



Вопросы трансформаторостроения на коллоквиуме комитета А2 СИГРЭ в 2015 г.

ЛАРИН В.С.

В период с 20 по 25 сентября 2015 г. в г. Шанхае (Китай) состоялся очередной коллоквиум¹. Исследовательского комитета (ИК) А2 «Трансформаторы» Международного Совета по Большим Электрическим Системам (СИГРЭ).

Сфера деятельности ИК А2 достаточно широка, в нее входят трансформаторы (силовые, преобразовательные, фазоповоротные и пр.), электрические реакторы (шунтирующие, токоограничивающие, сглаживающие и пр.) и компоненты к ним (вводы, переключающие устройства, вспомогательное оборудование).

Основные направления деятельности ИК А2 «Трансформаторы» затрагивают все стадии жизненного цикла трансформаторного оборудования [1, 2]:

подготовка технических требований и закупка, экономические аспекты;

проектирование, производство и испытания; эксплуатация, надежность, безопасность и экологичность;

обслуживание, диагностика, мониторинг и ремонт.

В работе ИК А2 «Трансформаторы» можно выделить следующие ключевые темы:

мониторинг, диагностика и управление ресурсом;

повышение надежности;

применение новых видов трансформаторного оборудования;

применение новых материалов и технологий.

В настоящее время в рамках ИК А2 «Трансформаторы» действуют следующие рабочие группы (РГ)²:

A2.38 «Тепловое моделирование трансформаторов» (2008);

A2.42 «Транспортирование трансформаторов» (2010);

A2.43 «Надежность трансформаторных вводов» (2010);

A2.45 «Исследование повреждений трансформаторов и послеаварийный анализ» (2011);

A2-D1.46 «Практический опыт применения маркеров старения трансформаторов» (2011);

D1-A2.47 «Новые возможности ХАРГ» (2011);

A2.49 «Оценка состояния» (2012);

A2.50 «Эффект распределенных источников энергии» (2012);

JWG A2-D1.51 «Совершенствование методов измерений частичных разрядов для заводских испытаний и испытаний на месте установки силовых трансформаторов» (2014);

JWG A2-C4.52 «Высокочастотные модели трансформаторов и реакторов» (2014);

A2.53 «Интерпретации результатов измерений частотных характеристик (FRA)» (2015);

A2.54 «Требования к уровню звука силовых трансформаторов» (2015);

A2.55 «Продление срока службы» (2016);

A2.56 «Энергоэффективность трансформаторов» (2016);

A2.57 «Влияние подмагничивания постоянным током» (2016).

За период 2015–2016 гг. по комитету А2 «Трансформаторы» вышло в свет пять новых технических брошюр (ТБ):

ТБ № 625 «Длительное подавление сульфида меди и оценка риска» (РГ А2.40 «Длительное подавление сульфида меди и оценка риска», 2015);

ТБ № 630 «Руководство по системам интеллектуального мониторинга состояния трансформаторов» (РГ А2.44 «Интеллектуальный мониторинг состояния трансформаторов», 2015);

ТБ № 642 «Исследование надежности трансформаторов» (РГ А2.37 «Исследование надежности трансформаторов», 2015);

¹ Коллоквиумы исследовательских комитетов проходят раз в два года (по нечетным годам). Обобщение мировых тенденций развития трансформаторного оборудования по материалам 45-й сессии СИГРЭ, проходившей в 2014 г., см. в [1].

² В скобках указан год начала работы группы.

ТБ № 646 «Изоляция трансформаторов для передач постоянного тока высокого напряжения — проводимость масла» (РГ А2-D1.41 «Изоляция трансформаторов для передач постоянного тока высокого напряжения — проводимость масла», 2016);

ТБ № 655 «Технологии и эксплуатация масляных шунтирующих реакторов» (РГ А2.48 «Шунтирующие реакторы», 2016).

Для коллоквиума ИК А2 СИГРЭ были утверждены следующие предпочтительные темы (ПТ).

ПТ1. Трансформаторное оборудование и его компоненты для сетей сверх- и ультравысокого напряжения переменного и постоянного тока (15 устных докладов, 9 постер-докладов, всего 24 доклада):

технические характеристики, конструирование, изготовление и испытание;

ограничения при транспортировке, особенности установки и ввода в эксплуатацию;

надежность, эксплуатация и обслуживание;

особенности шунтирующих реакторов сверх- и ультравысокого напряжения.

