



Проблемы трансформаторостроения на совместном коллоквиуме комитетов А2 и С4 СИГРЭ в 2013 г.

ЛАРИН В.С.

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).*

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. Всего было зарегистрировано около 250 участников из 38 стран мира.

В рамках совместного коллоквиума комитетов А2 и С4 состоялись:

открытая сессия (доклады приглашенных докладчиков и устные доклады) и постер-сессия;

практические семинары;

закрытые заседания комитетов А2 и С4 СИГРЭ и рабочих групп;

техническая выставка и технические экскурсии.

Предпочтительные темы (ПТ) совместного коллоквиума.

ПТ1. Взаимодействие между трансформатором и электрической системой:

резонансные и феррорезонансные явления между трансформаторами и электрической системой, смещение постоянным током, эффект геомагнитно-индуктированных 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.

ПТ2. Опыт эксплуатации фазоповоротных трансформаторов:

применение и преимущества;

технические требования, производство, транспортировка и установка фазо-поворотных трансформаторов;

характеристики, надежность, эксплуатация и обслуживание.

ПТ3. Планирование сетей в контексте парка стареющих трансформаторов:

индикаторы старения трансформатора для обслуживания и новых инвестиций;

эффективность трансформаторов, полная стоимость владения;

практика нагрузки и перегрузки трансформаторов;

он-лайн-диагностика и мониторинг;

методы предотвращения крупных аварий, требования и практика к резервным трансформаторам.

По этим предпочтительным темам было отображено 73 доклада. Распределение докладов было следующим:

Предпочтительная тема	Устные доклады	Постерные доклады	Всего
ПТ1	14	11	25 (34%)
ПТ2	12	2	14 (19%)
ПТ3	20	14	34 (47%)

Обзор докладов открытой сессии. ПТ1. «Взаимодействие между трансформатором и электрической системой».

ID019. 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)/Усовершенствование программы испытаний трансформаторов сверхвысокого напряжения для Hydro-Québec с целью предотвращения повреждений от внутренних высокочастотных резонансов¹.

В докладе отмечено, что установленные МЭК 60073-3 схемы испытаний электрической прочности изоляции при воздействии напряжений грозовых импульсов, в которых следует заземлять все неиспытываемые выводы обмоток, не отражают все возможные условия работы трансформаторов и являются недостаточными для надежного испыта-

* Официальный сайт коллоквиума: <http://www.cigre2013.zugich.org>

¹ Здесь и далее названия докладов даны в переводе автора.

ния 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 грозовых импульсов, в которых выводы неиспытываемых обмоток разземляются и защищаются ограничителями перенапряжений.

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

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

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

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

В докладе рассмотрены вопросы применения управляемых шунтирующих реакторов (УШР) производства компании АБВ. 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 г. будет установлено еще семь единиц, а к 2018 г. планируется установка дополнительно шесть единиц. В конструкции реакторов АБВ регулирование мощности реакторов выполнено ступенчато путем переключения с помощью РПН отпаяк 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.

ID044. *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 (Швеция) / *Электромагнитные переходные процессы вследствие взаимодействия между трансформаторов и электрической системой при воздействии геомагнитно-индуктированных токов.*

Рассмотрены вопросы воздействия на силовые трансформаторы геомагнитно-индуктированных токов (ГМИТ), возникающих в линиях электропередачи 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. *Triton Knoll Offshore Wind Farm Connection and Design Studies.* — K.L. Koo, Z. Emin – Parsons Brinckerhoff, S. Wijesinghe, D. Griffiths – RWE NPower Renewables (Великобритания) / *Соединение с электрической сетью и анализ проектных решений морской ветровой электростанции Triton Knoll.*

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

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

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

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. *Upon the improvement of the winding design of wind turbine transformers for safer performance within resonant overvoltages.* – Amir Hayati Soolot, Hans Kristian Hoidalén – Electrical Power Eng. Dep. – Norwegian University of Science and Technology-Trondheim N-7491; Bjon Gustavsen – SINTEF Energy Research-Trondheim N-7465 (Норвегия)/*Усовершенствование конструкции обмоток трансформа-*

торов для ветряных турбин для более надежной работы при резонансных перенапряжениях.

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

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 не нагружен. В результате разборки автотрансформатора на заводе были выявлены следы перекрытия на землю с нижней части последовательной обмотки, вблизи ли-

нейного 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. Для снижения выделяемой в ОПН энергии предложено ограничить диапазон регулирования трансформатора.

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

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. *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» (Россия)/ *Подход к анализу резонансных явлений и перенапряжений при взаимодействии между трансформатором и внешней сетью*².

