а также влияние спектра шума на выбор соответствующего подхода к подавлению шума. Отмечено о преимуществах

применения лазерной доплеровской виброметрии для экспериментального исследования шума трансформаторов.

ID089. *Регенерация потерь в трансформаторах с помощью технологии тепловых насосов (Recovery of transformer losses by utilizing heat pump technology. H. Ristamäki, E. Virtanen – ABB, Transformers Oy; M. Hinkkanen, O. Patjas – Helen Sähköverkko Oy; M. Jouppila, H. Saksi – Suomen Lämpöpumpputekniikka Oy, Финляндия)*

В докладе рассмотрены вопросы применения технологии тепловых насосов для регенерации потерь электроэнергии силовых трансформаторов на примере городской подстанции напряжением 110/10,5 кВ с двумя трансформаторами мощностью 31,5 МВА (г. Хельсинки). Трансформаторы имеют потери холостого хода 21,2 кВт и потери короткого замыкания 154,5 кВт (трансформатор №1) и 151,1 кВт (трансформатор №2). Подстанция отапливается от центрального теплоснабжения; при этом номинальная мощность теплообменников составляет 145 кВт для отопления и 175 кВт – для подогрева воды для технических нужд. В докладе представлены предложения по использованию системы тепловых насосов для отбора тепла из контуров охлаждения трансформаторов (рисунок 3.7) и отопления сооружений подстанции, а также расчеты экономической эффективности различных вариантов систем отопления, в т.ч. на основе тепловых насосов. Отмечено, что в случае применения тепловых насосов для рассмотренной подстанции можно достичь ежегодной экономии 8 194 EURO по сравнению с традиционной системой централизованного отопления, а также обеспечить снижение температуры трансформаторов на несколько градусов.

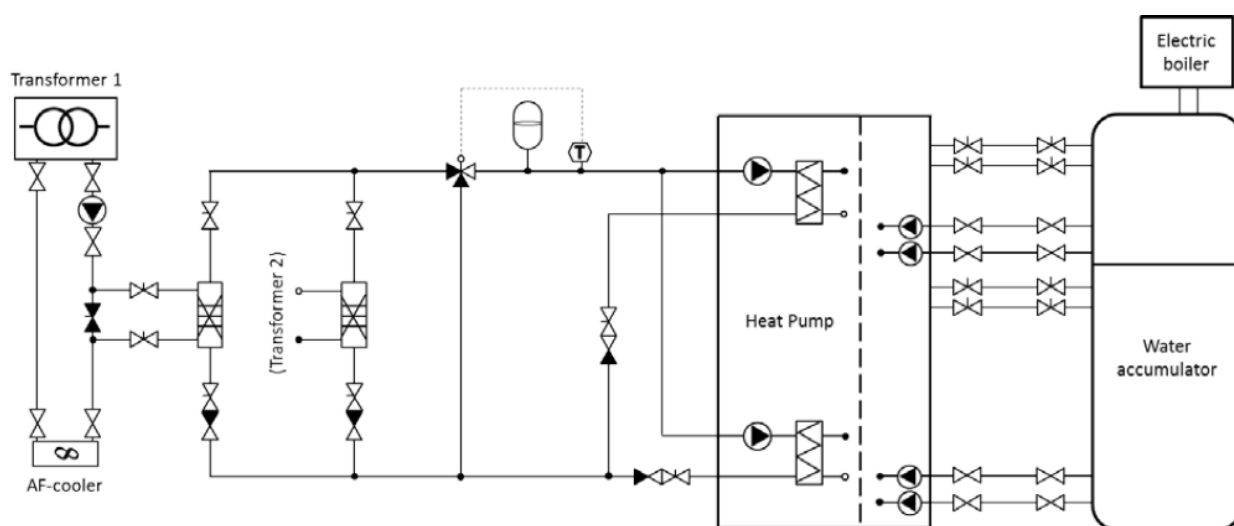


Рисунок 3.7 – Схема системы охлаждения двух трансформаторов с применением теплового насоса и бака-аккумулятора горячей воды

ID093. *Комбинированный датчик для измерения вибраций и обнаружения частичных разрядов с помощью акустических и электромагнитных излучений для установки в масле (Combined In-Oil Sensor for Vibration Measurement and Partial Discharge Detection using Acoustic and Electromagnetic Emissions. Sebastian Coenen – Siemens AG; Michael Beltle, Martin Siegel, Stefan Tenbohlen – Universität Stuttgart, Германия)*

В докладе представлен прототип комбинированного датчика для обнаружения частичных разрядов в силовых трансформаторах акустическим и ультравысокочастотным методами и измерения вибраций, предназначенный для установки внутри бака трансформатора. Отмечено, что поскольку при прохождении сквозь стенки бака трансформатора имеют место затухания акустических и электромагнитных сигналов, установка соответствующих датчиков внутри бака обеспечивает лучшие помехозащищенность и соотношение сигнал/шум. Представлены результаты исследований и проверок работы прототипа разработанного комбинированного датчика, проведенные в лабораторных условиях.

ID098. *Новый алгоритм для онлайн-измерения влагосодержания в трансформаторах (A New Algorithm for On-line Moisture Assessment in Transformers. Oleg Roizman – IntelliPower; Австралия)*

В докладе представлен новый диагностический метод, названный «облачный алгоритм» и предназначенный для оценки и визуализации данных онлайн-измерения влагосодержания в трансформаторах. В соответствии с этим методом последовательные данные онлайн-измерений влагосодержания отображаются на цветовой диаграмме равновесной влажности соединенными между собой точками для наглядного представления перехода влаги между бумагой и маслом. Такое отображение данных в условиях изменения в процессе эксплуатации температуры масла и влагосодержания в масле приводит к появлению на диаграмме фигуры, напоминающей облако, по форме которой можно сделать выводы о динамике изменения влагосодержания твердой изоляции и о влаге в масле, «возвращаемой» в твердую изоляцию при снижении температуры. Отмечено, что одним из возможных применений разработанного метода является ранжирование и классификация трансформаторов по влагосодержанию путем построения цветовой диаграммы и присвоения индекса исправности в зависимости от того, в какой области диаграммы располагается «облако».

ID102. *Анализ характеристик термического старения альтернативных диэлектрических жидкостей для применения в трансформаторах с естественным охлаждением (Analysis of Thermal Ageing Characteristics of Alternative Dielectric Fluids Used in Transformer Applications with ON Cooling Condition. Tae-Won Park, Seung-Ho Lee,*

Min-gu Kim, Joong-Kyoung Kim – Power & Industrial Systems R&D Center, Hyosung Co., Корея)

В докладе рассмотрены характеристики термического старения минерального масла и альтернативных изоляционных жидкостей, таких как натуральные и синтетические эфиры. Рассмотрены результаты анализа тепловых расчетов и испытаний силового трансформатора мощностью 16500 кВА и распределительного трансформатора мощностью 2300 кВА, заполненных минеральным маслом, натуральными и синтетическими эфирами. Получено, что для этих трансформаторов использование натуральных эфиров приводит к большим перегревам наиболее нагретой точки и масла. Отмечено, что в связи с большими перегревами совместно с натуральными и синтетическими эфирами целесообразно применять термически высококачественную бумагу, поскольку в этом случае можно обойтись естественным охлаждением без применения мощных насосов и радиаторов с развитой поверхностью.

