



Вопросы трансформаторостроения на 43-й сессии СИГРЭ

(22—27 августа 2010 г., Париж)

ЛОХАНИН А.К.

На церемонии открытия сессии с основным докладом «Инициативы и перспективы развития энергетики для обеспечения низкой эмиссии углерода/*Initiatives and perspectives by the power industry towards a low carbon emission society*» выступил председатель совета директоров компании «Kansai Electric Power Electric Company Inc.» *Шосуке Мори (Shosuke Mori)*.

В докладе отмечалось, что для решения задачи уменьшения эмиссии углерода на 25% по сравнению с уровнем 1990 г. (эту задачу ставит перед собой Япония) при увеличении объема потребляемой энергии¹ необходимо изменить концепцию развития энергетики. При этом электроэнергетика здесь играет фундаментальную роль.

В настоящее время в Японии принята концепция развития энергетики «Три Е» — Energy security, Economy and Environmental protection / Энергетическая безопасность, экономичность и защита окружающей среды.

Для реализации этой концепции необходимо расширить электрификацию во всех отраслях хозяйственной деятельности, увеличить долю экологически чистых генерирующих станций, таких как атомные станции и станции на возобновляемых источниках энергии (солнечные, ветряные).

При этом необходимо будет повысить эффективность атомных станций и теплостанций (в частности за счет применения котлов с ультрасуперкритическими параметрами пара), расширить применение газотурбинных установок и быстрорегулируемых источников энергии (аккумулирующие электростанции, накопители).

К 2020 г. в Японии намечено установить солнечные батареи на суммарную мощность 28 ГВт, что обеспечит 15% требуемой мощности. Однако при отсутствии пиковых нагрузок возникает проблема «избыточной мощности», поскольку атомные станции и речные гидроэлектростанции работают в базисном режиме. Одно из решений — создание быстро регулируемых гидроаккумулирующих систем и накопителей энергии. Возможно также ввести ограничение (в определенные дни) на использование солнечной и ветряной энергии.

Все это приведет к новой концепции создания энергетической сети — так называемой «умной сети» (smart grid).

«Умная сеть» включает в себя не только традиционное понимание обеспечения баланса генерации и потребления электроэнергии с помощью системного оператора, но и новый подход к управлению возобновляемыми источниками энергии и накопителями на базе современных информационных и телекоммуникационных технологий.

Реализация программы «умная сеть» потребует привлечения новых интеллектуальных сил. Для подготовки необходимого числа инженеров-электроэнергетиков в 2008 г. в Японии и была основана «Академия энергетики».

На заседании дискуссионной группы исследовательского комитета А2 «Трансформаторы» было представлено 29 докладов по трем предпочтительным темам:

нарушения работы трансформаторов при их эксплуатации;

срок службы трансформаторов;

моделирование трансформаторов.

По первой теме было представлено семь докладов. Большинство из них посвящены проблеме пожаров в трансформаторах, мерам по повышению прочности бака и средствам по снижению негативных последствий пожара (загрязнение окружающей среды, повреждение другого электрооборудования, затраты на ликвидацию последствий пожара).

Доклад А2 101 (Австралия) «Вероятность пожара в трансформаторе и стратегия ее уменьшения/*The risk of transformer fires and strategies which can be applied to reduce the risk*». При общей повреждаемости силовых трансформаторов 0,5–2,5% в год (среднее ~1%) вероятность пожара составляет ~10% общей повреждаемости, т.е. ~0,1%. Она растет с увеличением мощности и класса напряжения трансформатора.

При сроке службы трансформатора 40 лет вероятность пожара на этот срок составляет 4%. Опыт эксплуатации трансформаторов в Австралии и Новой Зеландии показал, что основной причиной пожара (31%) являются повреждения вводов с бумажно-масляной изоляцией и кабельных муфт и только 10% связаны с повреждением РПН. Представлено описание случаев пожара. Отмечается,

¹ На период 2005–2030 гг. планируется удвоение потребления электроэнергии в мире.