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 ЕМТLab, в которую параметры модели трансформатора экспортируются из программы ТТ. Предложен аналитический способ оценки частот колебаний в системе «питающий кабель – трансформатор», основанный на применении вход-

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

ных 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. *Ferroresonance Overvoltages at Controlled Closing of a Large Step-up Transformer, Consequences and Countermeasures.* – Olav Knudsen, Michael Stanek – ABB Switzerland Ltd; Georg S. Koepl – Koepl Power Experts (Швейцария)/*Феррорезонансные перенапряжения при управляемом включении больших повышающих трансформаторов, последствия и меры противодействия.*

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 для ограничения токов однофазного КЗ в сети 380 кВ (большую часть времени трансформатор работает с разземленной нейтралью) и наличие управляемой коммутации трансформатора для 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 включением разных фаз до четверти периода, а также установка ОПН со стороны трансформатора.

ПТ2. «Опыт эксплуатации фазоворотных трансформаторов».

ID017. *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)/*Фазоворотные трансформаторы – проблема соединения двух баков.*

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

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

Особенность фазоворотных трансформаторов состоит в том, что при работе ток нагрузки имеет фазовый сдвиг около $+90^\circ$ 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 двухмерной конечно-элементной модели. Отмечено, что использование двухмерного конечно-элементного моделирования позволяет определить долю связанного с нагрузкой потока в стержне с достаточной точностью.

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

Особенностью конструкции фазоворотных 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 фазоворотных трансформаторов и сообщено о разработке методологии и стандартной процедуры для оценки их состояния, включающей прове-

³ 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 (Прим. автора).

дение измерений токов намагничивания, измерения емкости обмоток и тангенса угла диэлектрических потерь, сопротивления обмоток и других параметров, а также высоковольтные испытания индуктированным напряжением.

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

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

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% 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 им-

пульса оказываются значительно больше значений, указанных в стандартах.

ID099. *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)/*Фазопоротные трансформаторы для управления потоками мощности — опыт Бразилии.*

В докладе описан опыт применения фазопоротного трансформатора напряжением 138 кВ проходной мощностью 400 МВА, установленного на подстанции Angra dos Reis последовательно с трехфазной группой 3'133 МВА однофазных автотрансформаторов 500/138 кВ для управления перетоками мощности между системами 138 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.

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

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, 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 фазопоротного трансформатора с двумя активными частями.

ID109. *Phase Shifting Transformer: application, benefits, realization description and performance aspects.* — Günther Linortner, Martin Kalcher, Mario Scala, René Wind — SIEMENS (Германия); Rafael Mihaliu, Uni Ljubljana, Pavel Omahen, Marko Hrast, Aleksander Polajner — ELES (Словения)/*Фазопоротный трансформатор 1200 МВА 400 кВ $\pm 40^\circ$: применение, преимущества, описание реализации и особенности работы (1200 МВА, 400 кВ, $\pm 40^\circ$).*

В докладе описан опыт реализации проекта в электрических сетях Словении по применению двух включенных параллельно фазопоротных трансформаторов напряжением 400 кВ мощностью 600 МВА каждый. Потребность в фазопоротных трансформаторах столь большой мощности продиктована необходимостью регулирования перетоков мощности в энергосистеме Европы между Ав-

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

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, для 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 фазоповоротных 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 приемосдаточных испытаний, включая испытания на нагрев, испытания электрической прочности изоляции и измерения уровня звука.

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

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

ID113. *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)/*Применение фазоповоротных трансформаторов — основа обеспечения управления потоками мощности в Нью-Йорке.*

В докладе рассмотрены вопросы проектирования фазоповоротного трансформатора напряжением 345 кВ мощностью 575 МВА, имеющего диапазон фазового сдвига $+ 40^\circ$ и предназначенного для замены существующего фазоповоротного трансформатора. Отмечено, что помимо типовых требований к трансформатору предъявлялись особые требования к стойкости к геомагнитно-индуктированным 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. *Assembly and Maintenance of Phase shifting transformers.* — Christian Ettl — Siemens AG Österreich, Transformers Weiz (Австрия)/*Монтаж и обслуживание фазоповоротных трансформаторов.*

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.

ПТЗ. *«Планирование сетей в контексте парка состаренных трансформаторов».*

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

В докладе рассмотрены технические вопросы использования он-лайн-мониторинга электрооборудования на крупной электростанции. Рассмотрены особенности мониторинга состояния мощных турбогенераторов, в том числе 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. Отмечен опыт реализации на энергоблоке мощностью 900 МВт тепловой электростанции комплексной системы он-лайн-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. *Asset management decision support modelling, using a health index, for maintenance and replacement planning.* — Mischa Vermeer Jos Wetzer — DNV KEMA Energy & Sustainability (Нидерланды)/*Моделирование принятия решений по управлению активами с использованием индекса исправности для планирования обслуживания и замены оборудования.*

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 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 2 мм потребителей в плотно населенных и промышленных районах Нидерландов.