4. Обзор докладов постер-сессии

4.1. ПТ 1 «Взаимодействие между трансформатором и электрической системой»

ID018. *Интеграция возобновляемых источников энергии в южном энергорайоне компании SEC (Renewable Energy Integration in SOA. Yousef Al-Sharif – Saudi Electricity Company, Саудовская Аравия)*

В докладе рассмотрены вопросы электроснабжения удаленных небольших населенных пунктов и островов, подключение которых к основной энергосистеме экономически неоправданно. В таких объектах имеются свои небольшие сети, для повышения надежности электроснабжения потребителей этих сетей актуальной задачей является установка и интеграция возобновляемых источников энергии. В статье описан опыт реализации проекта солнечной электростанции Farasan, в т.ч. технические параметры оборудования, вопросы совместной работы станции и существующей небольшой сети и основные результаты проекта.

ID029. *Проектирование реакторов с учетом подмагничивающего действия геомагнитно-индуктированных токов: специфика по сравнению с силовыми трансформаторами (Design of Reactors with consideration to interaction with DC/GIC excitation; Specificity compared to Power Transformers. Triomphant Ngnegueu – ALSTOM GRID, Франция; Joao Baldauf – ALSTOM GRID, Бразилия)*

В докладе рассмотрены вопросы проектирования шунтирующих реакторов с учетом возможного подмагничивающего действия геомагнитно-индуктированных токов

(ГМИТ⁵). Отмечено, что в отличие от силовых трансформаторов, шунтирующие реакторы имеют более линейные вольт-амперные характеристики в области рабочего напряжения, что определяет меньшее искажение тока намагничивания вследствие протекания ГМИТ и, как следствие, меньшее влияние ГМИТ на конструкцию реакторов. Представлены два примера расчетного моделирования шунтирующего реактора 50 Мвар и автотрансформатора 550 МВА с учетом различных уровней ГМИТ.

ID030. *Проектирование испытательных трансформаторов для испытаний коммутационной способности переключателей РПН (Design of Testing Transformers for Switching Duty Test of On Load Tapchangers. T.V.Sridhar – CTR Manufacturing Industries Ltd, Индия)*

В докладе представлены требования и описание конструкции трансформаторов для проведения испытаний коммутационной способности устройств регулирования под нагрузкой (РПН) по МЭК 60214-1:2003 (п. 5.2.2).

ID034. *Постоянный ток в трансформаторах: опыт и компенсации (Direct current in transformers: experience, compensation. F. Bachinger, P. Hamberger – Siemens AG Österreich, Transformers Linz; A. Leikermoser – ARS Adaptive Regelsysteme GmbH; Leber3, H. Passath – Siemens AG Österreich, Transformers Weiz; Австрия)*

В докладе рассмотрены вопросы, связанные с подмагничивающим действием постоянных токов при протекании по обмоткам трансформаторов. Отмечено, что отрицательными эффектами протекания постоянных токов в трансформаторах является возможность насыщения магнитной системы в одном из полупериодов, значительное увеличение потерь холостого хода и уровня звука трансформатора. Для устранения отрицательных эффектов предложен метод активной компенсации подмагничивания постоянным током путем управляемого введения постоянной магнитодвижущей силы обратного знака. Представлены примеры использования метода в полевых условиях на двух трансформаторах, где предположительной причиной появления постоянных токов были геомагнитно-индуктированные токи (первый пример) и работа силовых преобразователей статического компенсатора реактивной мощности (второй пример).

ID037. *Оценка рисков для силовых трансформаторов от солнечных бурь (Risk evaluation for power transformers during solar storms. J. Raith, B. Wagner, S. Ausserhofer Siemens AG Österreich Transformers Weiz, Австрия)*

В докладе представлены результаты моделирования потерь и перегревов обмоток, прессующих пластин и балок при воздействии ГМИТ на примере трех трансформаторов.

⁵ Прим. автора отчета: Данная аббревиатура использована во всех последующих докладах.

По результатам моделирования получено, что наибольшие перегревы в рассмотренных примерах имеют место в прессующих пластинах стержней магнитной системы. На основании этого авторами сделан вывод о том, что при воздействии ГМИТ прессующие пластины являются наиболее критичными элементами конструкции трансформаторов. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния ГМИТ на двух автотрансформаторах мощностью 133 МВА. Автотрансформаторы были соединены параллельно по стороне высшего напряжения и запитаны со стороны обмоток низшего напряжения (рисунок 4.1). Постоянный ток инжектировался со стороны нейтралей этих автотрансформаторов от источника постоянного напряжения. Для трех уровней постоянного тока 10, 20 и 30 А представлены результаты измерений превышения средних температур и температур наиболее нагретых точек прессующих пластин и балок, обмоток, верхних и нижних слоев масла. Отмечено хорошее согласие результатов моделирования и измерений. Даже при малых значениях ГМИТ получены значительные перегревы прессующих пластин магнитопровода. Так, при токе 30А превышение их температуры составило 67 К.

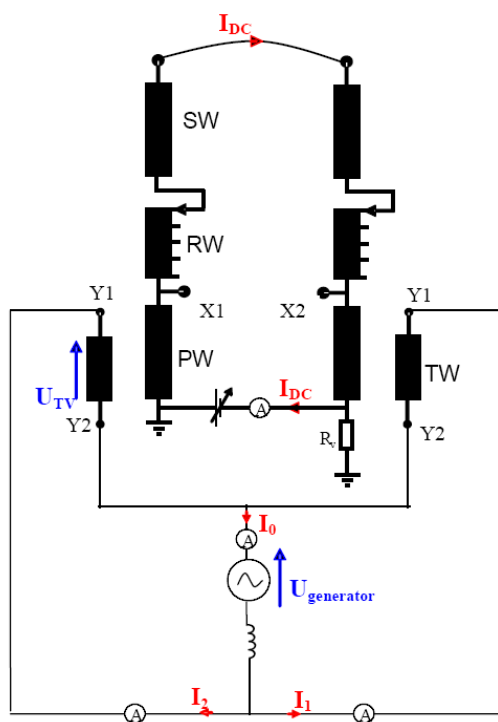


Рисунок 4.1 – Схема испытаний для исследования влияния ГМИТ

ID045. *Анализ влияния подмагничивания постоянным током на поток рассеяния и электромагнитные силы в обмотках силовых трансформаторов на основе трехмерных конечно-элементных моделей (Analysis of DC bias on leakage fluxes and electromagnetic forces in windings of power transformers based on three dimensional finite element models. S.A. Mousavi, G. Engdahl Royal Institute of Technology, KTH – Швеция)*

В докладе рассмотрено влияние ГМИТ на магнитный поток рассеяния и электромагнитные силы в обмотках. Отмечено, что протекание ГМИТ по обмоткам может приводить к насыщению стали магнитопровода и увеличению электромагнитных сил по сравнению с нормальными условиями эксплуатации. По результатам моделирования с использованием трехмерной конечно-элементной модели получено, что в случае одностержневой магнитной системы возможно увеличение электромагнитных сил в несколько раз. Вместе с тем, эти силы малы по сравнению с электродинамическими силами при коротких замыканиях, в расчете на которые проектируются основные элементы активной части.

ID049. *Проектирование и динамический анализ броневых трансформаторов при коротких замыканиях (Design and dynamic analysis of Shell form transformers under short-circuit conditions. Emanuel Almeida, Pedro Pedro – EFACEC Power Transformers; João Cardoso – Universidade Nova de Lisboa; Rui Ribeiro – Amplitude Acoustics; Португалия)*

В докладе представлены результаты теоретической работы по описанию динамических процессов в активной части броневых трансформаторов при КЗ с целью создания расчетного инструмента для борьбы с вибрациями обмоток и баков трансформаторов. Приведены предлагаемые расчетные модели для описания динамического поведения элементов активной части и бака при воздействии токов КЗ, а также характеристика разработанного программного обеспечения GROPTI, предназначенного для оценки вибраций и оптимального выбора конструкции элементов жесткости броневых трансформаторов.

