



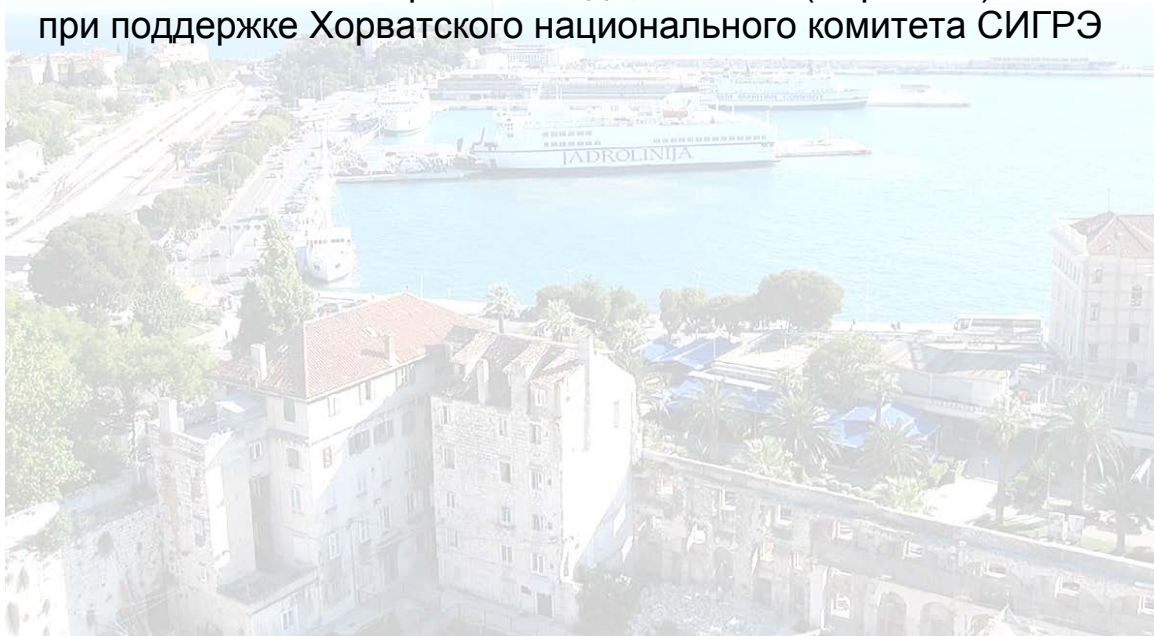
Некоммерческое партнерство  
«Российский национальный комитет  
Международного Совета по большим электрическим  
системам высокого напряжения» (РНК СИГРЭ)



Закрытое акционерное общество  
«Инспекция по контролю технического состояния  
объектов электроэнергетики»  
(ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС»)

## ОТЧЕТ

об участии в 3-ем Международном коллоквиуме  
«Исследования трансформаторов и управление активами 2014»,  
с 14 по 17 октября 2014 года, г. Сплит (Хорватия),  
при поддержке Хорватского национального комитета СИГРЭ



Отчет подготовил:

**Дарьян Леонид Альбертович,**

д.т.н., проф. НИУ МЭИ, заместитель Директора по аналитической и методологической работе ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС». Активно участвует в работе CIGRE с 2000 года, представитель России в SC CIGRE A2 «Трансформаторы» (2002 - 2005 гг.) и В3 «Подстанции» (с 2008 г. – н.в.); член Технического комитета РНК СИГРЭ.

В 2011 году избран в Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике. С 2014 года – член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ



Контактные данные:

Е-mail: [Daryan-LA@ti-ees.ru](mailto:Daryan-LA@ti-ees.ru)

Тел. +7 (495) 220-07-41

Москва, ноябрь 2014 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1.	Введение.....	2
2.	Программа коллоквиума.....	3
3.	Обзор докладов, представленных на коллоквиуме.....	4
3.1.	Тема 1. «Численное моделирование».....	4
3.2.	Тема 2 «Материалы и оборудование».....	13
3.3.	Тема 3 «Управление сроком службы трансформаторов».....	21
4.	Выводы.....	27

### 1. Введение

В настоящее время электроэнергетические компании во всем мире все больше сталкиваются с вопросами, связанными с управлением активами, в частности, силовых трансформаторов. Эти перемены происходят в период повышения общественного интереса к стоимости электроэнергии, а также ее воздействию на окружающую среду. Лучшим решением данных проблем является привлечение передового мирового опыта в части применения новых технологий, конструкций, методов диагностики и технического обслуживания трансформаторов.

