



Вопросы трансформаторостроения на 44-й сессии СИГРЭ

ЛАРИН В.С.

С 25 по 31 августа 2012 г. в Париже прошла 44-я Генеральная сессия Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ), в рамках которой были представлены доклады на постер-сессиях, проведены дискуссионные обсуждения в отдельных Исследовательских комитетах (ИК), заседания ИК и рабочих групп СИГРЭ, а также техническая выставка.

В рамках исследовательского комитета А2 «Трансформаторы» на постер-сессиях было представлено 32 доклада по трем предпочтительным темам (ПТ):

ПТ1 «Трансформаторы в сетях будущего» (15 докладов);

ПТ2 «Экологические аспекты проектирования и эксплуатации трансформаторов (11 докладов);

ПТ3 «Магнитная система трансформаторов» (6 докладов).

Далее представлены основные сведения по указанным мероприятиям, относящиеся к вопросам трансформаторостроения и тематике ИК А2 «Трансформаторы».

ПТ1 «Трансформаторы в сетях будущего»

В докладе А2-101 «*New technologies for monitoring transformer tap-changers and bushings and their integration into a modern IT infrastructure*»/«Новые технологии для мониторинга переключающих устройств и вводов трансформаторов и их интеграция в современную ИТ-инфраструктуру»¹ (компания Hydro-Quebec, Канада) отмечена важность мониторинга состояния высоковольтных вводов и переключающих устройств и представлены разработка новой технологии мониторинга трансформаторных вводов с использованием децентрализованных измерительных систем и опыт эксплуатации разработанных систем мониторинга. Отмечено, что атмосферные осадки (дождь) могут влиять на результаты измерений $\text{tg}\delta$, и в этом случае целесообразно оценивать стандартное отклонение $\text{tg}\delta$ по нескольким последовательным измерениям. Отмечено, что разработка новых технологий мониторинга вводов и переключающих устройств может помочь преду-

предить серьезные повреждения, оптимизировать затраты на обслуживание и повысить безопасность эксплуатации трансформаторов.

В докладе А2-102 «*The implementation and operational experience of transformers control, monitoring and diagnostic systems at the united national electric power system of Russia*»/«Применение и опыт эксплуатации систем управления, мониторинга и диагностики в Единой энергетической системе России» (ФСК ЕЭС, АСУ ВЭИ и ФГУП ВЭИ, Россия) представлен опыт применения систем управления, мониторинга и диагностики силовых трансформаторов в России на подстанциях 220–500 кВ ОАО «ФСК ЕЭС». Указаны основные трудности, возникающие при внедрении и эксплуатации такого рода систем, в частности недостаточная стабильность датчиков в условиях низких температур и сильных электромагнитных полей, задержки с поставкой запасных датчиков, отсутствие необходимых предписаний, и отмечены возможные пути решения выявленных трудностей.

В докладе А2-103 «*Autotransformers evolution, reliability, safety and modelling in the Italian transmission grid*»/«Развитие, надежность, безопасность и моделирование автотрансформаторов в сетях электропередач Италии» (компания TERNА, Италия) рассмотрены вопросы повышения надежности работы автотрансформаторов, установленных в сетях Италии и эксплуатируемых компанией TERNА. Приведены данные о возрастном составе трансформаторного парка, данные о повреждаемости трансформаторов за период 1996–2010 гг. и средний «возраст» повредившихся трансформаторов, согласно которым можно заключить, что в период с 2001 по 2007 гг. уровень повреждаемости не превосходил 0,5 % в год. В последние годы произошло увеличение повреждаемости вплоть до 1,8% (2008 г.) и 1,31 (2009 г.) и снижение среднего возраста повредившихся трансформаторов. Для снижения повреждаемости компанией принята стратегия, направленная на повышение надежности и безопасности трансформаторов и состоящая в совершенствовании технических требований, конструкции и методов испытаний трансформаторов.

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

В докладе A2-104 «*EHV/HV autotransformers with in-phase and in-quadrature voltage regulation. Applications in Ghana*»/«Автотрансформатор сверхвысокого напряжения с синфазным регулированием напряжения и со сдвигом 90°. Применение в Гане» (Италия и Гана) сообщалось об опыте создания и применения автотрансформаторов мощностью 200 МВА, напряжением 330/161 кВ, в которых реализовано регулирование фазового сдвига напряжений в пределах $\pm 2' 3^\circ$ между сторонами высшего и среднего напряжений. Данные автотрансформаторы использованы для обеспечения требуемого перетока мощности по вновь созданной линии 330 кВ, работающей параллельно с существующими линиями 161 кВ.

В докладе A2-105 «*Dealing with the lack of loading and overloading data to determinate the loss of life of the power transformer insulating paper*»/«Работа с недостающими данными о нагрузках и перегрузках для оценки старения бумажной изоляции силовых трансформаторов» (Аргентина и Германия) представлен метод оценки недостающих исходных данных о нагрузке силовых трансформаторов для последующей оценки старения их изоляции. Изложены принципы оценки теплового старения бумажной изоляции на основе руководств по нагрузке силовых трансформаторов IEEE и МЭК. Представлены результаты расчетов для силового трансформатора мощностью 30 МВА.