что 54% случаев пожара были вызваны повреждением бака или установки ввода.

Для уменьшения вероятности пожара рекомендуется использовать вводы с твердой изоляцией, исключить применение кабельных муфт с воздушной или маслonaполненной изоляцией, или предусматривать в них клапан для выноса дуги, повысить прочность и пластичность бака, применять мониторинг анализа растворенных газов (особенно для трансформаторов большой мощности).

Доклад A2 102 (Канада) «*Предотвращение разрыва бака в трансформаторе/Power transformer tank rupture prevention*». Приведена статистика пожаров в трансформаторах и реакторах в системе Гидро-Квебек за 1985–1986 гг. в классах напряжения 120–735 кВ. Средняя вероятность пожара составила 0,14%. Она растет с повышением класса напряжения. Приведена графика по местам повреждения и случаям разрыва бака. Оценивается энергия дуги, приводящая к разрыву бака. Определяется энергия, которую может выдержать обычная конструкция бака. Для трансформаторов 735 кВ она находится в пределах 4–10 МДж. Даны рекомендации по значениям энергии дуги, которую должен выдержать бак, для различных классов напряжения.

Доклад A2 103 (Корея) «*Технологии предотвращения разрыва бака в трансформаторах большой мощности/Tank rupture prevention technology for a large power transformer*». Дан анализ распределения давления внутри бака трансформатора во времени в зависимости от места возникновения дуги. Для предотвращения разрыва бака рекомендуется устанавливать несколько клапанов давления, расположение которых определяется расчетом.

Доклад A2 104 (Польша) «*Повреждения высоковольтных вводов в эксплуатации, диагностика и моделирование вводов/HV bushing failure in service, diagnostic and modelling of oil-type bushings*». Отмечается увеличение повреждаемости вводов с бумажно-масляной изоляцией, проработавших больше 30 лет. Анализируется механизм повреждения вводов. Представлены типичные случаи повреждений. Анализируются методы диагностики изоляции вводов, которые показали недостаточную эффективность стандартного метода измерения емкости и тангенса дельта изоляции в части определения начальной стадии повреждения. Измерения частичных разрядов обеспечивают более высокую чувствительность к начальным повреждениям.

Доклад A2 105 (Австралия) «*Стратегия уменьшения вероятности пожара и разлива масла на основании опыта эксплуатации/Transformer fire mitigation and oil spill containment – strategies development from experience*». Представлены практические меры уменьшения вероятности пожаров, используемые в

энергосистеме Trans Grid (Австралия). Приведено описание ряда случаев пожара в трансформаторах на напряжение 132 и 330 кВ. Отмечается, что в случае пожара в автотрансформаторе 357 МВА 330/132 кВ потребовалось удалить из подстанции около 1000000 литров масла, воды и огнетушащих жидкостей, 1000 т загрязненной почвы и 400 т загрязненного гравия.

Для снижения затрат от последствий пожара в энергосистеме создана система сброса масла из трансформатора в специальные отдельно стоящие маслоприемники и ввода воды непосредственно в бак трансформатора для охлаждения магнитопровода и обмоток. В качестве кардинального решения предлагается замена масляных трансформаторов на элегазовые.

Доклад A2 106 (Россия) «*Новый подход к конструированию пожаро- и взрывобезопасных масляных трансформаторов/A new approach to design of oil-filled transformers with high fire and explosion safety*». Предложен новый метод испытания маслonaполненного оборудования на взрывобезопасность путем использования управляемого устройства импульсного давления. Энергия дугового разряда в одной экспериментальной модели достигала 100 кДж, в другой – 400 кДж, при амплитуде тока до 50 кА и длительности дуги 3–10 мс. Определено, что каждый мегаджоуль при разряде образует 110 л газа. Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости изменения объема газа от энергии дуги и времени. Предложен метод численного расчета распределения давления при возникновении дуги.