Тема Коллоквиума «Исследование трансформаторов и управление активами» Исследовательского комитета СИГРЭ А2 «Трансформаторы», проведенного в период с 14 по 17 октября 2014 года в г. Сплит (Хорватия) отражает актуальные направления развития электроэнергетических систем.

Предпочтительными темами (далее – ПТ) коллоквиума были выбраны:

ПТ 1 «Численное моделирование»	– Электромагнитное поле; – Переходные процессы; – Численное моделирование в проектировании и т.д.
ПТ 2 «Материалы и оборудование»	– Изоляционные материалы; – Магнитные материалы; – Компоненты трансформатора; – Новые технологии
ПТ 3 «Управление сроком службы трансформаторов»	– Мониторинг; – Диагностика; – Отказы; – Управление активами

В рамках данной проблематики было отобрано 50 докладов специалистов со всего мира.

## 2. Программа коллоквиума

Время и место проведения Коллоквиума: с 15 по 17 октября 2014 г., г. Сплит, Хорватия, отель «Le Meridien Lav».

Представитель РНК СИГРЭ Л.А. Дарьян принял участие в Коллоквиуме в качестве члена Технического совета, а также в качестве докладчика.

Мероприятие проходило по следующему расписанию:

Среда, 15 октября

14.00 – 20.00 – Прибытие и регистрация

15.00 – 16.15 – Семинар СИГРЭ – ZiaEmin: Резонанс и феррорезонанс в электроэнергетической сети

16.45 – 18.00 – Семинар СИГРЭ – Tom Breckenridge: Процедура закупки трансформаторов

20.00 – ужин

Четверг, 16 октября

8.30 – 8.45 – Открытие

9.00 – 10.45 – доклады по ПТ 1 «Численное моделирование»

10.45 – 11.00 – перерыв

11.00 – 11.30 – презентация Серебряного спонсора

11.30 – 12.30 – доклады по ПТ 1 «Численное моделирование»

12.30 – 13.30 – обед

14.00 – 15.30 – доклады по ПТ 1 «Численное моделирование»

15.30 – 16.30 – доклады по ПТ 3 «Управление сроком службы трансформаторов»

16.30 – 16.45 – перерыв

16.45 – 19.00 – доклады по ПТ 3 «Управление сроком службы трансформаторов»

19.00 – 19.45 – презентация Золотого спонсора

Пятница, 17 октября

8.30 – 10.30 – доклады по ПТ 2 «Материалы и оборудование»

10.30 – 10.45 – перерыв

10.45 – 11.15 – презентация Бронзового спонсора

11.15 – 13.00 – доклады по ПТ 2 «Материалы и оборудование»

15.00 – 18.00 – обзорная поездка в г. Сплит

### 3. Обзор докладов, представленных на коллоквиуме

На коллоквиуме были представлены доклады членов ИК по 3-м преференциальным темам.

#### 3.1. Тема 1. «Численное моделирование»

1) Моделирование магнитных характеристик трансформаторов, включая явление гистерезиса

(A. P. S. Baghel, S. V. Kulkarni, Indian Institute of Technology Bombay)

В работе описано моделирование гистерезиса для сердечника трансформатора. Текстурованные материалы, в связи с их превосходными кристаллографическими свойствами, широко используются в сердечниках трансформаторов. В работе для моделирования материалов сердечника было использовано описание Jiles-Atherton (JA). Обсуждены методы, основанные на модели JA для точного представления анизотропных и динамичных петель гистерезиса. На основе стандартного нелинейного итерационного метода продемонстрирована численная реализация модели с помощью метода конечных элементов в 2D. Также была представлена разработка другой техники моделирования гистерезиса, основанная на представлении комплексной проницаемости. Указанный подход может быть полезен для целей диагностики при оценке характеристик трансформатора в широком диапазоне частот.