В докладе A2-106 «*Modern machine learning techniques for power transformer condition assessment*»/«Современные алгоритмы машинного самообучения для оценки состояния силовых трансформаторов» (University of Queensland и Powerlink Queensland, Австралия) рассмотрено применение современных алгоритмов машинного самообучения для оценки состояния трансформаторов и представлены примеры, демонстрирующие применимость этих алгоритмов к оценке состояния трансформаторов в условиях эксплуатации. Отмечено применение различных диагностических методов, таких как анализ растворенных газов, измерение токов абсорбции и частотной спектроскопии, для развития базы знаний алгоритмов машинного самообучения.

В докладе A2-107 «*Identification of early-stage paper degradation by methanol*»/ «Идентификация старения бумаги на ранней стадии по метанолу» (компания Laborelec, Бельгия) затронуты вопросы раннего обнаружения деградации бумажной изоляции по содержанию метанола в трансформаторном масле. Отмечена сложность обнаружения старения на ранних стадиях по содержанию фурфурола из-за существенно нелинейной связи степени полимеризации бумажной изоляции и содержания фурфуро-

ла в масле; с другой стороны, наличие линейной связи между степенью полимеризации и содержанием метанола делает метанол, по мнению представителя компании Laborelec, превосходным индикатором старения бумажной изоляции на ранних стадиях.

В докладе A2-108 «*Enhanced modelling and early detection of power transformers – Internal incipient faults*»/«Медленно развивающиеся внутренние повреждения в силовых трансформаторах – улучшенное моделирование и раннее обнаружение» (Египет) рассмотрены вопросы моделирования и обнаружения на ранней стадии внутренних начальных повреждений силовых трансформаторов на основе Вейвлет-анализа и оценки гармонического состава тока. Представлены результаты моделирования в программе АТР токов трансформатора и анализа гармонического состава тока для случаев начальных внутренних повреждений (витковых замыканий), изменения нагрузки, включения трансформатора в сеть. Отмечено, что предложенный подход может быть использован в дополнение к традиционной релейной защите трансформаторов для раннего обнаружения повреждений.

В докладе A2-109 «*A computer program for life-time management of power transformers*»/«Компьютерная программа для управления ресурсом силовых трансформаторов» (Технический университет г. Лодзь, Польша) представлено программное обеспечение Dynamic Transformer Rating (DTR) для управления ресурсом силовых трансформаторов, разработанное по заказу компании Hydro One Networks (Онтарио, Канада). Отмечено, что основными особенностями программы DTR является возможность быстрой оценки допустимых кратковременных и длительных аварийных перегрузок, что позволяет использовать ее в режиме реального времени в составе объединенной системы управления Network Management System (NMS) компании Hydro One Networks.

В докладе A2-110 «*On-line monitoring of power transformer by fundamental frequency signals*»/«Онлайн мониторинг силовых трансформаторов по сигналам основной частоты» (ABB Corporate Research, Швеция) рассмотрены вопросы on-line мониторинга трансформаторов на основе измерения токов и напряжений для оценки коэффициента трансформации, сопротивления короткого замыкания и полных потерь в трансформаторе. Показано, что точность определения этих значений сопоставима с точностью измерений на отключенном оборудовании, а достигнутая чувствительность измерения коэффициента трансформации делает возможным выявление виткового замыкания в обмотке с числом витков до 1000; изменения в сопротивлении

короткого замыкания могут служить индикатором геометрических изменений в обмотках и ухудшения электрического контакта токоведущих частей, а изменение полных потерь может служить индикатором общего состояния силового трансформатора.

В совместном докладе A2-111 «*Life time prediction of power transformers with condition monitoring*»/«Прогноз срока службы силовых трансформаторов с помощью мониторинга состояния» (Leibniz University Hannover, Германия); East China Grid Company и East China Electric Power Test & Research Institute, Китай) рассмотрены вопросы оценки остаточного ресурса на основе мониторинга состояния силовых трансформаторов. Предложены эмпирический подход к оценке показателя старения и статистическое распределение для функционального критерия срока службы, связывающего характеристики трансформатора и вероятность его повреждения.