Доклад A2 107 (США) «*Сравнительный анализ трансформаторов мощностью 50 МВА, заполненных натуральным эфиром и трансформаторным маслом/Detailed performance of a 50 MVA transformer filled with a natural ester fluid versus mineral oil*». Приведены результаты испытаний на нагрев трансформатора 50 МВА 141/13 кВ при заполнении его натуральным эфиром или минеральным маслом. Показано, что из-за более высокой вязкости натурального эфира перегрев при заполнении трансформатора натуральным эфиром выше, чем при минеральном масле. Для наиболее нагретой точки обмотки эта разница может достигать 20 °С и более.

Дискуссия. При обсуждении первой темы отмечались случаи повреждения трансформатора вследствие землетрясений, прямого попадания молнии и резонансных перенапряжений в системе трансформатор – кабель. Сообщалось о шести случаях пожара в автотрансформаторах 600 МВА 400/225 кВ, произошедших за 30 лет эксплуатации, т.е. вероятность – 0,015% в год. Отмечалось, что баки обычных трансформаторов выдерживают давление 1–2 бара и в районе фланцев до 3 бар, что в ряде

случаев недостаточно, чтобы исключить разрыв бака.

Наиболее эффективной мерой по уменьшению вероятности пожара является применение вводов с твердой изоляцией, а также проведение мониторинга переключателя и контроль влагосодержания во вводе и переключателя.

Другой мерой является использование жидкости с более высокой точкой воспламенения (эфиры и кремнийорганические жидкости), а также добавление в масло газопоглощающих присадок.

Приведена информация о продолжении работ по усилению механической прочности бака.

По второй теме было представлено 12 докладов.

Проблема оценки остаточного ресурса трансформатора – одна из ключевых, и значимость ее все время возрастает. Несмотря на большой объем информации, полученной как на основании исследований, так и на основе опыта эксплуатации, до настоящего времени остается еще много неопределенностей, затрудняющих оценку срока службы. Представленные доклады отражают прогресс в этом направлении с учетом применения новых методов анализа и новых критериев оценки.

Доклад A2 201 (Франция, Канада) «*Диагностика старения с помощью химического индикатора. Влияние конструкции – стержневой или броневой/Ageing diagnosis by chemical markers-influence of core-type and shell-type technology*». Приведены результаты оценки старения бумажной изоляции на основе измерения степени полимеризации, соотношения CO_2/CO , измерения содержания фуранов и метанола в масле. Исследования проводились на трансформаторах стержневого и броневого типа. Показано, что содержание метанола дает наилучшую корреляцию со степенью полимеризации. Его применение для оценки старения изоляции рекомендуется наряду с другими методами.

Доклад A2 202 (Швейцария, Канада) «*Виброакустическая диагностика переключающего устройства как метод повышения эксплуатационной надежности трансформатора/Vibro-acoustic diagnostic: contributing to an optimized On-Load Tap Changer (OLTC) maintenance strategy*». Отмечено, что 45% отказов трансформатора связано с переключающим устройством. Представлен анализ опыта эксплуатации переключающих устройств под нагрузкой (~1200 единиц) в системе ГидроКвебек (Канада). Указаны причины неполадок и вероятность их появления в зависимости от срока работы переключателя. Отмечается, что приблизительно 12% неполадок возникает в период между сроками плановой проверки (~1 раз в 6 лет). Приведен опыт оценки состояния переключающего устройства с помощью виброакустической диагностики. Показана эффек-

тивность этого метода, который может быть использован как в системе мониторинга, так и при периодических проверках.

Доклад A2 203 (Аргентина) «*Новая методология оценки остающегося срока службы масляных трансформаторов/New methodology for remanent life assessment of oil-immersed power transformers*». Представлена методология оценки остаточного ресурса, основанная на комплексном учете основных факторов, влияющих на старение бумажно-масляной изоляции. Каждый из влияющих факторов (возникновение токов КЗ, концентрация растворенных газов и ее изменение во времени, график нагрузки, срок эксплуатации) индексируется, и на основе метода нечетной логики оценивается вероятностное состояние трансформатора с точки зрения остаточного ресурса. Приводятся примеры успешного применения предлагаемого подхода.