2) Потери магнитного потока рассеяния в силовых трансформаторах в условиях постоянной намагниченности

(Seyed Ali Mousavi, Göran Endgahl - Royal Institute of Technology (KTH), Dietrich Bonmann - ABB AG)

В статье представлены результаты исследования воздействия постоянной намагниченности на индуктированные геомагнитные токи (ИГТ) и на потери рассеяния вихревых токов в элементах конструкции силовых трансформаторов. В данной работе были использованы модели 2D и 3D на основе метода конечных элементов (МКЭ). Целью исследования являлось понимание того, как ИГТ могут привести к увеличению потерь в баке и других металлических частях трансформатора.

Полученные результаты показывают, что форма волны тока намагничивания оказывает сильное влияние на потери рассеяния при возникновении ИГТ. Это исследование помогает найти способ учета влияния ИГТ на поток рассеяния с помощью обычных инструментов проектирования.

Исследование показывает, что уязвимость трансформаторов относительно наиболее нагретых точек в элементах конструкции снижается с увеличением мощности трансформатора. К сожалению, в настоящее время доступно лишь небольшое количество данных по результатам испытаний для проверки результатов моделирования. Этот «разрыв» следует учитывать в будущих работах по данной теме.

3) Расчет полного сопротивления нулевой последовательности в силовых трансформаторах на основе 2D и 3D моделей

(Dario Šegović, Franjo Kelemen - Končar Power Transformers Ltd.)

Эта статья описывает расчет сопротивления нулевой последовательности для 3-хфазных силовых трансформаторов с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в 2D и 3D на примере трансформатора мощностью 100 МВА. В работе также описано влияние соединения обмоток и их расположения на расчет и величину сопротивления нулевой последовательности.

4) Метод конечных элементов при конструировании силовых трансформаторов

(Oszkár Bíró, Kurt Preis - Graz University of Technology, Zarko Janic - Koncar Power Transformers Ltd., Gerald Leber, Bernhard Wagner - Siemens Transformers Weiz)

В работе представлены различные виды метода конечных элементов, применяемые для анализа крупных силовых трансформаторов. Описана разработка двух- и трехмерных нелинейных моделей статических и вихревых токов для прогнозирования потерь в обмотках, ламинированных железных частях, а также других элементах конструкции. Также рассмотрены вопросы вычисления воздействующих на обмотку сил.

Можно отметить, что к выбору моделей трансформаторов для проектирования в 2D необходимо подходить очень тщательно. Частотная аппроксимация приемлема при несильном насыщении, но с учетом высших гармоник она существенно улучшает точность в элементах конструкции с сильным насыщением. Метод был представлен с учетом изменения поля рассеяния в 3D-моделях при расчете дополнительных потерь переменного тока в обмотках. Наконец, было показано, что воздействующие силы могут быть получены из комплексного представления полей.

5) Исследование влияния параметров магнитного шунта на распределение температуры в баке трансформатора

(Saravanan Selvaraj, Geert Caluwaerts, Mahesh B. Varrier, Rafiq Mathersa - Crompton Greaves Ltd. India, Dr. Ronny Mertens, Geert Caluwaerts - CG Power Systems. Belgium NV)

Множество приведенных моделей на основе расчета с использованием конечных элементов разработаны для проверки распределения температуры в магнитных системах трансформаторов. В работе детально разобрана модель, а также измерены и рассчитаны потери и температура модели. Проанализировано влияние магнитного шунта на распределение температуры в модели.

Методология анализа, которая применялась для оценки распределения температуры в нескольких универсальных трансформаторах, показала более высокую температуру, чем ожидалось. Для снижения температуры в работе рассмотрены различные варианты конструкций баков трансформаторов.

6) Контроль за наиболее нагретыми точками в элементах конструкции силовых трансформаторов с помощью МКЭ в 3D

(Andre de Souza Melo, Wilerson Venceslau Calil - ABB Ltda)

Силовые трансформаторы являются одним из самых дорогостоящих видов оборудования на подстанции. По этой причине, большие усилия уделяются улучшению их конструкции.