ID051. *На пути к броневому шунтирующему реактору с ультранизким уровнем шума (Towards ultra-low noise Shell form shunt reactors. Emanuel Almeida, Pedro Pedro – EFACEC Power Transformers; Miguel Lopes – dBLab Acoustics & Vibrations; Португалия)*

В докладе рассказано о разработке однофазных броневых шунтирующих реакторов 230 кВ мощностью 23,3 Мвар для электросетевой компании REN (Португалия), к которым предъявлялись жесткие требования в части уровня вибраций и шума. Представлены принятые технические решения, результаты трехмерного моделирования в системе ANSYS и заводских измерений уровня вибраций и шума, по которым уровень шума не превышает 60 дБА.

ID057. *Установка сухих трансформаторов для распределительных сетей высокого напряжения и возможные взаимодействия с сетью (Dry-type subtransmission transformer installations and potential grid interactions. Martin Carlen – ABB Management Services, Швейцария; Mariano Berrogain – ABB s.a., Испания)*

В докладе представлена инновационная разработка компании АВВ – сухой трансформатор с наибольшим рабочим напряжением 72,5 кВ для применения в распределительных сетях высокого напряжения. Представлены три примера установки сухих трансформаторов. В первом примере описана установка трансформатора с номинальным напряжением 69 кВ мощностью 25 МВА (рисунок 4.2) совместно с КРУЭ на закрытой распределительной подстанции, расположенной под ареной футбольного стадиона Fonte Nova Arena (Бразилия); трансформатор снабжен устройством РПН и имеет диапазон регулирования +4/-12 ступеней по 1,25% (+5/-15%). Во втором примере представлен трансформатор 45 кВ мощностью 10 МВА с регулированием напряжения с помощью ПБВ (рисунок 4.3), установленный на гидроэлектростанции для питания собственных нужд. В третьем примере представлен трансформатор 45 кВ мощностью 16 МВА для наружной установки (рисунок 4.4), установленный на открытой подстанции; трансформатор имеет защитный кожух со степенью защиты IPX4D; обмотки изготовлены по технологии RESIBLOC, что обеспечивает нижнюю рабочую температуру минус 60 °С.



Рисунок 4.2 – Сухой трансформатор 69 кВ, 25 МВА с РПН



Рисунок 4.3 – Сухой трансформатор 45 кВ, 10 МВА с ПБВ



Рисунок 4.4 – Сухой трансформатор 45 кВ, 16 МВА для наружной установки

ID062. *Анализ примера внутреннего резонанса в трансформаторе, вызванного переходными перенапряжениями в КРУЭ (A Case Study on Transformer Internal Resonance with GIS Transient Overvoltages. Ji Hong Kim, Seong Il Kim, Soo Nam Kim, Young Chan Choi – Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Южная Корея)*

В докладе описан пример расчета резонансных перенапряжений в связанном с КРУЭ блочном трансформаторе 380 кВ мощностью 225 МВА. Представлены результаты моделирования высокочастотных перенапряжений в КРУЭ с использованием программы Electromagnetic transient program (EMTP) и сделан анализ амплитуд и частотного состава этих перенапряжений. Приведены результаты моделирования частотных характеристик обмоток трансформатора и передаточных функций, характеризующих передачу напряжения от линейного зажима обмотки высшего напряжения (ВН) к регулировочной обмотке (РО). Расчеты выполнены с использованием детализированной RLC-модели трансформатора⁶, параметры которой были получены с помощью программы VLN. Приведены полученные расчетные резонансные частоты и значения передаточных функций на этих частотах. На основе сравнений частот высокочастотных перенапряжений и резонансных частот передаточных функций от обмотки ВН к обмотке РО сделан вывод о несовпадении этих частот и малой вероятности возникновения резонансов в обмотках по причине переходных перенапряжений вследствие работы выключателей и разъединителей в КРУЭ. Отмечено, что моделирование переходных перенапряжений в сети с использованием детализированных моделей трансформаторов может быть полезным для исследования возможности внутренних резонансов в обмотках трансформаторов на стадии проектирования, а также при анализе внутренних повреждений трансформаторов.

ID085. *Защита для радиальных магистральных сетей, имеющих силовые трансформаторы со схемой и группой соединения Y_n/Y_n-0 ($Y_n/D-1$) (The Protection for Radial Transmission Systems which have Power Transformer vector group $YNyn0$ (d1). Anantachai Pongthavornsawad, Ruengsak Prohchan – Provincial Electricity Authority, Тайланд)*

⁶ Прим. автора отчета: Поскольку в программе EMTP имеется ограничение на количество элементов в импортируемой RLC-схеме замещения, использованная детализированная модель трансформатора была значительно упрощена и «загрублена». Так, обмотка ВН с вводом в середину представлена 9+9 RLC-элементами, регулировочная обмотка – 5+5 RLC-элементами, а обмотки НН1 и НН2 – по 6 RLC-элементов, что сказалось на отсутствии в расчетных частотных характеристиках резонансов в области высоких частот и ставит под сомнение возможность анализа высокочастотных перенапряжений при взаимодействии с КРУЭ с использованием этой упрощенной расчетной модели трансформатора.

В докладе рассмотрены вопросы реализации релейной защиты от однофазных коротких замыканий магистральных сетей с двухсторонним питанием, имеющих силовые трансформаторы со схемой соединения обмоток Ун/Ун-0 или Ун/Д-1.

4.2. ПТ 2 «Опыт эксплуатации фазоповоротных трансформаторов»

ID108. *Отличия фазоповоротных трансформаторов от обычных подстанционных трансформаторов (Differences to standard substation transformers. Herbert Schinnerl – Siemens AG Österreich – Transformers Weiz, Австрия)*

В докладе отражены основные отличия фазоповоротных трансформаторов от обычных силовых трансформаторов с целью достижения лучшего понимания и для помощи в обсуждениях между заинтересованными сторонами. Рассмотрены вопросы изменения фазового сдвига от нагрузки, условия работы магнитной системы при разных фазовых сдвигах, вопросы выбора РПН, параллельной работы и специальных испытаний фазоповоротных трансформаторов.

ID115. *Применение броневых фазоповоротных трансформаторов (Application of Shell-Type Phase Shifting Transformer. Koji Shinya, Shingo Kano, Takuya Horiguchi, Yoshiyuki Kono, Yoshinari Fuse – Mitsubishi Electric Corporation, Япония; Craig Swinderman – Mitsubishi Electric Power Product, Inc, США)*

В статье рассмотрены технические особенности фазоповоротных трансформаторов разработки Японии и США, а также сравнение этих трансформаторов с другими способами управления фазовым сдвигом. Описаны три варианта исполнения фазоповоротных трансформаторов броневой конструкции, включая фазоповоротный автотрансформатор, и указаны их преимущества. Отмечено, что с помощью предложенных решений по конструкции фазоповоротных трансформаторов можно достичь существенного снижения занимаемой площади, массы и размеров, а также потерь электроэнергии этих трансформаторов.

4.3. ПТ 3 «Планирование сетей в контексте парка состаренных трансформаторов»

ID024. *Оценка состояния РПН на месте установки с помощью измерений динамического сопротивления (On-site condition assessment of on-load tap changers with dynamic resistance measurements. R.A. Jongen – Onsite hv solutions AG, Швейцария; B. Quak – Seitz Instruments AG, Швейцария)*

В докладе рассмотрено применение диагностического метода на основе измерений динамического сопротивления и интерпретация результатов этих измерений с целью оценки состояния РПН и выявления часто встречающихся отказов. Отмечено, что данный

метод обеспечивает получение данных для выявления наличия контактных пленок, пиролитического углерода, износа контактов и оплавлений. Кроме того, с помощью данного метода может быть выполнена оценка работы механической системы РПН, включая скорость и ускорение контактов, мощность привода, сигналы защитного реле.