Доклад A2 204 (Германия) «*Значимость окислов углерода и их соотношений для интерпретации результатов анализа растворенных газов в трансформаторах и переключателях/Relevance and importance of the carbon oxide gases and their ratio for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers and tap changers*». Приведены результаты исследований образования CO и CO_2 и их соотношений в различных изоляционных жидкостях при воздействии высокой (~150 °C) температуры. Показано, что образование CO и CO_2 может быть обусловлено не только разложением твердой изоляции, но и самой жидкости. Приведены данные хроматографического анализа растворенных газов, в том числе CO , CO_2 и их соотношений для ряда трансформаторов (30–220 кВ) с различной системой защиты масла, показывающие что в нормально работающих с большой нагрузкой трансформаторах соотношение CO_2/CO находится в диапазоне от 0,5 до 5,0. В связи с этим заключение о старении, основанное на использовании соотношения CO_2/CO (обычный критерий $\text{CO}_2/\text{CO} < 3$), может быть некорректным.

Приведены результаты исследований образования растворенных газов в различных типах переключающих устройств в зависимости от числа операций. Показано, что использование соотношения CO_2/CO повышает эффективность оценки состояния переключателя.

Доклад A2 205 (Япония) «*Эксплуатация составившихся трансформаторов и новые методы диагностики на базе анализа растворенных газов в Японии/Aged transformer maintenance and diagnostics using new methods with dissolved gas analysis in Japan*». Приведен опыт Японии по анализу растворенных в масле газов. Дана градация состояния трансформатора (три уровня) в зависимости от числа характерных газов. Представлены основные этапы диагностики и критерии оценки. Приведены диагности-

ческие нормы. В качестве нововведений даны уравнения по оценке площади перегрева и общие уравнения оценки состояния трансформатора, учитывающие вклад каждого газа с учетом эмпирических, основанных на опыте, коэффициентов. Отмечается необходимость дальнейшего развития работ по уточнению состояния трансформатора.

Доклад А2 206 (Мексика, Бразилия, Канада) «*Опыт с беспроводной системой мониторинга, установленной производителем на трансформаторах в энергосистеме Мексики/Experiences with wireless transformer monitoring system installed by the manufacturer and operated at strategically important locations of the Mexican grid*». Приведено описание беспроводной системы мониторинга трансформатора, включающей мониторинг ввода, влагосодержания в масле, температуры обмоток и магнитопровода, частиц в масле, хроматографический анализ семи растворенных газов, регистрацию частичных разрядов и мониторинг расширителя.

Доклад А2 207 (Новая Зеландия) «*Опыт по заказу генераторного трансформатора мощностью 225 МВА на напряжение 220/16/16 кВ/Experiences with procuring a 220/16/16 kV 225 MVA generator transformer*». Рассмотрен пример заказа трех генераторных трансформаторов для гидроэлектростанции Белмор (Новая Зеландия) мощностью 232 МВА 220/16/16 кВ с расщепленными обмотками взамен ранее установленных шести двухобмоточных трансформаторов мощностью 112,5 МВ А каждый. Отмечается, что техническая брошюра СИГРЭ 156 «Руководство для проведения анализа конструкции трансформаторов 100 МВА и более напряжением 123 кВ и выше» может быть положена в основу при заказе трансформатора, однако требуется учет ряда специфических факторов применительно к конкретному заказу. В частности, отмечаются различия в оценке потерь и в плане качества, потребовавшего более детального анализа условий эксплуатации.