В докладе A2-112 «*Critical technical aspects during design, manufacturing and testing of India's first 1200 kV UHVAC transformer*»/«Ключевые технические аспекты проектирования, изготовления и испытания первого в Индии трансформатора ультравысокого напряжения 1200 кВ» (компания BHEL, Индия) сообщалось о разработке, изготовлении и испытании в 2011 г. уникального однофазного автотрансформатора класса напряжения 1150 кВ (наибольшее рабочее напряжение 1200 кВ) мощностью 333 МВА по заказу сетевой компании Powergrid (Индия) для пилотного проекта ультравысокого напряжения. Приведены основные технические требования и отмечены основные особенности конструкции трансформатора по сравнению с трансформаторами 750 кВ этой компании: высокое содержание твердой изоляции, большие изоляционные промежутки во внутренней и внешней изоляции, большая высота и радиальные размеры обмоток, большая сила прессовки обмоток. Отмечены вопросы, потребовавшие особого внимания при разработке автотрансформатора 1200 кВ: конструкция и технология изготовления главной и продольной изоляции обмоток, установки ввода 1200 кВ, электродинамическая стойкость при коротких замыканиях, вопросы охлаждения и транспортные ограничения. В 2011 г. автотрансформатор поставлен в опытную эксплуатацию на пилотной подстанции УВН «Бина» (Индия) в составе трехфазной группы однофазных трансформаторов. Остальные две трансформаторные фазы разработаны и изготовлены по собственным проектам в том же 2011 г. двумя другими индийскими компаниями – VIJAI Electrical Ltd и Crompton Greaves Ltd.

В докладе A2-113 «*Salient design features of 188MVA, 220/96/28 kV biggest rating regulating*

transformer»/«Отличительные особенности конструкции самого большого регулирующего трансформатора 188 МВА, 220/96/28 кВ» (компания ALSTOM Grid, Индия) представлен регулируемый трехобмоточный трансформатор 220/96/28 кВ мощностью 188 МВА, предназначенный для использования совместно с преобразовательным трансформатором на одном из индийских алюминиевых комбинатов. Особенностью трансформатора является значительное число ступеней регулирования (106 положений) обмотки среднего напряжения (СН), что обеспечивает регулирование напряжения на стороне СН в пределах от 1 до 96 кВ с шагом 1 кВ. Приведены сведения о конструкции магнитопровода и обмоток, переключающих устройств и бака трансформатора, испытаниях и транспортировке трансформатора.

В докладе A2-114 «*Bushing failures with rapid and very rapid evolution time detected by online monitoring*»/«Повреждения вводов с быстрым и очень быстрым временем развития, обнаруженные системами on-line мониторинга» (TREETECH, ELETROBRAS CHESF и ELETROBRAS ELETROSUL, Бразилия) рассмотрены вопросы on-line мониторинга и выявления быстроразвивающихся повреждений трансформаторных вводов. Сообщено о двух случаях таких повреждений (в течение нескольких часов и в течение нескольких минут) трансформаторных вводов, на которых были установлены системы мониторинга, что позволило получить ценные сведения о динамике развития повреждений во вводах. Отмечено, что во втором случае у дежурного персонала практически не было времени на принятие решения об отключении трансформатора; вероятность возможных скоротечных повреждений делает оправданным автоматическое отключение трансформатора по сигналу от системы мониторинга. При этом необходимо решение проблемы исключения ложного срабатывания системы, и в докладе предложен подход для решения этой проблемы.

В докладе A2-115 «*Ultra high frequency (UHF) partial discharge detection for power transformers: sensitivity check on 800 MV power transformers and first field experience*»/«Обнаружение частичных разрядов в СВЧ диапазоне для силовых трансформаторов: проверка чувствительности на силовом трансформаторе 800 МВА и первый опыт полевого применения» (ALSTOM Grid AG и Alpiq EnerTrans AG, Швейцария) представлен опыт выявления частичных разрядов на силовом трансформаторе 800 МВА с помощью установленных СВЧ-датчиков частичных разрядов. Датчики, представляющие собой широкополосные СВЧ-антенны с известной амплитудно-частотной характеристикой вплоть до

3 ГГц, были установлены по периметру бака трансформатора на разных высотах (общее число датчиков 8 штук). Для локализации частичных разрядов положение датчиков выбрано таким образом, чтобы все значимые части трансформатора, такие как обмотки и переключающее устройство, могли быть одновременно охвачены, по крайней мере, тремя датчиками.

ПТ2 «Экологические аспекты проектирования и эксплуатации трансформаторов»

В докладе A2-201 «*Power transformers with environmentally friendly and hardly inflammable ester liquids*»/«Силовые трансформаторы с экологически чистыми и трудно воспламеняющимися жидкими эфирами» (Австрия и США) рассмотрены вопросы применения натуральных эфиров для обеспечения экологической чистоты и повышения пожаробезопасности силовых трансформаторов. Затронуты вопросы электрической прочности изоляции, теплового расчета, технологии пропитки твердой изоляции, совместимости различных материалов с натуральными эфирами. Отмечено, что простая замена трансформаторного масла натуральными эфирами может привести к снижению электрической прочности изоляции либо сократить срок службы трансформатора в связи с большим перегревом обмоток. Указано, что в связи с большей вязкостью натуральных эфиров применяемая при изготовлении масляных трансформаторов технология пропитки твердой изоляции требует усовершенствования, в том числе увеличения времени заливки по сравнению с трансформаторным маслом.