ID026. *Критерии замены для распределительных трансформаторов (Replacement criteria for distribution transformers. Jos Wetzer – DNV KEMA Energy & Sustainability, Нидерланды)*

В докладе рассмотрены вопросы принятия решений о замене или дальнейшей эксплуатации распределительных трансформаторов. Отмечено, что в отличие от дорогостоящих силовых трансформаторов, распределительные трансформаторы являются сравнительно недорогими изделиями широкого потребления, а потому альтернатива их замене должна также быть малозатратной, что в настоящее время зачастую может быть достигнуто лишь в случае большого парка трансформаторов. Сделано предположение, что данная ситуация может измениться в случае широкого применения недорогих устройств мониторинга, интегрированных в новые распределительные трансформаторы.

ID038. *Локация частичных разрядов в силовых трансформаторах – практический опыт синхронизации акустического метода с электрическими и ультравысокочастотными сигналами (Localizing partial discharges in power transformers – practical experience with triggering the acoustical method by electrical and UHF signals. A. Kraetge, S.M. Hoek – OMICRON electronics GmbH, Австрия)*

В докладе рассмотрены различные аспекты применения акустического метода для локации частичных разрядов (ЧР). Приведено описание измерения акустическим методом с синхронизацией по сигналам частичных разрядов, полученным электрическим или ультравысокочастотным (УВЧ) методом измерений. Представлены практические примеры измерений и локации частичных разрядов. Так, в первом примере на автотрансформаторе 230 кВ мощностью 500 МВА акустические измерения ЧР, проводимые в процессе заводских испытаний, были синхронизированы с сигналом по электрическому методу и отстроены на уровень запуска по кажущемуся заряду 60 пКл – 2000 пКл. В результате последовательных приближений датчиков было установлено предположительное место ЧР; разборка трансформатора выявила точечные следы ЧР на барьере из электрокартона. При повторных испытаниях трансформатора после замены дефектного барьера ЧР не были выявлены. Во втором примере, измерения выполнены на трансформаторе 230/20 кВ мощностью 100 МВА, при этом акустические измерения были синхронизированы с сигналами ультравысокочастотных датчиков ЧР. Также представлен пример локации ЧР акустическим методом на трансформаторе 220 кВ, проведенные на месте установки.

ID047. *Мониторинг состояния силовых трансформаторов с использованием УВЧ технологии регистрации ЧР (Condition Monitoring of Power Transformers by using of UHF PD Technology. B. Dolata – ALSTOM Grid, Германия; G. Luna – ALSTOM Grid, Франция; M. Siegel – University of Stuttgart, Institute of Power Transmission and High Voltage Technology (IEH), Германия)*

В докладе представлен опыт онлайн-мониторинга силовых трансформаторов с УВЧ регистрацией ЧР в полевых условиях и в условиях лаборатории, а также опыт измерений с помощью двух типов датчиков. Отмечено, что при использовании систем мониторинга данные по результатам измерений интенсивности ЧР с помощью УВЧ метода могут быть визуализированы с целью более удобной их интерпретации и сопоставлены с другими данными, например, условиями нагрузки, работой РПН, содержанием растворенных газов.

ID058. *Моделирование магнитного поля и тепловой расчет магнитных шунтов (Flux density simulation and temperature calculations in leakage flux collectors. Tomas Lindstedt, Lars Pettersson, Erik Forsberg, Tony Polander, Andreas Gustafsson – ABB, Швеция)*

В статье затронуты вопросы оценки возможных перегрузок старых трансформаторов и рассмотрены вопросы расчета индукции магнитного поля рассеяния, потерь и температур в магнитных шунтах из нелинейного и анизотропного материала, расположенных сверху и снизу обмоток и предназначенных для канализации магнитного поля рассеяния. Представлены результаты расчеты индукции, потерь и перегревов, выполненных с помощью трехмерной конечно-элементной модели при изменении тока нагрузки в диапазоне 95 – 120% от номинального значения.

ID086. *Ключевые меры применительно к перестановке старых трансформаторов (Critical measures in connection with relocation of an aged transformer. Karin Gustafsson, Lars Pettersson, Lena Melzer – ABB, Швеция)*

В докладе рассмотрены вопросы, связанные с перестановкой (перекаткой) старых трансформаторов, например, в пределах подстанции. Отмечено, что при перестановке следует уделить внимание состоянию твердой изоляции и оценить степень ее полимеризации, поскольку в результате старения механическая прочность изоляции снижается и растет риск ее повреждения вследствие механических воздействий при перестановке трансформатора. В докладе описан теоретический метод оценки степени полимеризации твердой изоляции и опыт применения метода частотного анализа реакции (ЧАР) для оценки механического состояния активной части до и после перекатки трансформатора.

ID088. *Массовое обследование большого парка трансформаторов на основе ограниченного объема данных (Fleet screening of a large transformer population with a limited amount of data. Karin Gustafsson, Lars Pettersson, Kjell Carrander, Lena Melzer – ABB, Швеция)*

В докладе рассмотрены вопросы анализа состояния большого парка трансформаторов с целью принятия решения о замене или продлении срока их эксплуатации. Описан метод массового обследования трансформаторов с применением специализированной программы, которая позволяет оценить возможные риски различных видов повреждений (тепловых, механических и электрических повреждений, а также повреждений вспомогательного оборудования). Показаны результаты оценки состояния парка трансформаторов по ограниченному объему исходных данных.

ID091. *Оптимизированная модель для оценки условий безопасных перегрузок в силовых трансформаторах. Часть II – миграция влаги (Optimized Model for the Estimation of Safe Overloading Conditions in Power Transformers. Part II Moisture Migration. Enrique Betancourt, Omar Mendez, Berenice Bahena – Prolec GE, Мексика; Roberto Liñan, David Ponce – IIE, Мексика)*

В докладе представлена основанная на экспериментах математическая модель для оценки распределения влаги по высоте обмоток при различных условиях работы трансформатора. Модель учитывает изменение влагосодержания в масле, температуру верхних слоев масла, а также параметры конструкции трансформатора и условия старения изоляционной системы. Для подтверждения расчетной модели миграции влаги использована среднемасштабная экспериментальная установка (рисунок 4.5), включающая в себя несколько катушек обмотки однофазного автотрансформатора мощностью 75 МВА. Конструкция установки позволяла производить нагрев индивидуально каждой катушки и обеспечить конвективное движение масла в осевых и радиальных охлаждающих каналах. Для подтверждения расчетной модели распределения влаги по высоте обмотки использована другая среднемасштабная экспериментальная установка (рисунок 4.6), содержащая обмотку из 40 катушек по 40 витков в каждой и маслобак размером 2,2 м³ и позволяющая обеспечить приближенное к реальному распределение температур обмотки.