Доклад А2 208 (Польша) «*Прогресс в диагностике генераторных трансформаторов в Польше/Advanced diagnostics of generator step-up transformers in Polish practice*». Отмечается ряд повреждений мощных (240 и 270 МВА) генераторных трансформаторов за последние годы. Основные причины: перенапряжения в сети 220 кВ, наличие частиц в масле, повреждение вводов (в основном с большим сроком службы), локальные перегревы, дефекты в магнитопроводе. Приведены результаты анализа ряда случаев повреждений. На основе опыта эксплуатации были улучшены и расширены методы диагностики. Наряду с существующими методами введен метод частотного анализа (существующая база данных охватывает 68% трансформаторов), измерения влагосодержания главной изоляции (в основном измерения $\text{tg}\delta$ и емкости в диа-

пазоне частот 1—1000 Гц), расширенный анализ масла (в том числе определение активной серы, индекса старения), расширена программа диагностики вводов (хроматография, влагосодержание, $\text{tg}\delta$).

Доклад А2 209 (Испания) «*Новый подход к обслуживанию силовых трансформаторов и основного вспомогательного оборудования. Испытания без подключения к сети и мониторинг/New approach of maintenance of power transformers and main accessories: off-line test vs. On-line monitoring systems*». Представлен опыт по диагностике силовых трансформаторов трех энергетических компаний Испании (Iberdrola Distribucion Electrica, Red Electrica de Espana, Iberdrola Power Generation). Диагностика проводилась как на работающих трансформаторах, так и на отключенных (без напряжения). Общий вывод: диагностика без напряжения (по ней накоплен наибольший опыт) необходима и достаточно эффективна. Основная задача — выбрать интервал времени между измерениями, т.е. оптимизировать отношение стоимость/польза.

Широкое применение мониторинга требует уверенности в надежности измерений и разработки специальных алгоритмов, позволяющих правильно оценить большой объем получаемой информации.

Доклад А2 210 (Швеция) «*Новый метод для оценки состояния партий шунтирующих реакторов/New tool for fleet screening of shunt reactors*». Представлена процедура распространения метода ранжирования, успешно применяющегося для силовых трансформаторов, на партию (20 штук) шунтирующих реакторов. При этом учитывались особенности характеристик реакторов и режим их работы. Ранжирование проводилось по трем основным аспектам: электрический, механический и тепловой.

Доклад А2 211 (Швейцария) «*Опыт Швейцарии по испытаниям высоким напряжением и диагностике мощных силовых трансформаторов на месте установки/The Swiss experience of on-site high voltage tests and diagnostic measurements on large power transformers*». Представлен шестнадцатилетний опыт Швейцарии по диагностике мощных (15—500 МВА) силовых трансформаторов (вплоть до напряжения 525 кВ). Наиболее распространенные методы: измерение частичных разрядов, частотный анализ, метод поляризации—деполяризации, хроматография. Наиболее подробно представлен анализ результатов измерений частичных разрядов. Были испытаны 155 новых трансформаторов (из них 76 на подстанции) и 116 старых трансформаторов (из них 112 на подстанции). Несколько трансформаторов по результатам измерений были отбракованы или выведены из эксплуатации. Испытания индуктированным напряжением на месте установки проводились от преобразователя, подключаемого к об-

мотке низкого напряжения. Испытания приложенным напряжением — с помощью последовательно-резонансной схемы. Отмечена неэффективность метода в части локации источника ЧР.

Доклад A2 212 (Великобритания) «Оценка срока службы трансформатора на основе данных, полученных из трансформаторов, выведенных из эксплуатации и моделирования теплового поля/*Transformer life prediction using data from units removed from service and thermal modelling*». Дан анализ повреждаемости трансформаторов в системе National Grid в зависимости от срока эксплуатации. Приведены данные по степени полимеризации бумаги, полученные из трансформаторов, выведенных из эксплуатации, в зависимости от срока их службы. Результаты анализа показали, что вероятность повреждения трансформатора однозначно не связана с его сроком службы, а степень полимеризации имеет большой разброс значений при различных сроках службы.

Опыт эксплуатации и исследования на моделях показали, что старение трансформатора определяется главным образом термическими условиями. Статистический анализ не является надежным при оценке срока службы. Выход из строя трансформаторов из-за старения, в основном, начинается после 40 лет эксплуатации.