ПТ2. Технологии для оборудования подстанций будущего и активно-адаптивных сетей (12 устных докладов, 6 постер-докладов, всего 18 докладов):

оборудование высокого напряжения с использованием инновационных эффективных и экологически чистых дугогасящих сред и изоляционных материалов;

оптимизация проектов подстанций, практики эксплуатации и обслуживания и оборудования в части эффективности, компактности, уровня шума, стоимости, низких эксплуатационных расходов;

улучшенное управление коммутационными аппаратами и другие меры снижения воздействий в сети и взаимодействия между оборудованием высокого напряжения и электрической сетью;

растущее применение полупроводниковых технологий и сверхпроводимости.

ПТ3. Лучшее использование существующего парка трансформаторов (19 устных докладов, 10 постер-докладов, всего 29 докладов):

техника управления ресурсом, оценка критичности, ранжирование парка трансформаторов;

улучшение методов мониторинга состояния и диагностики и испытаний на месте установки;

влияние более суровых погодных условий и новые экологические требования;

методы снижения повышенных воздействий на трансформаторы с большим сроком эксплуатации.

В рамках коллоквиума состоялись открытая сессия с устными докладами приглашенных докладчиков и участников коллоквиума, постер-сессия,

практические семинары, закрытые заседания комитетов и рабочих групп, а также техническая выставка.

С программой, тематиками заявленных докладов и другой информацией о коллоквиуме можно ознакомиться на официальном сайте коллоквиума: <http://www.csee.org.cn/home.aspx?PageId=edb7bbacfa4e-443b-916a-0473144e6679>.

Далее представлены результаты обобщения материалов коллоквиума ИК А2 СИГРЭ-2015 по инновационным исследованиям и решениям, пилотным проектам и наиболее обсуждаемым вопросам.

1. Трансформаторное оборудование и его компоненты для сетей сверх- и ультравысокого напряжения переменного и постоянного тока

1.1. Исследования и разработка силовых трансформаторов ультравысокого напряжения для линий переменного тока высокого напряжения:

Особенности сушки изоляции трансформаторов ультравысокого напряжения (доклад FP0588, Швейцария);

Особенности расчета изоляции трансформаторов сверх- и ультравысокого напряжения (доклад FP0713, ФГУП ВЭИ и НИУ «МЭИ», Россия);

Разработка генераторного трансформатора ультравысокого напряжения 1000 кВ 400 МВА (доклад SP0728, Китай);

Проектирование и испытания установки ввода ультравысокого напряжения 1000 кВ (доклад SP0659, Китай);

Проектирование и испытания вводов сверх- и ультравысокого напряжения (доклад FP0610, Италия—Франция).

1.2. Исследования и разработка преобразовательных трансформаторов для линий постоянного тока высокого напряжения:

Проблемы создания устройств РПН для преобразовательных трансформаторов для передач постоянного тока высокого напряжения (ППТВН) (доклад FP0623, Германия);

Расчет изоляции трансформатора для ППТВН ±800 кВ (доклад FP0636, Япония);

Распределение объемного заряда при воздействии постоянного напряжения, наложенного на переменное напряжение (доклад FP0657, Великобритания);

Разработка и испытания трансформаторов для ППТВН ±800 кВ (доклад FP0667, Германия);

Разработка и испытания установки ввода ±400 кВ (доклад SP0705, Китай);

Разработка трансформатора для ITER на постоянное напряжение 1 МВ (доклад FP0620, Япония—Швейцария).

1.3. Подтверждение стойкости при коротких замыканиях мощных силовых трансформаторов и реакторов:

Требования и испытания для подтверждения стойкости при коротких замыканиях (КЗ) трансформаторов сверхбольшой мощности (доклад FR0644, Франция);

Опыт испытаний на стойкость при КЗ (доклад FR0671, Нидерланды);

Исследования прочности прессующих колец и ярмовой изоляции на стенде осевых сил (доклад SR0645, Китай).

1.4. Создание трансформаторов сверхбольшой мощности, предназначенных для сборки на месте установки:

Разработка специальных конструкций трансформаторов больших мощностей, обеспечивающих возможность транспортирования в полностью разобранном виде и крупноузловой сборки на месте установки (доклад SR0727, Китай);

Опыт сборки трансформаторов большой мощности на месте установки и меры по повышению их надежности (доклад FR0637, Япония).