В докладе A2-202 «*Amorphous metal-based distribution transformers: evaluation of the current technology situation and a proposed design for short-circuit withstand*»/«Распределительные трансформаторы с аморфной сталью: оценка текущей ситуации с технологией и предложения по конструкции для обеспечения электродинамической стойкости» (компания Schneider Electric, Греция, Франция и Турция) затронуты вопросы применения аморфных сталей в распределительных трансформаторах. Приведены сведения о магнитных свойствах новых аморфных сталей, конструктивных особенностях магнитопроводов, обмоток и активной части в целом, технологии сборки активной части. Сообщено, что три трансформатора мощностью 400, 630 и 1250 кВ \cdot А успешно прошли испытания на электродинамическую стойкость при коротком замыкании.

В докладе A2-203 «*Considerations for the design, manufacture and retro-filling of power transformers with high fire point, biodegradable ester fluids*»/«Аспекты проектирования, изготовления и перезаливки силовых трансформаторов с биоразлагаемыми нату-

ральными эфирами с высокой температурой вспышки» (компания АВВ, Швеция, Бразилия и США) приведены результаты исследований, расчетов и измерений, проведенных для определения требуемых характеристик изоляционных материалов и возможности их применения в магнитопроводе и обмотках. Отмечено, что высокая вязкость натуральных эфиров оказывает большое влияние на конструкцию мощных силовых трансформаторов, поскольку приводит к увеличению температур наиболее нагретой точки и поверхности магнитопровода, низким скоростям течения эфиров сквозь обмотки и увеличению перепада температур эфира между нижними и верхними слоями эфира. Как следствие, проектирование таких трансформаторов требует тщательного теплового моделирования и выбора соответствующих изоляционных материалов для применения в магнитопроводе и обмотках.

В докладе A2-204 «*Energy efficient transformers and reactors - Some incentive models and case studies to show the long term profitability of such designs*»/«Энергоэффективные трансформаторы и реакторы — некоторые стимулирующие модели и конкретные примеры, демонстрирующие долгосрочную рентабельность таких конструкций» (АВВ, Швеция, Польша; N1, Дания и Linköping University, Швеция) рассмотрены вопросы повышения эффективности силовых трансформаторов и реакторов, снижения потерь и полной стоимости владения трансформаторами. Отмечено, что общие потери при передаче и распределении в среднем составляют около 10% передаваемой электроэнергии. Потери в трансформаторах и реакторах составляют треть от этого значения, при этом потери и полная стоимость владения могут быть существенно снижены за счет увеличения стоимости трансформаторов и реакторов. Отмечено, что при текущем уровне развития технологий имеется несколько возможных путей снижения потерь: увеличение расхода активных материалов (стали, проводов), применение аморфной стали в распределительных трансформаторах, применение транспонированных проводов, управление магнитными потоками рассеяния для снижения добавочных потерь в обмотках и металлоконструкциях и др.

В докладе A2-205 «*Quo vadis aged transformer fleets?*»/«Куда идет парк состаренных трансформаторов?» (компании EnBW Stuttgart, Siemens TR и Amprion, Германия) затронуты вопросы принятия решения о замене/продлении эксплуатации трансформаторов и рассматривается ряд, по мнению специалистов этих компаний, неоднозначных суждений, распространенных в области диагностики состояния трансформаторов. Приведены примеры трансформаторов 1968 и 1973 гг. выпуска, в кото-

рых по результатам диагностики отмечались крайне высокое содержание CO_2 и фурановых соединений, и было принято решение о замене, однако последующий анализ после вскрытия и разборки этих трансформаторов выявил вполне приемлемое состояние твердой изоляции обмоток.

В докладе A2-206 «*Practical application of on-site vapour phase drying technique on power transformers*»/«Практическое применение технологии сушки силовых трансформаторов в парах керосина на месте установки» (Китай) представлены сведения об используемых технологии, процедуре и разработанном комплекте оборудования для сушки в парах керосина силовых трансформаторов на месте их установки. Приведены примеры их применения на трансформаторе 110 кВ, изоляция которого намеренно была предварительно увлажнена, и трансформаторе 500 кВ, а также результаты соответствующих диагностических измерений, показывающих эффективность сушки в парах керосина на месте установки трансформаторов.

В докладе A2-207 «*Optimization of power transformers based on operative service conditions for improved performance*»/«Оптимизация силовых трансформаторов исходя из условий их работы с целью повышения технических характеристик» (компания ABB, REE, Iberdrola и ETSI University of Seville, Испания) предложено несколько концепций оптимизации конструкции исходя из условий эксплуатации трансформаторов, при которых они работают большую часть времени. Для иллюстрации основных преимуществ этих концепций приведены два примера оптимизации: в первом – на основе теплового баланса между обмотками, во втором – исходя из уровня звука.