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

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 он-лайн-мониторинга.

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

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, ко-

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

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

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

В докладе описан опыт применения систем мониторинга состояния силовых трансформаторов в магистральных электрических сетях Чехии (CEPS), где такие системы устанавливаются на каждый новый трансформатор. Из имеющегося опыта эксплуатации систем мониторинга следует, что уста-

новленные 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. Ввиду наличия значительного числа ложных сообщений авторы доклада отмечают необходимость более детального рассмотрения вопросов правдоподобности и надежности информации от систем мониторинга.

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

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. *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)/*Обнаружение и дифференциация различных источников частичных разрядов внутри и снаружи силовых трансформаторов с использованием УВЧ-сенсоров.*

В докладе рассмотрены вопросы практического применения регистрации сигналов частичных разрядов (ЧР) в диапазоне ультравысоких частот (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 местонахождения источника сигнала – внутри или снаружи бака, а также для локации источника ЧР внутри бака.

ID054. *Fast-deployable HV network transformer with hybrid insulation: a solution against major events.* – M. Cuesto, M. Oliva, A. Prieto – ABB, J.C. Sanchez,

L. Navarro – REE (Испания)/*Способный к быстрой переброске мобильный трансформатор с гибридной изоляцией для сетей высокого напряжения: решение против крупных событий.*

В докладе представлен мобильный автотрансформатор 400 кВ, 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 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.

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

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. *Strategic Approach to Rational Maintenance Method And Refurbishment Plan of Power Transformers.* – H. Okubo – Aichi Inst. of Tech.; K. Ogata – Chubu Electric Power Co., Inc.; T. Kobayashi – Tokyo Electric Power Co., Inc.; Y. Matsushita – Kansai Electric Power Co., Inc.; M. Kadowaki – Hitachi Ltd.; S. Yamada – Toshiba Co.; H. Murakami – Mitsubishi Electric Co. (Япония)/*Стратегический подход к ра-*

циональному методу обслуживания и планированию обновления силовых трансформаторов.

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

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

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, отвечающему за эти трансформаторы, о предупреждениях и аварийных сигналах систем мониторинга.

ID078. *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)/*«Отпечаток» силового трансформатора для обслуживания по фактическому состоянию.*

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 номинального, емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, а также результаты анализа растворенных газов.

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

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. Отмечены преимущества применения лазерной доплеровской виброметрии для экспериментального исследования шума трансформаторов.

ID089. *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)/*Регенерация потерь в трансформаторах с помощью технологии тепловых насосов.*

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 но-

минальная 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 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.

ID093. *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)/ *Комбинированный датчик для измерения вибраций и обнаружения частичных разрядов с помощью акустических и электромагнитных излучений для установки в масле.*

В докладе представлен прототип комбинированного датчика для обнаружения частичных разрядов в силовых трансформаторах акустическим и ультразвуковым методами и измерения вибраций, предназначенный для установки внутри бака трансформатора. Отмечено, что поскольку при прохождении сквозь стенки бака трансформатора имеет место затухание 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. *A New Algorithm for On-line Moisture Assessment in Transformers.* — Oleg Roizman — IntellPower (Австралия)/ *Новый алгоритм для он-лайн-измерения влагосодержания в трансформаторах.*

В докладе представлен новый диагностический метод, названный «облачный алгоритм» и предназначенный для оценки и визуализации данных он-лайн-измерения влагосодержания в трансформаторах. В соответствии с этим методом последовательные данные он-лайн-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 изо-

ляции 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. *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)/ *Анализ характеристик термического старения альтернативных диэлектрических жидкостей для применения в трансформаторах с естественным охлаждением.*

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.

Продолжение в следующем номере.

Автор: Ларин Василий Серафимович окончил Институт электроэнергетики Московского энергетического института в 2004 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка эффективного метода расчета внутренней изоляции силовых трансформаторов». Начальник отдела трансформаторов ФГУП ВЭИ, регулярный член и представитель Российского национального комитета СИГРЭ в Исследовательском комитете А2 «Трансформаторы» СИГРЭ.

Author: Larin Vasily Serafimovich graduated from the Power Engineering Department of the Moscow Power Institute in 2004. In 2007 he received the degree of Cand. Techn. Sci. He is Head of the Transformers Department of the All-Russian Electrotechnical Institute, the Regular member and the Representative of the Russian National Committee CIGRE in the Study Committee A2 «Transformers» CIGRE.