2. Технологии для оборудования подстанций будущего и активно-адаптивных сетей

2.1. Применение натуральных эфиров:

Старение и окисление натуральных эфиров (доклад FR0707, Бразилия—США—Индия);

Опыт применения натурального эфира в мощных силовых трансформаторах (доклад FR0674, Германия);

Дегазация и регенерация натуральных эфиров (доклад FR0708, Бразилия—США—Индия).

2.2. Применение газонаполненных трансформаторов (доклад FR0636, Япония).

2.3. Переходные процессы при взаимодействии трансформатора и внешней сети:

Определение переходного восстанавливающего напряжения при КЗ за трансформатором (доклады FR0601, FR0682 и FR0653, Япония);

Опыт применения управляемой коммутации для включения трансформаторов под напряжение (доклад FR0701, Япония).

3. Лучшее использование существующего парка трансформаторов

3.1. Управление трансформаторными активами:

Достижения и направления развития в области управления трансформаторными активами (доклад FR0695, Великобритания);

Управление парком трансформаторов (доклад FR0719, США);

Тенденции в управлении жизненным циклом и трансформаторными активами (доклад FR0735, Германия).

3.2. Повышение надежности трансформаторов:

Повышение достоверности оценки состояния трансформаторов и компонентов (доклады FR0664 (Великобритания), FR0717 (США—Швейцария), FR0648 (Ирландия), SR0729 (Китай), FR0618 (Япония), FR0672 (Германия));

Технологии для ремонта трансформаторов на месте установки (доклад FR0646, Япония).

3.3. Трансформаторы для более суровых условий эксплуатации:

Удельная повреждаемость, %

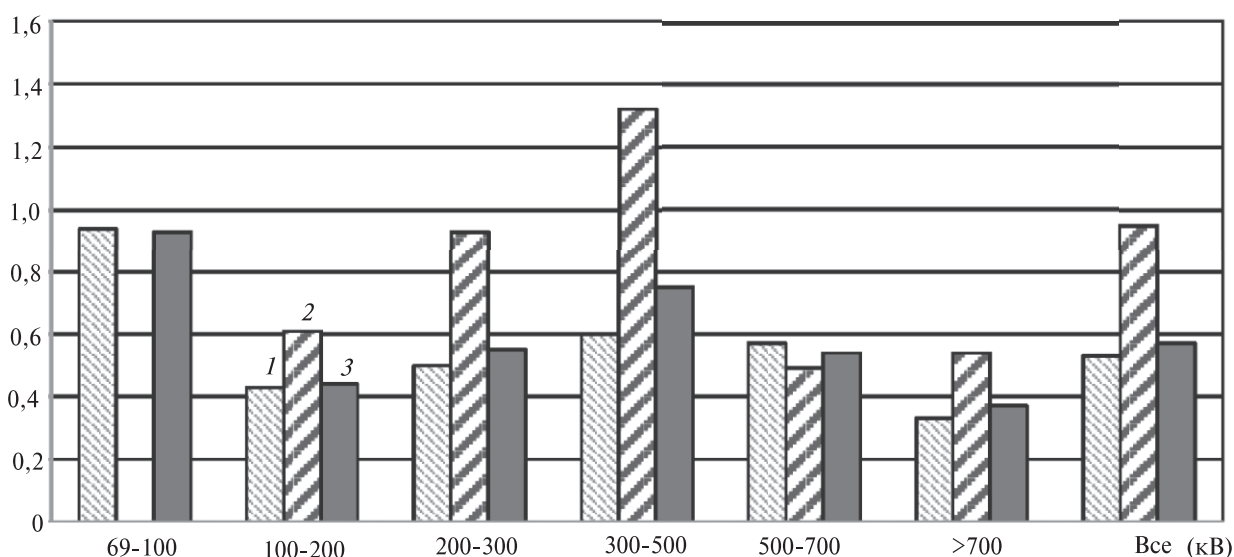


Рис. 1. Данные об удельной повреждаемости трансформаторов [3]: 1 – сетевые трансформаторы; 2 – генераторные трансформаторы; 3 – смешанная группа

Опыт эксплуатации и требования к трансформаторам для работы в суровых условиях (доклад FP0616, Ирландия);

Исследование электрической прочности масла при низкой температуре (доклад SP0681, Китай).