Дискуссия. При обсуждении отмечалось, что существующие критерии при анализе растворенных газов не учитывают различия между трансформатором со «свободным дыханием» и с пленочной защитой. Обращалось внимание на трудности диагностирования при превышении предельных значений газосодержания. Рекомендуются проводить регулярные наблюдения уровня газосодержания. Указывалось также на неоднозначность связи (в ряде случаев) между степенью полимеризации и содержанием фурановых соединений или химических индикаторов. Указывалось на необходимость использования нескольких методов при оценке срока службы. Отмечалось также, что скорость старения в значительной степени зависит от влагосодержания изоляции: при достаточно низком влагосодержании срок службы трансформатора может составлять 65–70 лет.

По третьей теме было представлено десять докладов. Эти доклады затрагивали две основные темы: переходные процессы и моделирование тепловых процессов, основанное на современной технике анализа и сопоставлении с результатами экспериментальных исследований. Значимость первого направления объясняется увеличением случаев повреждений трансформаторов при коммутациях в КРУЭ. Значимость второго объясняется тем, что тепловые процессы являются определяющими при

старении трансформатора и оценке его нагрузочной способности.

Доклад A2 301 (Германия) «*Определение потоков масла и распределения температуры в силовых трансформаторах с помощью компьютерной модели/Prediction of the oil flow and temperature distribution in power transformers by CFD*». Представлены результаты исследований распределения температур в трансформаторе с помощью программы ANSYS-CFX и специально разработанной фирмой Сименс программы UNIFLOW. Результаты расчета сопоставлялись с результатами, полученными на физической модели. Результаты сопоставления удовлетворительны, что позволяет использовать предложенный метод для оптимизации конструкции трансформатора.

Доклад A2 302 (Швеция) «*Моделирование и измерение переходных процессов во вводе «трансформатор – КРУЭ» при высокочастотных воздействиях/Modelling and measurements of VFT properties of a transformer to GIS bushing*». Представлены результаты расчета и измерений перенапряжений во вводе «трансформатор – КРУЭ» при высокочастотных воздействиях. Ввод при моделировании представлялся многоэлементной схемой. Показано, что при совпадении частоты воздействия с собственной частотой ввода возникают значительные перенапряжения во вводе, которые могут вызвать его повреждение. При испытании ввода на выдерживание таких воздействий путем приложения срезанного импульса частота высокочастотных колебаний после среза зависит от месторасположения срезающего промежутка, что необходимо учитывать при выборе схемы испытаний.

Доклад A2 303 (Испания, Франция) «*Мощный генераторный трансформатор с низкой температурой наиболее нагретой точки для АЭС компании EDF/Large generator step up transformers with low temperature hot spot for EDF nuclear power plants*». Представлены результаты исследований и испытаний трансформатора мощностью 570 МВА на 400 кВ для замены существующих трансформаторов. Новые трансформаторы должны иметь более низкую температуру наиболее нагретой точки (650 вместо 780 по МЭК) и более низкие потери. Исследования проводились как на математической трехмерной модели, так и путем измерений с помощью оптоволоконной системы на реальном трансформаторе при тепловых испытаниях и в условиях эксплуатации. Различия между расчетами и измерениями находились в диапазоне $-7\text{ }^{\circ}\text{C} \div +5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что считалось удовлетворительным. Снижения потерь были обеспечены за счет уменьшения значений циркулирующих токов путем транспозиции и установкой магнитных шунтов. Температура наиболее нагретой точки при ис-

питаниях на нагрев оказалась на несколько градусов ниже, чем заданная в спецификации.

Доклад A2 304 (Австралия) «Сопоставление различных методов моделирования распределения температур в трансформаторе с результатами измерений/Comparison of various approaches to transformer thermal modelling with direct temperature measurements». Дано сопоставление результатов моделирования распределения температур в трансформаторе мощностью 468 кВ А, 22 кВ на базе исследования традиционной модели по МЭК 60354 «Нагрузочная способность масляных трансформаторов» и модели, основанной на применении нейронно-неопределенной логики. Проведены также сопоставления на трансформаторе 50 МВА, 132/11/11 кВ, заполненным растительным маслом. Показано, что использование новой модели устраняет ряд неопределенностей и дает лучшее согласие с результатами измерений.