В докладе A2-208 «*Electromagnetic simulations supporting the development of dry-type transformers for subtransmission voltage levels*»/«Электромагнитное моделирование при разработке сухих трансформаторов для уровня напряжения распределительных сетей до 69 кВ» (компания ABB, Испания, Швейцария и Германия) приведены результаты электрического и электромагнитного моделирования, проведенного в процессе выполнения своей новейшей разработки – сухого трансформатора на напряжение 72,5 кВ. Необходимо отметить важность этой работы, поскольку ранее сухие трансформаторы на столь высокий класс напряжения и уровень изоляции (одноминутное напряжение промышленной частоты 130 кВ, полный грозовой импульс 350 кВ) в мире не выпускались. Приведены основные параметры разработанного сухого трансформатора, его преимущества перед масляными трансформаторами и особенности конструкции. Представлены результаты трехмерного моделирования электриче-

ских полей обмоток и испытаний полномасштабных макетов изоляции, а также результаты расчета двух- и трехмерных полей рассеяния и перегревов обмоток и результаты испытаний на нагрев полномасштабного однофазного прототипа 25 МВА. Отмечено, что разработанные технологии и решения позволяют создать сухие трансформаторы на такое напряжение мощностью вплоть до 63 МВА с регулированием напряжения РПН или ПБВ.

В докладе A2-209 «*Ester insulating liquids for power transformers*»/«Изоляционные жидкости на основе эфиров для силовых трансформаторов» (University of Manchester, National Grid, UK Power Network, ALSTOM Grid, Scottish Power, M&I Materials, TН2В, Великобритания и Франция) рассмотрены вопросы применения эфиров в силовых трансформаторах. Приведены результаты исследований электрической прочности в квазиоднородных и неоднородных электрических полях при переменном и импульсном напряжениях двух эфиров (синтетический эфир Midel 7131 и натуральный эфир FR3) и, для сравнения, аналогичные результаты для минерального масла (Gemini X). Отмечено, что все три жидкости имеют близкие значения начальных напряжений появления частичных разрядов, вместе с тем, имеют место существенные отличия в развитии разряда (в частности, в эфирах имеет место большая скорость развития стримеров при более низких напряжениях), что необходимо учитывать при проектировании трансформаторов, заполненных эфирами.

В докладе A2-210 «*The use of ester transformer fluids for increased fire safety and reduced costs*»/«Использование натуральных эфиров в трансформаторах для повышения пожаробезопасности и снижения затрат» (M&I Materials Ltd, Великобритания и Kraftwerke Oberhasli AG, Швейцария) рассмотрены вопросы повышения пожаробезопасности и применения эфиров в силовых трансформаторах. Приведено сравнение физико-химических характеристик минеральных масел, синтетических и натуральных эфиров, в том числе температуры вспышки и воспламенения, а также результаты исследований воспламеняемости минерального масла и синтетического эфира Midel 7131. Отмечено, что применение трансформаторов, заполненных эфирами, может привести к снижению дополнительных затрат при эксплуатации за счет исключения потребности в системе пожаротушения и сокращения занимаемой площади.

В докладе A2-211 «*New paper-free insulation technology for dry high-voltage condenser bushings*»/«Новая технология изготовления высоковольтных вводов конденсаторного типа с твердой изоляцией без применения бумаги» (компания ABB, Швейцария)

представлена новая технология изготовления трансформаторных вводов с твердой изоляцией, получившая название Resin Impregnated Synthetics (RIS). В основе этой технологии лежит применение ткани из синтетических волокон, которые не поглощают влагу, что может исключить необходимость в сушке остова ввода перед пропиткой и сократить время изготовления ввода. Отмечено, что по новой технологии изготовлен ряд трансформаторных вводов на напряжение 24–170 кВ, успешные испытания этих вводов подтвердили их высокие электрические и тепловые характеристики. Сообщено об опытной эксплуатации вводов 123 кВ с целью проверки их работы в условиях сильных загрязнений и увлажнений на испытательной станции KIPITS (Южная Африка), расположенной на берегу Атлантического океана.

ПТЗ «Магнитная система трансформаторов»

В докладе A2-301 «*Direct current in transformers: effects and compensation*»/«Постоянный ток в трансформаторах: влияние и компенсация» (Siemens Transformers Austria GmbH и ARS Adaptive Regelsysteme GmbH, Австрия) рассмотрены вопросы влияния геомагнитно-индуцированных токов (ГМИТ) на силовые трансформаторы и вопросы их компенсации. Отмечено существенное влияние ГМИТ на потери холостого хода и уровень звука. Приведены результаты измерений уровня звука, потерь и тока холостого хода на двух трансформаторах (однофазном мощностью 134,4 МВА и трехфазном 100 МВА). Предложен метод компенсации негативного влияния ГМИТ.

В докладе A2-302 «*The dynamic harmonics characteristics research of Extra/Ultra high voltage magnetically controlled shunt reactor*»/«Исследование динамических гармонических характеристик управляемых шунтирующих реакторов сверх- и ультравысокого напряжения» (China Electric Power Research Institute, Китай) приведены результаты компьютерного моделирования работы управляемых шунтирующих реакторов сверх- и ультравысокого напряжения в переходных режимах. Проанализировано изменение содержания гармоник во времени. Отмечено, что полученные результаты могут быть использованы при выборе фильтров гармоник и усовершенствовании оборудования.