Основные результаты исследований надежности трансформаторов (доклад рабочей группы А2.37).

В рамках коллоквиума от имени рабочей группы А2.37 был сделан доклад (FP0684) [3], в котором были представлены результаты обобщения данных (в частности, рис. 1) о 964 основных отказах, произошедших в период с 1996 по 2010 гг., с общей численностью выборки 167 459 трансформаторолет, включающей данные от 58 эксплуатирующихся организаций из 21 страны; год выпуска трансформаторов 1950—2009 гг.

Таблица 1

Узлы трансформаторной установки, наиболее подверженные повреждениям	Доля в общем числе повреждений для трансформаторов, %	
	сетевых	генераторных
Обмотки высшего напряжения (ВН) низшего напряжения (НН) регулировочная обмотка (РО)	37,69 — —	48,04 28,35 18,90 0,79
Переключающие устройства	31,16	11,81
Вводы: высшего напряжения низшего напряжения	17,16 — —	16,53 14,17 2,36
Установка ввода	5,78	12,60
Изоляция	2,43	2,36
Электростатические экраны	0,56	—
Магнитная система	2,61	6,30
Магнитные шунты	0,37	0,79
Бак	0,75	—
Система охлаждения	1,12	1,57
Трансформаторы тока	0,37	—

Из рис. 1 следует, что удельная повреждаемость силовых трансформаторов, эксплуатируемых в зарубежных сетях и электростанциях, отличается в зависимости от типа и класса напряжения трансформатора. Для сетевых трансформаторов напряжением свыше 100 кВ удельная повреждаемость не превышает 0,8% в год. Для генераторных трансформаторов — в целом не более 1%, за исключением напряжений 300—500 кВ, где повреждаемость

составляет до 1,4%. Среди основных наиболее подверженных повреждениям узлов (табл. 1) в сетевых и генераторных трансформаторах можно отметить обмотки, переключающие устройства и вводы, на долю которых приходится свыше 75% всех случаев повреждений [3].

Новые разработки и пилотные проекты, представленные на коллоквиуме ИК А2 СИГРЭ-2015.

1. Генераторный трансформатор 1000 кВ 400 МВА (доклад SP0728 [4]). Генераторный трансформатор типа DFP-400000/1000 (рис. 2) однофазного исполнения производства компании ТВЕА (Китай) установлен на угольной электростанции Anhui Pingwei.

Трансформатор предназначен для работы в блоке с генератором мощностью 1000 МВт и имеет основные параметры:

Параметр	Значение
Номинальная мощность	400000 кВА
Номинальное напряжение обмотки высшего напряжения (ВН)	$1100/\sqrt{3}$ кВ
низшего напряжения (НН)	27 кВ
Напряжение короткого замыкания	18%
Схема и группа соединения обмоток	1/1-0 (трехфазная группа — Ун/Д-11)
Способ регулирования напряжения	Вольтодобавочный трансформатор с ПБВ в нейтрали обмотки ВН
Диапазон регулирования	$-4 \times 1,25 \pm 0, \%$
Вид системы охлаждения	НДЦ (ODAF)

Испытательные напряжения обмоток ВН и НН [4] приведены в табл. 2.

Таблица 2

Выводы обмоток	Испытательные напряжения, кВ			
	грозового импульса		комму-тационного им-пульса	кратковре-менное (одноминут-ное) переменное напряжение
	пол-ного	срезан-ного		
Линейный вывод обмотки ВН	2250	2400	1800	1100
Вывод нейтрали обмотки ВН	325	—	—	170
Линейные выводы обмотки НН	200	220	—	85