Доклад A2 305 (Канада) «Оптимизация перегрузок трансформатора с помощью модели распределения температур/Optimization of transformer overload using advanced thermal modelling». Приведено сопоставление распределения температур в трансформаторе 66 МВ А, 225/26 кВ с помощью двух моделей (Thermal Network Model – TNM и Computational Fluid Dynamics – CFD) и их сравнение с результатами прямых измерений (используя оптоволоконную связь). Показано, что оба метода дают близкие результаты в случае, если потери распределены равномерно. При неравномерном распределении потерь различие существенно. Результаты, полученные с помощью метода CFD, лучше коррелируются с результатами измерений.

Доклад A2 306 (Египет) «Явления, связанные с коммутацией емкостных токов в КРУЭ и их влияние на обмотку силового трансформатора, установленного на мощной электростанции Egunna/Phenomena associated with switching capacitive currents in GIS substations and its effect on the winding of power transformer of a large power plant in Egypt». Сообщается о нескольких случаях повреждения трансформатора 500 МВА 500/220/11 кВ, связанных с коммутацией разъединителя в КРУЭ. Анализируются воздействия на обмотку трансформатора при этих коммутациях и делается вывод об их опасности. Обсуждаются возможные меры по уменьшению опасности воздействий (например, изменение очередности коммутаций).

Доклад A2 307 (Таиланд) «Нагрузочная способность трансформатора, определенная на базе непосредственных измерений температуры наиболее нагретой точки и потерь с учетом тока нагрузки/Transformer loadability based on directly measured hot-spot temperature and loss and load current correction exponents». Приведены результаты измерений рас-

пределения температур на четырех трансформаторах. Показано, что нет корреляции между локальными потерями и локальной температурой, что говорит о трудности определения наиболее нагретой точки расчетом. Рекомендуется при испытаниях устанавливать по крайней мере восемь датчиков на основной обмотке мощного трансформатора, шесть датчиков на трансформаторе средней мощности и четыре – на малой мощности.

Доклад A2 308 (Франция) «Определение воздействий при включении трансформатора: моделирование электрической сети и трансформатора/Determination of the stresses when energizing transformers: modelling of the electrical network and the transformer». Представлена методика моделирования трансформатора и связанной с ним сети для оценки токовых воздействий на трансформатор при его включении и, в частности, моделирования магнитной цепи трансформатора. Приведены результаты расчета и измерений токов включения на трансформаторе 250 МВА, 400 кВ. Обсуждаются меры по ограничению токов включения (последовательные резисторы, синхронное включение, включение полюса выключателя на фазу с наибольшей остаточной индукцией).

Доклад A2 309 (Индия) «Расчет воздействий в обмотках трансформатора при воздействии грозового импульса/An insight into transformer winding response under the application of lightning impulse voltage». Приведены результаты расчета распределения напряжения в обмотках трансформаторов при воздействии грозового импульса (полного и срезанного) при различных параметрах импульса (фронт, время среза и т.д.) для обмоток различного типа исполнения.

Доклад A2 310 (Корея) «Расчетный анализ и экспериментальные исследования охлаждающего канала в форме зигзага в обмотке силового трансформатора/CFD analyses and experiments of a winding with zig-zag cooling duct for power transformer». Приведены результаты расчета теплового потока в охлаждающем канале в форме зигзага при направленной и естественной циркуляции масла с помощью программы «Computational Fluid Dynamic». Результаты расчета сопоставлены с результатами эксперимента на модели. Согласование расчета и измерений находится в пределах 10%.