В докладе A2-303 «*Behaviour of transformers under DC/GIC excitation: phenomenon, impact on design/design evaluation process and modeling aspects in support of design*»/«Поведение трансформаторов при возбуждении постоянной составляющей геомагнитно-индуцированных токов: феномен, влияние на конструкцию, процесс анализа конструкции и аспекты моделирования для проверки конструкции» (компания ALSTOM Grid, Франция, Великобрита-

ния и Бразилия) анализируется поведение трансформаторов при воздействии постоянной составляющей геомагнитно-индуцированных токов. Приведены результаты измерений тока холостого хода и его гармонического состава в зависимости от уровня ГМИТ на трансформаторе мощностью 30 кВА. Приведены результаты компьютерного моделирования тока холостого хода в программе EMTP, результаты расчета поля рассеяния обмоток при отсутствии и наличии ГМИТ для трансформатора мощностью 550 МВА. Отмечено, что проблеме ГМИТ следует принимать во внимание на стадии проектирования и учитывать в конструкции трансформаторов.

В докладе A2-304 «*Effects of geomagnetically induced currents on power transformers and power systems*»/«Влияние геомагнитно-индуцированных токов на силовые трансформаторы и электроэнергетические системы» (компания АВВ, США, Швеция) рассмотрены феномен ГМИТ и увеличение температуры обмоток при воздействии ГМИТ. Отмечено, что ГМИТ могут приводить к частичному насыщению стали и увеличению тока холостого хода (х.х.), вместе с тем по форме ток х.х. представляет собой узкие импульсы тока, которые из-за своей непродолжительности в большинстве случаев не могут привести к опасным перегревам обмоток либо металлоконструкций активной части. Опасный перегрев в результате ГМИТ может быть только в тех трансформаторах, в которых частичное насыщение стали приводит к появлению циркулирующих токов в обмотках. Приводимые в литературе случаи повреждения трансформаторов от действия ГМИТ отмечены, как вызванные полностью или частично другими эффектами либо нестабильностью в электрической системе во время или после протекания ГМИТ. Основным эффектом воздействия ГМИТ указана нестабильность энергосистемы вследствие высоких уровней реактивной мощности и значительных высших гармоник тока.

В докладе A2-305 «*On-site measurement, suppressing and assessment of inrush current in a 1000 kV UHV transformer, with consideration of core saturation*»/«Измерение, подавление и оценка токов включения с учетом насыщения стали трансформатора ультравысокого напряжения 1000 кВ на месте установки» (Tokyo Electric Power Co. (TEPCO), Japan AE Power Systems Corp. (JAEPS), Toshiba Corp. и Mitsubishi Electric Corp., Япония) представлены результаты полевых исследований токов включения на трехфазной группе однофазных автотрансформаторов ультравысокого напряжения 1000 кВ с напряжением обмоток 1050/525/147 кВ (ВН/СН/НН) суммарной мощностью 3000 МВА. Группа автотрансформаторов включалась в сеть со

стороны среднего напряжения 500 кВ через выключатель, оборудованный предвключаемым резистором. По итогам измерений установлено, что без предвключаемого резистора наибольший ток включения достигал 5920 А, при наличии резистора — не более 550 А, т.е. включение резистора позволило снизить ток включения более чем в 10 раз. Предложен метод снижения остаточной намагниченности в магнитопроводе автотрансформатора и приведены результаты компьютерного моделирования в программе EMTP, показывающие хорошее совпадение с результатами измерений.

В докладе A2-306 «*Benefits of transformers based on triangular wound core configurations*»/«Преимущества трансформаторов с пространственной магнитной системой» (компания ABB, Швейцария, США и HSR, Швейцария) рассмотрены вопросы применения пространственных магнитопроводов в распределительных трансформаторах. Представлены результаты трехмерного моделирования магнитного поля в магнитопроводе, расчета потерь холостого хода и гармонического состава тока. Показаны основные преимущества пространственных магнитопроводов по сравнению с традиционными планарными, такие как более низкие потери холостого хода и магнитные поля вокруг трансформатора и меньшее содержание гармоник в токе.

Открытое дискуссионное заседание ИК А2 «Трансформаторы»

В рамках ИК А2 «Трансформаторы» состоялось открытое техническое совещание ИК А2 СИГРЭ, на котором по каждой предпочтительной теме специальными докладчиками сделаны выступления, обобщающие материалы представленных на 44-й сессии докладов и отражающие современное состояние развития трансформаторостроения. Специальным докладчиком по ПТ1 «Трансформаторы в сетях будущего» был г-н Carlos Dupont (Бразилия), ПТ2 «Экологические аспекты проектирования и эксплуатации трансформаторов» — г-н Ronny Mertens (Бельгия), ПТ3 «Магнитная система трансформаторов» — г-н Stephans Voss (Германия).

К дискуссии руководством ИК А2 были предложены актуальные вопросы, а представители разных стран и компаний сделали короткие сообщения, отражающие их мнение, опыт и наработки.