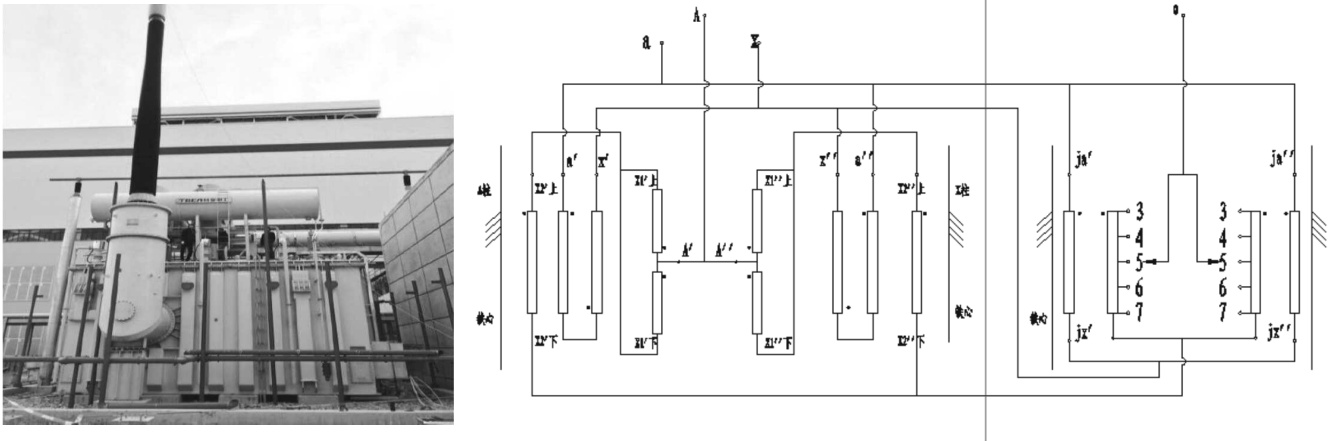


Рис. 2. Трансформатор типа DFP-400000/1000: а — внешний вид; б — схема соединения обмоток [4]

Трансформатор имеет бронестержневой магнитопровод с двумя стержнями, обмотки которых соединены параллельно. Обмотка ВН — двойная концентрическая (с последовательным включением внутреннего ВН1 и наружного ВН2 концентров); наружный концентр ВН2 имеет ввод в середину высоты; обмотка НН — двухслойная. Расположение обмоток на стержне: ВН1 — НН — ВН2. Для регулирования напряжения применен вольтодобавочный трансформатор, размещенный в том же баке и подключаемый к нейтрали обмотки ВН.

2. Преобразовательные трансформаторы ±800 кВ (доклад FR0667 [5]). В докладе представлена информация о преобразовательных трансформаторах двух поколений для ППТВН ±800 кВ, изготовленных компанией Siemens (Германия).

Трансформаторы первого поколения — однофазного исполнения, мощностью 321 МВА, предназначены для комплектации ППТВН мощностью 6,4 ГВт. Трансформаторы изготовлены в 2009 г. и введены в эксплуатацию в 2010 г.

Трансформаторы второго поколения также однофазного исполнения, мощностью 377 МВА (рис. 3), предназначены для комплектации ППТВН 8 ГВт, изготовлены в 2013 г. и введены в эксплуатацию в 2014 г. Их основные параметры:

Параметр	Значение
Номинальная мощность	377000 кВА
Номинальное напряжение обмотки сетевой обмотки (СО) вентильной обмотки (ВО)	525/√3 кВ 159,8/√3 кВ
Напряжение короткого замыкания	19%
Схема и группа соединения обмоток	1/1-0 (трехфазная группа — У _Н /У-0)
Способ регулирования напряжения	РПН в нейтрали СО
Диапазон регулирования	-5/+25 (с шагом 1,25%)
Транспортные размеры	13 м×3,5 м×4,85 м

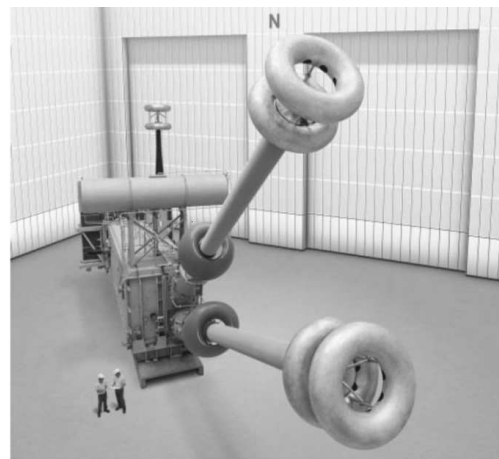
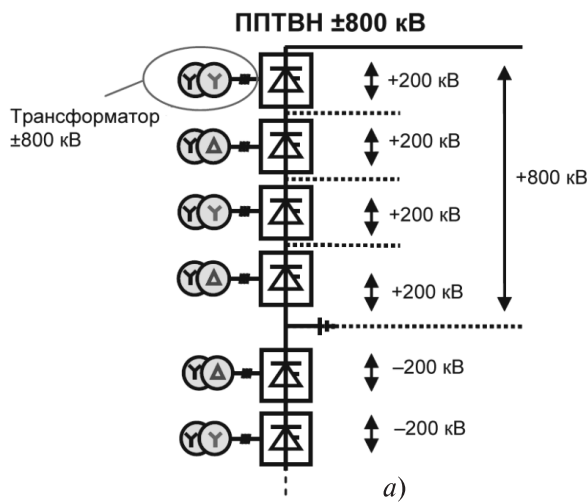