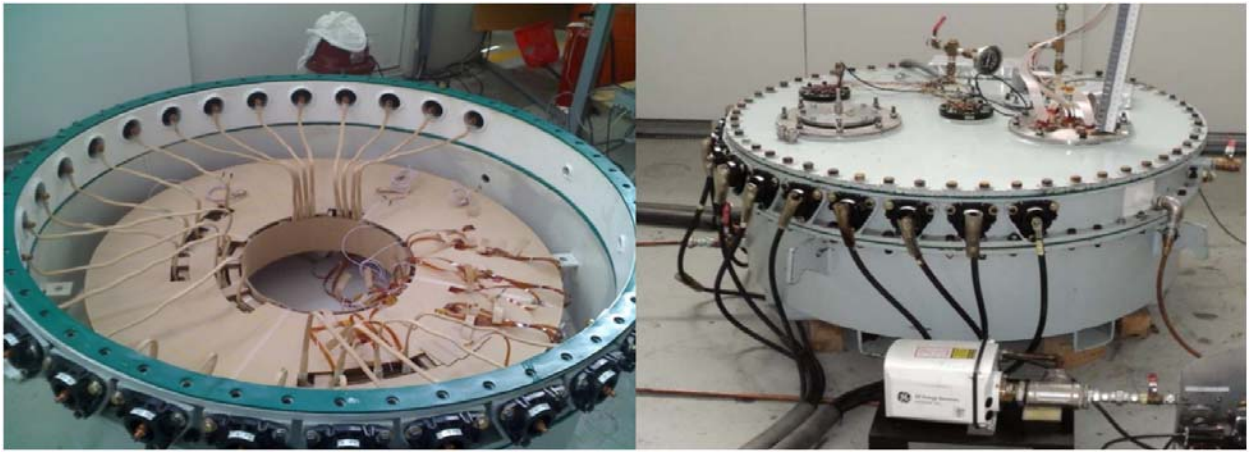


Рисунок 4.5 – Экспериментальная установка для исследования миграции влаги

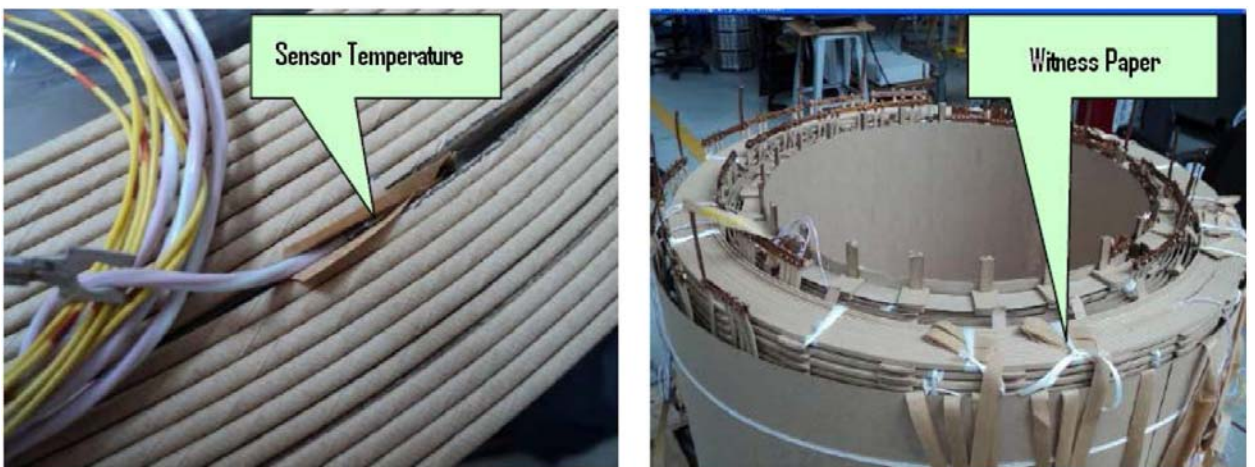


Рисунок 4.6 – Экспериментальная установка для исследования распределения влаги по высоте обмотки

ID094. *Локация частичных разрядов с использованием электромагнитных сигналов (Localization of Partial Discharges using electromagnetic Signals. Sebastian Coenen, Sebastian Wirtheim, Rüdiger Kutzner – Siemens AG, Германия)*

В докладе рассмотрены вопросы локации частичных разрядов УВЧ-методом в силовых трансформаторах по времени распространения электромагнитных сигналов. Отмечено, что, как правило, количество УВЧ-датчиков ограничено числом имеющихся запорных вентилей для заливки масла. При этом точность локации растет с увеличением числа УВЧ-датчиков. Применение двух датчиков является достаточным для определения того, в какой из фаз трансформатора находится источник ЧР, либо того, что источник находится в переключающем устройстве. Представлены метод локации частичных разрядов с помощью двух датчиков и практический пример его успешного применения. Также рассмотрены вопросы и пример использования четырех и шести УВЧ-датчиков.

ID095. *Эффективное использование данных эксплуатации и обслуживания силовых трансформаторов (Efficient Use of Operating and Measurement Data from Power Transformers. Sebastian Coenen, Uwe Thiess, Silvana Labric – Siemens AG, Германия)*

В докладе рассмотрено применение компьютерной системы управления данными, предназначенной для сбора и анализа информации о трансформаторах в процессе эксплуатации, технического обслуживания и диагностики повреждений с целью администрирования парка трансформаторов. На примере системы управления данными компании Сименс рассмотрены структура базы данных, хранение статических и динамических данных, расчет параметров и анализ трендов, а также оценка рисков.

ID097. *Новые результаты, связанные с механизмом и мерами предотвращения образования сульфида меди (Recent Findings Related to Copper Sulphide Formation Mechanism and Mitigation Techniques. J.M. Lukic, D.P.Mihajlovic, J.U. Jankovic, V.M. Mandic – Electrical Engineering Institute Nikola Tesla, Сербия)*

В докладе представлено краткое изложение результатов исследований, связанных с механизмом образования сульфида меди в бумажной изоляции и побочными эффектами применения антикоррозионных присадок в трансформаторном масле, а также результатов обработки масла, проведенной для удаления реакционно-способной серы из масла. Отмечено о возможных рисках повреждения трансформаторов по причине отложений сульфида меди в витковой изоляции, что может привести к снижению электрической прочности изоляции, а также отложений на металлических частях, что может привести к перегреву посеребренных контактов переключателей РПН.

ID101. *Оптимальное терморегулирование с принудительным потоком масла и принудительным потоком воздуха для применения в силовых трансформаторах (Optimal Thermal Management with Oil-forced Flow and Air-forced Flow for Power Transformer Applications. Min-gu Kim, Tae-Won Park, Dong-Jin Hong and Joong-Kyung Kim – Power & Industrial Systems R&D Center, Hyosung Co., Южная Корея)*

В докладе рассмотрены вопросы оптимального управления тепловым режимом и определения подходящего режима охлаждения силовых трансформаторов путем аналитических вычислений, численного моделирования и экспериментальной оценки охлаждающей способности радиаторов. Представлены аналитические выражения для оценки охлаждающей способности радиаторов, результаты расчетов по аналитическим выражениям и с использованием специализированного коммерческого программного обеспечения FLUENT v.13 (ANSYS Inc.). Также представлены результаты измерений охлаждающей способности радиаторов, которые были получены на экспериментальной установке, содержащей масляный бак с нагревателями общей мощностью 300 кВт,

маслонасосы и исследуемые радиаторы. Испытания проведены в режимах с естественным и принудительным воздушным и масляным охлаждением: ONAN, ONAF, ODAN и ODAF по классификации МЭК 60076-1 (М, Д, НМЦ, НДЦ по ГОСТ Р 52719, соответственно). В сравнении с экспериментальными результатами оценочные значения охлаждающей способности радиаторов по аналитическим выражениям в режиме с естественной воздушным охлаждением оказались ниже на 18 –27%, что авторы доклада связывают с принятыми при оценке допущениями о постоянстве поверхностной температуры и представлением радиаторов в виде плоских пластин. Оценка по программному обеспечению FLUENT оказалась более близкой к экспериментальным результатам – ниже на всего 11 – 15%.