В рамках ПТ1 на дискуссию было вынесено восемь вопросов: о наиболее значимых аспектах длительного on-line мониторинга; о наиболее чувствительном методе мониторинга состояния вводов; об использовании метанола в качестве нового маркера старения твердой изоляции; о трудностях с реализацией, работой и обслуживанием систем on-line мониторинга; о трудностях при вводе в эксплуата-

цию систем мониторинга; о влиянии новых технологий и снижении стоимости датчиков на уровень контроля состояния оборудования; о перспективных аспектах конструирования, производства и испытания оборудования ультравысокого напряжения; об особенностях проектирования трансформаторов с учетом высокого уровня гармоник вследствие работы выпрямителей.

В ПТ2 на дискуссию было вынесено пять вопросов: о создании экологически чистых трансформаторов; о требованиях способности к биоразложению и сниженных потерь в технических спецификациях; о дополнительных экологических требованиях; об опыте эксплуатации экологичных трансформаторов; о продлении срока службы и учете экологической чистоты трансформаторов.

В ПТ3 на дискуссию было вынесено семь вопросов: о необходимости включения в технические спецификации дополнительных требований в части качества электроэнергии; о влиянии постоянных токов на работу трансформаторов; об особенностях проектирования и оценки конструкции трансформаторов с учетом воздействия геомагнитно-индуцированных токов; о мерах по снижению опасности токов включения трансформаторов; о применении трансформаторов и реакторов с системами управления; о влиянии современных систем моделирования на процесс проектирования трансформаторов и реакторов; о применении магнитопроводов с пространственной магнитной системой.

Рабочие группы и публикации ИК А2 «Трансформаторы»

В рамках закрытого заседания ИК А2 «Трансформаторы» состоялось обсуждение работы рабочих групп (РГ):

РГ А2.33 «Практика пожаробезопасности» (WG A2.33 Fire safety practices);

РГ А2.36 «Процесс закупок» (WG A2.36 Procurement process);

РГ А2.37 «Исследование надежности» (WG A2.37 Reliability survey);

РГ А2.38 «Тепловое моделирование» (WG A2.38 Thermal modelling);

совместная РГ А2/С4.39 «Переходные взаимодействия трансформаторов с внешней сетью» (РГ JWG A2/С4.39 Transient interaction);

РГ А2.40 «Длительное подавление сульфида серы и оценка риска» (WG A2.40 Copper sulphide long-term mitigation and risk assessment);

совместная РГ А2/Д1.41 «Проводимость масла» (JWG A2/Д1.41 Oil conductivity);

РГ А2.42 «Транспортировка» (WG A2.42 Transportation);

РГ А2.43 «Надежность вводов» (WG А2.43 Bushing reliability).

В 2012 г. РГ А2.36 завершает свою работу; подготовлены к печати три брошюры СИГРЭ:

№ 528 «Руководство по составлению технической спецификации для силовых трансформаторов» (Guide for preparation of specifications for power transformers);

№ 529 «Руководство по проведению анализа конструкции силовых трансформаторов» (Guide for conducting Design Review for power transformers);

№ 530 «Руководство по оценке производственных возможностей трансформаторных заводов» (Guide for Transformer Factory Capability Assessment for power transformers).

Также завершает свою работу РГ А2.33 и готовит к публикации соответствующую брошюру СИГРЭ «Руководство по практике пожаробезопасности».

В 2012 г. в рамках ИК А2 «Трансформаторы» начали работу новые рабочие группы:

РГ А2.48 «Технические решения и эксплуатация маслонаполненных шунтирующих реакторов высокого напряжения» (WG А2.48 Technology and utilization of Oil Insulated High Voltage Shunt Reactors);

совместная РГ А2.49 «Оценка состояния силовых трансформаторов» (JWG А2.49 Condition Assessment of Power Transformers);

совместная РГ А2.50 «Влияние распределенных источников энергии и обратных потоков мощности на сетевые и распределительные трансформаторы» (JWG А2.50 Effect of the distributed energy sources and consequent induced reverse power flow (step up) on transmission and distribution transformers).

Краткий обзор материалов Технической выставки СИГРЕ-2012

В технической выставке СИГРЭ-2012 приняли участие около 200 компаний со всего мира, в том числе крупные производители трансформаторов (ABB, ALSTOM, SIEMENS, HYOSUNG, TOSHIBA и др.), комплектующих для силовых трансформаторов, в частности РПН – компании MR (Германия) и НМ (Китай), изоляционных компонентов – компания ENPAU (Турция), а также приборов для диагностики и мониторинга состояния трансформаторов (DOBLE, OMICRON и др.).

Среди компаний, производящих трансформаторы, следует отметить компанию ABB, представившую на выставке свою новую разработку – сухой трансформатор 72,5 кВ.

Компанией RHM International (США) представлены трансформаторные вводы конденсаторного типа с твердой изоляцией по технологии RIF

(Resin Impregnated Fiberglass), в основе которой лежит применение стекловолна для изготовления остова ввода. Вводы изготавливаются на наибольшее рабочее напряжение 40,5–252 кВ. Компанией также представлены трансформаторы тока для наружной установки с твердой изоляцией, выполненные по той же технологии; особенностью трансформаторов тока является применение U-образной токоведущей части с RIF-изоляцией и конденсаторными обкладками для выравнивания электрического поля.