Рис. 3. Трансформатор второго поколения мощностью 377 МВА для ППТВН ±800 кВ 8 ГВт [5]: а — схема включения; б — внешний вид

Транспортная масса (ориентировочно)	Не более 350 т
Испытательные напряжения обмотки ВО	
полного грозового импульса	1800 кВ
коммутационного импульса	1600 кВ
длительное переменное напряжение	909 кВ
постоянное напряжение (двухчасовое)	+1254 кВ
при реверсе полярности	±969 кВ

В докладе также отмечалась разработка трансформатора для ППТВН ± 800 кВ с передаваемой мощностью 8 ГВт, имеющего номинальную мощность 412 МВА и напряжения обмоток СО и ВО, равные $765/\sqrt{3}$ и $174,9/\sqrt{3}$ кВ соответственно.

Кроме того, сообщалось о проработке двух новых проектов ультравысокого напряжения:

ППТВН ± 800 кВ с передаваемой мощностью 10 ГВт, в которой на принимающей инверторной подстанции планируется установка преобразовательных трансформаторов номинальной мощностью 506 МВА для связи с сетями переменного тока двух уровней напряжения – трансформаторы ступеней ± 600 кВ и ± 800 кВ будут связаны с сетью 500 кВ, а трансформаторы ± 200 кВ и ± 400 кВ – с сетью 1000 кВ;

ППТВН ± 1100 кВ с передаваемой мощностью 12 ГВт, в которой планируется установка преобразовательных трансформаторов номинальной мощностью 612 МВА и напряжением СО, равным $750/\sqrt{3}$ кВ; изготовлен и успешно испытан макет, содержащий высоковольтный ввод и изоляцию установки ввода постоянного напряжения ± 1100 кВ.

Практические семинары. В рамках коллоквиума ИК А2 СИГРЭ-2015 состоялись практические семинары по следующим темам.

Получение преимуществ от использования систем мониторинга (докладчик *Terry Krieg*, WG V3.12);

Интеллектуальные системы мониторинга состояния трансформаторов (докладчик *Carlos Dupont*, РГ А2.44);

Практический семинар по системам мониторинга трансформаторов (докладчик *Nick Fantana*);

Исследование надежности трансформаторов (докладчик *Stefan Tenbohlen*, РГ А2.37);

Исследование надежности электрооборудования (докладчик *Kyongyop Park*, РГ А3.06);

Коммутации шунтирующих реакторов и трансформаторов (докладчик *David Peelo*);

Тепловое моделирование трансформаторов (докладчик *Patric Picher*, РГ А2.38).

Очередные мероприятия с участием комитета А2 «Трансформаторы» СИГРЭ. В период с 21 по 26 августа 2016 г. в Париже (Франция) запланировано проведение 46-й сессии СИГРЭ, в рамках которой по комитету А2 «Трансформаторы» утверждены следующие предпочтительные темы.

ПТ1. Достижения в диагностике и мониторинге трансформаторов:

инновационная практика интерпретации данных и оценки состояния: прогнозы, практические примеры и истории успешной оценки состояния;

использование информации из диагностики, мониторинга, обслуживания и эксплуатации для стратегического управления парком трансформаторов;

технические характеристики, интеграция и управление системами мониторинга для обеспечения эффективного использования данных.

ПТ2. Трансформаторное оборудование и его компоненты для сетей сверх- и ультравысокого напряжения переменного и постоянного тока:

технические характеристики, конструкция, материалы, требования и средства для производства и испытаний;

ограничения при транспортировке, установка, ввод в эксплуатацию, надежность, эксплуатация и обслуживание;

шунтирующие реакторы.