ID105. *Исследования с целью модернизации релейной защиты старых трансформаторов 500 кВ и мониторинг состояния в условиях эксплуатации (Research of aged 500kV transformer protection relay reforming and In-Service condition monitoring. Song Yang – China Southern Grid Extra High Voltage Transmission Company, Куньмин)*

В докладе затронуты вопросы повреждений трансформаторов сверхвысокого напряжения компании China Southern Power Grid и отмечены особенности эксплуатируемых трансформаторов. Приведен ряд мероприятий, направленных на предотвращения повреждений старых трансформаторов, в том числе предложения по настройке работы релейной защиты.

ID118. *Возможность применения измерений частичных разрядов ультравысокочастотным методом для контроля качества и испытаний силовых трансформаторов (Suitability of Ultra High Frequency Partial Discharge Measurement for Quality Assurance and Testing of Power Transformers. Stefan Tenbohlen, Martin Siegel, Michael Beltle, Martin Reuter – University of Stuttgart, Германия)*

В докладе поднят вопрос применения УВЧ-метода регистрации ЧР при заводских приемо-сдаточных испытаниях силовых трансформаторов. В настоящее время стандартами предусмотрено применение электрического метода измерения ЧР при проведении заводских испытаний, что связано с возможностью калибровки применяемого измерительного оборудования. УВЧ-метод, в отличие от электрического метода, является менее чувствительным к внешним сигналам, что делает его пригодным для измерений в заводских условиях и в условиях эксплуатации. В докладе отмечено, что для того, чтобы УВЧ-метод стал сопоставимым с электрическим методом, требуется стандартизация измерительного оборудования в части калибровки или проверки чувствительности УВЧ-антенн.

5. Практические семинары

В рамках проведения совместного коллоквиума комитетов A2 и C4 11 сентября 2013 года состоялись практические семинары (рисунки 5.1 и 5.2), проводимые представителями рабочих групп:

- D1.30 – «Стабильность жидкостей к окислению» (докладчик – Ivanka Atanasova-Noehlein);
- A2.33 – «Практика пожаробезопасности» (докладчик – Arne Petersen);
- JWG A2/C4.39 (309) – «Электрическое взаимодействие трансформаторов и электрической системы» (докладчик – Angelica Rocha и другие члены рабочей группы);
- A2.36 – «Руководство по процессу закупки трансформаторов» (докладчик – Tom Breckenridge);
- C4.307 – «Резонансы и феррорезонансы в электрических сетях» (докладчик – Zia Emin и Marta Val Escudero).

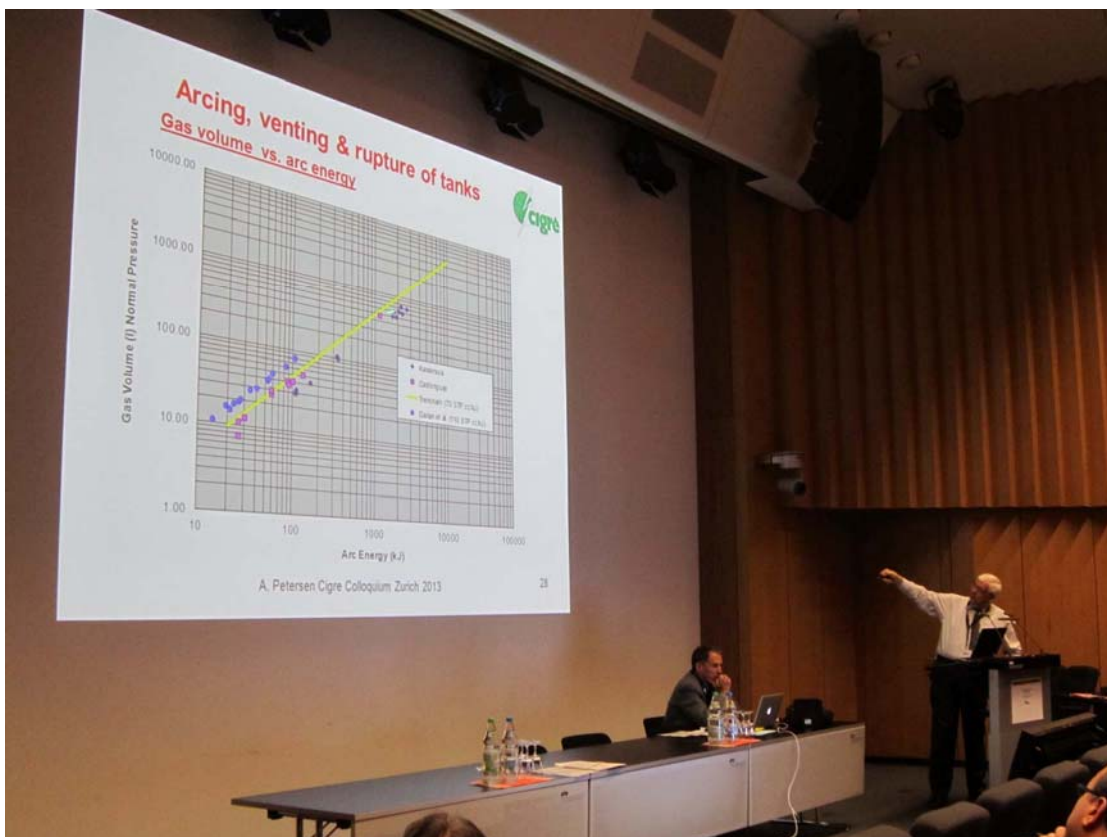


Рисунок 5.1 – Практический семинар по теме «Практика пожаробезопасности»
(докладчик – Arne Petersen)



Рисунок 5.2 – Практический семинар по теме «Электрическое взаимодействие трансформаторов и электрической системы» (докладчик – Angelica Rocha)

6. Заседание Исследовательского комитета А2 «Трансформаторы»

В рамках совместного colloquium 12 сентября 2013 года состоялось закрытое заседание Исследовательского комитета А2 «Трансформаторы» (рисунок 6.1). В заседании приняли участие регулярные члены комитета А2 – представители национальных комитетов стран-участников СИГРЭ, а также гости, присутствие которых было одобрено руководством комитета А2.



Рисунок 6.1 – Заседание комитета А2 «Трансформаторы»
(сообщение представителя консультативной группы AG A2.5 Yukiyasu Shirasaka)

На закрытом заседании комитета были рассмотрены, в частности, следующие вопросы.

6.1. Активность комитета А2 «Трансформаторы» СИГРЭ в 2013 году

Сообщено о завершении работы рабочей группы WG A2.36 «Руководство по процессу закупки трансформаторов» (Guide for Transformer Procurement Process) и выходе в апреле 2013 года трех брошюр:

- брошюра № 528 – «Процесс закупки трансформаторов: Руководство по подготовке спецификации на силовые трансформаторы» (Transformer Procurement Process: Guide to Preparation of Specifications for Power Transformers);

- брошюра № 529 – «Процесс закупки трансформаторов: Руководством по анализу конструкции силовых трансформаторов» (Transformer Procurement Process: Guide to Design Review for Power Transformers);

- брошюра № 530 – «Процесс закупки трансформаторов: Руководством по оценке возможностей изготовителей трансформаторов» (Transformer Procurement Process: Guide to the Assessment of the Capability of a Transformer Manufacturer).

Сообщено о завершении работы рабочей группы WG A2.33 «Практика пожаробезопасности» (Transformer Fire Safety Practices) и выходе в июле 2013 года соответствующей брошюры:

- брошюра № 537 – «Руководство по практике пожаробезопасности» (Guide for Transformer Fire Safety Practices).