Отдельного внимания заслуживают стенды компаний, специализирующихся в области высокотемпературной сверхпроводимости, что отражает новое направление в развитии мирового трансформаторостроения. Так, компанией BRUKER (Германия) представлен макет сверхпроводящего токоограничителя индуктивного типа.

Компания SuperPower (США) представила свою продукцию – провода на основе высокотемпературной сверхпроводимости 2-го поколения и технические материалы об опыте их применения. Компанией представлена информация о выполнении в 2010–2015 гг. по заказу Министерства энергетики США проекта по созданию нового сверхпроводящего трансформатора с совмещенной функцией токоограничения. Помимо SuperPower в проекте принимают участие компании Waukesha Electric Systems, University of Houston и Southern Carolina Edison. Полная стоимость проекта составляет 21,5 млн долл. США, из них 10,7 млн – из бюджета Министерства энергетики США. В результате выполнения проекта запланирована разработка трехфазного трансформатора мощностью 28 МВА на напряжения 69/12,47 кВ, установка которого запланирована на пилотной подстанции проекта Smart Grid компании Southern Carolina Edison.

Мероприятия ИК А2 «Трансформаторы» в 2013–2014 гг.

Коллоквиум ИК А2 и С4 (2013). В 2013 г. в Цюрихе, Швейцария пройдет совместный коллоквиум комитетов А2 «Трансформаторы» и С4 «Технические характеристики энергосистем». Предпочтительные темы коллоквиума следующие.

ПТ1 «Взаимодействие между трансформатором и электрической сетью»:

резонансные и феррорезонансные явления между трансформаторами и внешней сетью, геомагнитно-индуктированные токи, влияние постоянного тока, удаленное питание, токи включения;

переходное восстанавливающее напряжение выключателей в случае линий, питающих трансформаторы; влияние разъединителей; воздействия при

синхронизированном включении трансформаторов и шунтирующих реакторов;

точное моделирование сети с учетом трансформатора, как ключевого элемента.

ПТ2 «Опыт эксплуатации фазопоротных трансформаторов»:

применение и преимущества;

технические требования, производство, транспортировка и установка фазопоротных трансформаторов;

характеристики, надежность, эксплуатация и обслуживание.

ПТ3 «Планирование сетей в контексте парка старенных трансформаторов»:

индикаторы старения трансформатора для обслуживания и новых инвестиций;

эффективность трансформаторов, полная стоимость владения.

Дополнительная информация по коллоквиуму ИК А2/С4 представлена на специальном сайте <http://www.cigre2013zurich.org/>. Основные сроки: предоставление тезисов доклада – февраль 2013 г., предоставление текста доклада – 18 июля 2013 г.

Генеральная сессия СИГРЭ-2014

Утверждены следующие предпочтительные темы 45-й сессии СИГРЭ, которая состоится в 2014 г. в Париже, Франция.

ПТ1 «Передовая практика управления ресурсом»:

индикатор состояния как инструмент для оценки состояния, применения ранжирования парка трансформаторов по состоянию и важности;

передовой опыт стратегий обслуживания и новых инвестиций, маркеров старения твердой изоля-

ции, on-line-мониторинга и диагностики, роль анализа причин повреждений при вскрытии трансформаторов;

методики минимизации последствий от наиболее значимых событий, требования и практика использования резервных трансформаторов.

ПТ2 «Трансформаторы специального применения»:

применение фазопоротных, преобразовательных, промышленных, морских/подводных трансформаторов, управляемых шунтирующих реакторов и пр.;

технические требования, проектирование, изготовление и испытания;

характеристики, надежность, эксплуатация и обслуживание.

ПТ3 «Практический опыт использования нетрадиционных материалов и технологий»:

опыт с новыми изоляционными жидкостями, газами и твердыми диэлектриками (обслуживание, характеристики, диагностика, затраты полного срока эксплуатации), улучшенные материалы и технологии для обмоток и магнитопровода;

опыт с новыми технологиями для компонентов (вводов, РПН и др.);

опыт и применение трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводимостью.

Автор: Ларин Василий Серафимович окончил Институт электроэнергетики МЭИ (ТУ) 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 ИКФ2 «Трансформаторы» СИГРЭ.

* * *

Поздравление

В конце апреля с.г. исполнилось 20 лет создания издательства «ЗНАК», с 1994 г. являющегося издателем журналов «Электричество», «Электротехника», «Светотехника» и «Light&Engineering».

В начале 90-х годов, когда финансирование государственных издательств, в том числе и «Энергоатомиздата», было прекращено, предложение руководителя издательства «ЗНАК» Л.С. Слуцкина, выпускника МЭИ, кандидата техн. наук, продолжить выпуск старейших российских научных электротехнических изданий, став их издателем, было с благодарностью принято.

Таким образом, уже почти два десятилетия издание указанных журналов успешно осуществляет издательство «ЗНАК», сотрудников которого мы сердечно поздравляем со знаменательной датой и желаем им здоровья и благополучия.

Надеемся на дальнейшее процветание и развитие издательства «ЗНАК»!