ПТ3. Обмотки трансформаторов:

конструкция, производственные процессы, применение и характеристики различных типов обмоток и материалов, опыт с новыми изоляционными материалами;

опыт и оценка механических (силы при КЗ и вибрации при нагрузке), тепловых и изоляционных характеристик и эффективности обмоток;

влияние старения и практики обслуживания на характеристики обмоток.

Выводы. По итогам коллоквиума ИК А2 СИГРЭ-2015 можно отметить следующие ключевые направления развития и наиболее обсуждаемые вопросы в области трансформаторного оборудования:

исследования и разработка силовых трансформаторов для линий переменного тока и преобразовательных трансформаторов для линий постоянного тока ультравысокого напряжения;

подтверждение стойкости при коротких замыканиях мощных силовых трансформаторов и реакторов;

создание трансформаторов сверхбольшой мощности, предназначенных для транспортировки в разобранном виде и крупноузловой сборки на месте установки;

применение изоляционных материалов, альтернативных трансформаторному маслу (натуральные эфиры, элегаз и др.);

переходные процессы при взаимодействии трансформатора и внешней сети;

передовая практика управления трансформаторными активами;

применение систем мониторинга для повышения надежности трансформаторов;

трансформаторы для более суровых условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларин В.С. Мировые тенденции развития трансформаторного оборудования (по итогам 45-й сессии СИГРЭ). — Электричество, 2015, № 8, с. 20—26.

2. Rajotte C. Presentation of CIGRE activities on Power Transformers: <http://a2.cigre.org/what-is-SC-A2>

3. Tenbohlen. S., Jagers J., Bastos G., Desai B., Diggin B., Fuhr J., Gebauer J., Krüger M., Lapworth J., Manski P., Mikulecky A.,

Müller P., Rajotte C., Sakai T., Shirasaka Y., Vahidi F. Development and results of a worldwide transformer reliability survey. — CIGRE SC A2 COLLOQUIUM 2015, Sept. 20—25, 2015, Shanghai (China), report FP0684.

4. Wang Ning-hua, Chen Jiang-bo, Guo Hui-hao, Wang Xiao-ning. Development of the UHV Step-up Transformer Used in Power Plant. — CIGRE SC A2 COLLOQUIUM 2015. Sept. 20—25, 2015, Shanghai (China), report CP0728.

5. René Wimmer, Karsten Loppach, Jens Hoppe, Thomas Wende. Developments at HVDC Transformers. — CIGRE SC A2 COLLOQUIUM 2015, Sept. 20—25, 2015, Shanghai (China), report FP0667.

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. Регулярный член Исследовательского комитета А2 «Трансформаторы» СИГРЭ и представитель Российского национального комитета СИГРЭ в комитете А2 СИГРЭ.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 10, pp. 58—64.

Transformers Issues at CIGRE SC A2 Colloquium in 2015

LARIN Vasily Serafimovich (*All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia*) — Head of Department, Regular Member of CIGRE SC A2, Cand. Sci. (Eng.)

REFERENCES

1. Larin V.S. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 8, pp. 20—26.

2. Rajotte C. Presentation of CIGRE activities on Power Transformers: <http://a2.cigre.org/what-is-SC-A2>

3. Tenbohlen. S., Jagers J., Bastos G., Desai B., Diggin B., Fuhr J., Gebauer J., Krüger M., Lapworth J., Manski P., Mikulecky A., Müller P., Rajotte C., Sakai T., Shirasaka Y., Vahidi F. Development and results of a worldwide transformer reliability

survey. — CIGRE SC A2 COLLOQUIUM 2015, Sept. 20—25, 2015, Shanghai (China), report FP0684.

4. Wang Ning-hua, Chen Jiang-bo, Guo Hui-hao, Wang Xiao-ning. Development of the UHV Step-up Transformer Used in Power Plant. — CIGRE SC A2 COLLOQUIUM 2015. Sept. 20—25, 2015, Shanghai (China), report CP0728.

5. René Wimmer, Karsten Loppach, Jens Hoppe, Thomas Wende. Developments at HVDC Transformers. — CIGRE SC A2 COLLOQUIUM 2015, Sept. 20—25, 2015, Shanghai (China), report FP0667.