6.2. Краткие сообщения о работе рабочих групп

6.2.1. A2.38 «Тепловое моделирование трансформаторов» (Transformer Thermal modeling).

6.2.2. A2.37 «Исследование надежности трансформаторов» (Transformer Reliability Survey).

6.2.3. A2.40 «Длительное подавление сульфида меди и оценка риска» (Copper Sulphide Long-Term Mitigation and Risk Assessment).

6.2.4. JWG A2/D1.41 «Изоляция трансформаторов для передач постоянного тока высокого напряжения – проводимость масла» (HVDC transformer insulation – Oil conductivity).

6.2.5. A2.42 «Транспортирование трансформаторов» (Transformer Transportation).

6.2.6. A2.44 «Интеллектуальный мониторинг состояния трансформаторов» (Transformer Intelligent Condition Monitoring)

6.2.7. A2.43 «Надежность трансформаторных вводов» (Transformer Bushing Reliability).

6.2.8. A2.45 «Исследование повреждений трансформаторов и послеаварийный анализ» (Transformer failure investigation and post-mortem analysis)

6.2.9. JWG A2-D1.46 «Практический опыт применения маркеров старения трансформаторов» (Field experience with transformer aging markers)

6.2.10. A2-C4.39 «Электрические переходные взаимодействия между трансформатором и электрической системой» (Electrical transient interaction between transformer and power system)

6.3. Краткие сообщения о новых рабочих группах, начавших работу в 2013 году

6.3.1. A2.48 «Шунтирующие реакторы» (Shunt Reactor)

6.3.2. A2.49 «Оценка состояния трансформаторов» (Transformer Condition Assessment)

6.3.3. A2.50 «Обратный поток мощности» (Reverse power flow)

Озвучено, что для участия в указанных новых рабочих группах приглашаются заинтересованные эксперты.

6.4. Сообщение консультативной группы AG A2.5 «Трансформаторы для сетей ультравысокого напряжения переменного и постоянного тока» (UHV AC & DC transformer)

Сообщено о выходе в 2013 году брошюры № 542 «Координация изоляции для систем ультравысокого напряжения переменного тока» (Insulation coordination for UHV AC system).

6.5. Сообщение о деятельности ТК 14 «Силовые трансформаторы» МЭК

В 2013 году вышли в свет новые стандарты МЭК:

- IEC 60076-3 версия 3.0 «Силовые трансформаторы – Часть 3: Уровни изоляции, испытания изоляции и внешние воздушные промежутки» (Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air);

- IEC 60076-14 версия 1.0 «Силовые трансформаторы – Часть 14: Наполненные жидкостью силовые трансформаторы с высокотемпературными изоляционными материалами» (Power transformers - Part 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials);

- IEC/TS 60076-19 версия 1.0 «Силовые трансформаторы – Часть 19: Правила для определения неопределенностей в измерениях потерь силовых трансформаторов и реакторов» (Power transformers - Part 19: Rules for the determination of uncertainties in the measurement of losses in power transformers and reactors).

В стадии разработки находятся следующие стандарты МЭК:

- IEC 60076-10 версия 2.0 «Силовые трансформаторы – Часть 10: Определение уровней звука» (Power transformers - Part 10: Determination of sound levels);

- IEC 60076-10-1 версия 2.0 «Силовые трансформаторы – Часть 10-1: Определение уровней звука – Руководство по применению» (Power transformers - Part 10-1: Determination of sound levels - Application guide);

- IEC 60076-15 версия 2.0 «Силовые трансформаторы – Часть 15: Силовые газонаполненные трансформаторы» (Power transformers - Part 15: Gas-filled power transformer);

- IEC 60076-20 версия 1.0 «Силовые трансформаторы – часть 20: Энергоэффективность» (Power transformers - Part 20: Energy efficiency);

- IEC 60076-57-1202 версия 1.0 «Наполненные жидкостью фазоповоротные трансформаторы» (Liquid Immersed Phase Shifting Transformers) – в рамках совместной процедуры разработки стандартов с двойной аббревиатурой IEC/IEEE;

- IEC 61378-3 версия 2.0 «Преобразовательные трансформаторы – Часть 3: Руководство по применению» (Converter transformers - Part 3: Application guide).

В 2013 году инициирована процедура разработки следующих стандартов МЭК:

- IEC 60076-16 версия 2.0 «Силовые трансформаторы – часть 16: Трансформаторы для ветряных турбин» (Power transformers - Part 16: Transformers for wind turbine applications);

- IEC 60076-22-1 версия 1.0 «Составные части силовых трансформаторов и реакторов – Защитные устройства» Power transformer and reactor fittings - Protective devices);

- IEC 60076-22-2 версия 1.0 «Системы охлаждения силовых трансформаторов и реакторов» (Power transformer and reactor cooling equipment);

- IEC 60076-22-3 версия 1.0 «Составные части силовых трансформаторов и реакторов – Вспомогательное оборудование и составные части» (Power transformer and reactor fittings - Accessories and fittings).

6.6. Сообщение о деятельности IEEE

В 2013 году вышли в свет следующие новые стандарты IEEE:

- C57.12.52 «Стандарт на герметичные сухие силовые трансформаторы, мощностью 501 кВА и выше, трехфазные с напряжением высшей стороны от 601 до 34500 В и напряжением низшей стороны от 208Y/120 до 4160 В – Общие требования» (Standard for Sealed Dry-Type Power Transformers, 501 kVA and Higher, Three-Phase, with High-Voltage 601 to 34500 Volts, Low-Voltage 208Y/120 to 4160 Volts – General Requirements);

- C57.17 «Стандарт на трансформаторы для дуговых электропечей» (Standard for Arc Furnace Transformers);

- C57.143 «Руководство по применению аппаратуры для мониторинга маслонаполненных трансформаторов и их составных частей» (Guide for Application for Monitoring Equipment to Liquid-Immersed Transformers and Components);

- C57.149 «Руководство по применению и интерпретации результатов частотного анализа реакции маслонаполненных трансформаторов» (Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers);

- C57.150 «Руководство по транспортировке трансформаторов и реакторов» (Guide for the Transportation of Transformers and Reactors);

- C57.152 «Руководство по диагностическим полевым испытаниям наполненным жидкостью силовых трансформаторов, регулировочных агрегатов и реакторов» (Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid Filled Power Transformers, Regulators and Reactors).

Также вышла в свет новая версия стандарта C57.19.100 «Руководство по применению высоковольтных вводов для электрооборудования» (Guide for Application of Power Apparatus Bushings).

6.7. Сообщение о деятельности комитета D1 «Материалы и новые методы испытаний».

6.8. Сообщение о 45-й сессии СИГРЭ в 2014 году.

6.9. Сообщение о коллоквиуме комитета A2 в 2015 году

Следующий коллоквиум комитета A2 «Трансформаторы» запланирован на период с 20 по 25 сентября 2015 года в г. Шанхай, Китай. Сообщено о следующих предварительных предпочтительных темах:

ПТ1 – Оборудование и компоненты для сетей сверх- и ультравысокого напряжения переменного и постоянного тока;

ПТ2 – Технологии для оборудования сетей будущего;

ПТ3 – Лучшее использование существующих систем.

6.10. Практический семинар по частичным разрядам

Также в рамках заседания комитета A2 состоялся практический семинар по частичным разрядам, в котором были затронуты вопросы развития стандартов в этой области, применения различных методов регистрации частичных разрядов и проводимые докладчиками научные работы.

7. Техническая выставка

В период с 9 по 11 сентября 2013 года в основном вестибюле Швейцарской высшей технической школы (Swiss Federal Institute of Technology, ETH) состоялась техническая выставка, на которой стенды представили широко известные компании:

- ABB Schweiz AG
- ALSTOM Grid AG
- Cargill Ltd
- ETH Swiss Fed. Institute of Technology
- Haefely Test AG
- MGC Moser-Glaser AG
- MR Maschinenfabrik Reinhausen GmbH
- MTE Meter Test Equipment AG
- Omicron electronics GmbH
- Pfisterer Sefag AG
- SGB-SMIT Transformers
- Siemens Schweiz AG
- Weidmann Electrical Technology AG.