Дискуссия. При обсуждении отмечалось, что для моделирования процессов при высокочастотных воздействиях требуется модель, воспроизводящая достаточно широкий диапазон частот. При этом модели должны включать параметры всех подсоединенных к трансформатору элементов (линия, шина, коммутационный аппарат и т.д.). Сообщалось о повреждении трех трансформаторов 150 МВА, 500 кВ в Бразилии (SEPEL) из-за воздействия высокочастотных перенапряжений (длительности фронта

оценивались десятками наносекунд, а максимальные значения до $2,5 U_{\phi}$). В связи с этим компания ввела испытания крутым импульсом 10—50 нс с максимальным значением $2,0 U_{\phi}$.

Указывалось на необходимость дальнейшего изучения вопроса о перенапряжениях в системе трансформатор – сеть. Компания EDF сообщила о развитии работ по изучению токов включения и мерах их ограничений.

В части термических процессов отмечалось успешное широкое применение расчетных моделей. Основным фактором здесь является скорость теплового потока. Предлагалось, в частности, устанавливать измеритель скорости в нижней части обмотки (диапазон измерений — от нескольких до 100 см/с).

Стратегический план работ ИК А2. Согласно стратегическому плану выделяется два стратегических направления, базирующихся на удовлетворении потребностей и требований потребителей: «Обслуживание покупателей» (Service to Customers) и «Вопросы технологии» (Technology Issues).

В рамках первого стратегического направления намечена работа по следующим вопросам.

Информация по надежности и наличию трансформаторов и реакторов в эксплуатации по результатам рассмотрения характеристик оборудования на международном уровне с периодическим обновлением.

Влияние вспомогательного оборудования на надежность трансформаторов (вводы, переключающие устройства и системы охлаждения).

Влияние загрязнения масла на надежность трансформаторов.

Управление ресурсом трансформаторов и реакторов.

Теория и практика эксплуатации оборудования. Методы мониторинга и диагностики.

Процедуры установки, обработки масла, сушки и испытания непосредственно на месте установки оборудования.

Оценка остаточного срока службы.

Методология принятия решения о ремонте (на месте или в заводских условиях) или утилизации.

Классификация неисправностей и разработка руководства по расследованию повреждений.

Системы защиты масла.

Доступные типы трансформаторных масел, использование ингибиторов и добавок, восстановление масла.

Утилизация отработанных материалов (например, мер масла).

Вопросы охраны окружающей среды.

Экономические вопросы (например, стоимость приобретения в сравнении с затратами на обслуживание, модели для оценки затрат).

В рамках второго стратегического направления намечена работа по следующим вопросам.

Применение новых материалов, например заменителей трансформаторного масла (с участием ИК D1), аморфных сталей, гибридных систем и пр.

Вопросы безопасности трансформаторов, например разрушение бака, пожароопасность, разрушение вводов.

Электромагнитная совместимость, измерения и нормы.

Новые технологии для проектирования, производства и испытаний.

Вопросы, связанные с применением новых концепций, таких как устройства FACTS и применение силовой электроники, переключающие устройства для фазо-поворотных трансформаторов, трансформаторы и токоограничивающие реакторы на основе сверхпроводимости, сборка трансформаторов на месте установки.

Анализ электрических, магнитных и тепловых полей: моделирование и проверка правильности путем сопоставлений.

Электрическое окружение трансформаторов, например работа при различных климатических условиях, взаимодействие с системой.

Работы, предшествующие стандартизации (по запросу ТК14 МЭК), как например электродинамическая стойкость, применение цифровых методов испытаний и испытательного оборудования.

При этом приоритетными направлениями на предстоящий период являются:

«умный» мониторинг;

жизненный цикл, ремонт, обновление, замена и решение о конце срока службы трансформатора; анализ повреждений.

Очередной коллоквиум ИК-12 СИГРЭ состоится в Киото (Япония) 11–16 сентября 2011 г.

Основные вопросы для дискуссии:

эксплуатация, мониторинг, диагностика;

новые материалы;

переходные процессы.

Автор: Лоханин Андрей Константинович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1958 г. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию «Вопросы конструкции изоляции силовых трансформаторов для передач переменного, постоянного тока сверхвысоких напряжений» в ВЭИ. Начальник отдела ВЭИ.