8. Технические экскурсии

В завершение коллоквиума 13 сентября 2013 года состоялись три технические экскурсии (на выбор):

- 1) ABB Micafil Bushing (производство трансформаторных вводов с твердой изоляцией);
- 2) Weidmann (производство электрокартона и изделий из него для трансформаторов) и гидроэлектростанция компании Axpo Power AG в г. Netstal;
- 3) электростанция «Grimsele» в Швейцарских Альпах.

Автор данного отчета выбрал экскурсию на заводы компании Weidmann, где состоялось посещение цехов по производству электрокартона и изделий из него, высоковольтной испытательной лаборатории, химической лабораторий, а также выставочного зала с экспонатами продукции (рисунки 8.1 и 8.2).



Рисунок 8.1 – Масштабная модель внутренней изоляции силового трансформатора, отражающая спектр продукции компании Weidmann

Среди экспонатов выставочного зала отдельное внимание заслуживает новая разработка компании Weidmann «Insulation Kit for the HV winding center exit» – комбинированный узел (рисунок 8.2) установки ввода и отвода внутренней обмотки высшего напряжения с вводом в середину для прохода сквозь разрыв в наружной регулировочной обмотке, предназначенный для применения в трансформаторах напряжением до 400 кВ и позволяющий повысить электрическую прочность главной изоляции и уменьшить габариты трансформатора.

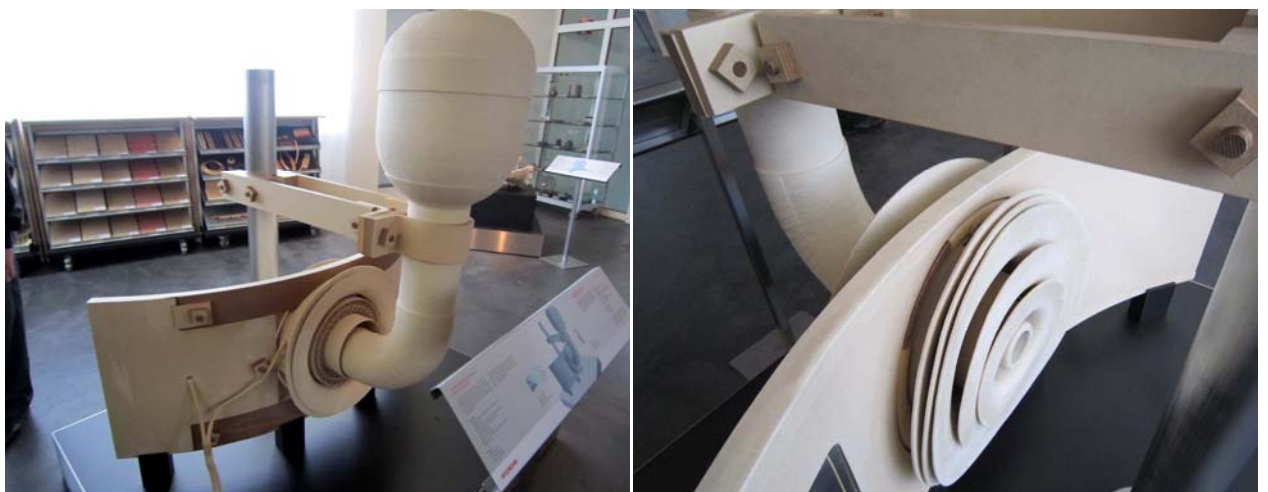


Рисунок 8.2 – Комбинированный узел отвода внутренней обмотки с вводом в середину и установки ввода

Комбинированный узел состоит из большого кольца из электрокартона, предназначенного для установки в разрыве регулировочной обмотки (РО) и имеющего металлизацию на внутреннем диаметре, в котором имеется отверстие для прохода отвода внутренней (относительно обмотки РО) обмотки высшего напряжения (ВН). Для увеличения электрической прочности отвод обмотки ВН выполнен в электростатическом экране большого диаметра, в отверстии большого кольца установлен кольцевой экран⁷, электрически соединяемый с регулировочной обмоткой, а между экраном отвода и тороидальным экраном установлена совокупность цилиндрических барьеров и угловых шайб.

Также состоялась техническая экскурсия на гидроэлектростанцию компании Axro Power AG в г. Netstal, особенностью которой является снабжение водой от горного озера по трубопроводам высокого давления. В рамках экскурсии также состоялось посещение музея электростанции, где представлено ранее эксплуатируемое на ней основное электрооборудование (рисунки 8.3 и 8.4), изготовленное около 100 лет назад.



Рисунок 8.3 – Генераторный трансформатор 8/50 кВ, 6000 кВА производства Brown, Boveri & C^{ie}

⁷ Прим. автора отчета: Необходимо отметить, что подобное техническое решение с кольцевым экраном для прохода отвода обмотки ВН сквозь разрыв обмотки РО было запатентовано в СССР еще в 80-х годах (А.с. 890456. SU 1147191А, Н01F27/28 Трансформатор / А.И. Савченко. – Опубл. в Б.И. – 15.12.1981. – №46 / Заявл. 26.03.1980. – №2899512/24-07), но, к сожалению, не нашло широкого применения в отечественном трансформаторостроении.



a)



б)

Рисунок 8.4 – Ковшовая гидротурбина 1918 г. выпуска производства Theodor Bell & C^{ie} (*a*)
и генератор 12000 кВт, 8 – 8,5 кВ производства Brown, Boveri & C^{ie} (*б*)

Заключение

1. По итогам совместного colloquium комитетов А2 и С4 СИГРЭ можно отметить следующие наиболее обсуждаемые ключевые вопросы:

- взаимодействие трансформаторов с электрической системой и связанные с ним перенапряжения;
- применение новых типов трансформаторного оборудования;
- применение новых изоляционных материалов с целью повышения экологической чистоты, взрыво- и пожаробезопасности;
- повышение надежности эксплуатируемого трансформаторного оборудования.

2. В части взаимодействия трансформаторов с электрической системой следует отметить имеющийся интерес к проблеме резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов и решению следующих задач:

- повышение достоверности моделирования переходных процессов;
- применение детализированных моделей трансформаторов и развитие методов моделирования высокочастотных перенапряжений в обмотках трансформаторов с учетом внешней схемы;
- разработка мероприятий по защите от резонансных перенапряжений.

3. В части новых типов трансформаторного оборудования следует отметить имеющийся интерес к применению фазоповоротных трансформаторов и управляемых шунтирующих реакторов для управления потоками мощности в сетях.

4. В части повышения надежности работы трансформаторного оборудования усилия мировой науки направлены на решение следующих задач:

- развитие методов диагностики, оценки фактического состояния находящегося в эксплуатации трансформаторного оборудования и принятия решений о дальнейшей его эксплуатации;
- развитие систем мониторинга трансформаторного оборудования и его составных частей.

5. В части применения новых изоляционных материалов для повышения экологической чистоты, взрыво- и пожаробезопасности можно отметить следующие тенденции:

- применение жидких диэлектриков, альтернативных традиционному трансформаторному маслу (например, натуральных эфиров);
- применение в силовых трансформаторах высокотемпературной гибридной изоляции;

- повышение класса напряжения сухих трансформаторов вплоть до 110 кВ, разработка сухих трансформаторов на напряжения для применения в сетях среднего и высокого напряжения.