Целью данной статьи является доказательство эффективности метода конечных элементов (МКЭ) при расчете и контроле наиболее нагретых точек, которые образуются под воздействием потоков рассеяния. В качестве примера показан реальный случай, произошедший в силовом трансформаторе, в котором начали образовываться газы в результате перегрева во время работы при номинальной нагрузке.

Помимо цели, указанной выше, в работе представлено аналитическое исследование, проведенное на основе уравнений для магнитных полей. Целью данного исследования является проверка и анализ влияния материалов и геометрии на магнитные поля и, следовательно, на потери и температуру.

Можно сделать вывод о том, что применение МКЭ в 3D квалифицированными инженерами может иметь большие преимущества как для заказчика, так и для производителя.

7) Пример повышения температуры в металлических частях трансформатора в условиях одновременной нагрузки

(Wilerson Venceslau Calil, Andre de Souza Melo - ABB Ltda)

В работе предложен расчет магнитного экрана бака и температуры на стенке бака для определенных типов нагрузок, указанных заказчиком с учетом технических особенностей.

Срок службы изоляции является основным показателем, влияющим на срок службы трансформатора, и он напрямую зависит от температуры. Очевидно, что в связи с ограничениями вычислений, отсутствует возможность учесть некоторые наиболее нагретые точки. Однако в настоящее время, благодаря достаточной вычислительной мощности и скорости обработки вычислений, такого рода моделирование для заказчика является предметом детального изучения.

Моделирование результатов с помощью программного обеспечения FEM во временном интервале показывает, что повышение температуры может достигнуть значений, которые нельзя не учитывать при проведении специальных операций загрузки трансформатора. Другими словами, это повышение температуры может превысить предельные значения, установленные заказчиками и прописанные в международных стандартах, если во внимание не будет принята одновременная нагрузка.

Измерения, проведенные с помощью тепловизоров, подтвердили дееспособность предлагаемой 3D модели, а это означает, что критерии могут быть экстраполированы к условиям одновременной нагрузки.

- 8) Моделирование с применением методов вычислительной газодинамики (моделирование CFD) или потеря давления в обмотках трансформатора постоянного тока высокого напряжения  
(Ralf Wittmaack - Siemens AG)

В Siemens программа CFD Uniflow используется для анализа потока жидкости и теплообмена в маслонаполненных и сухих трансформаторах, а также таких элементах трансформаторов, как обмотки, сердечник, стенки бака и радиаторы. Она может быть использована как для анализа стационарных, так и для переходных режимов. В статье описаны физические модели и численные методы решения.

Исследование включает изотермические течения с различными входными скоростями.

Представленные результаты показывают, что CFD Uniflow является полезным инструментом для анализа теплового расчета трансформаторов. Она может быть использована для исследования преимуществ и недостатков конструктивных особенностей, а также для выполнения оптимизации конструкции.

- 9) Моделирование CFD охлаждающих каналов в силовых трансформаторах оболочечного типа  
(Hugo M. R. Campelo- EFACEC Energia, S.A., Rómulo T. Oliveira, Madalena M. Dias, Carlos M. Fonte, José Carlos B. Lopes - FEUP University of Porto)

В этой работе проанализирована структура потоков трансформаторного масла двух видов плотности с различными скоростями в каналах охлаждения с помощью 3Dмоделирования CFD в ANSYS Fluent. Различные соотношения были смоделированы с помощью трех видов геометрии в связи с различной высотой канала.

По результатам CFD можно наблюдать ускорение движения масла внутри охлаждающих каналов.

Результаты показывают, что относительная масса масла распределяется между каналами и практически не зависит от скорости потока, что является принципиальным отличием от типовых конструкций стержневых трансформаторов. Вместо этого распределение скоростей масла внутри каждого канала зависит от увеличения скорости потока масла, в котором наблюдаются сдвиги от типичных параболических контурных диаграмм.

Повышенный расход масла способствует появлению рециркуляции и соответствует областям с низкой скоростью, в которых может возникнуть локальное повышение температуры масла. В итоге сравнение температуры поверхности катушки предполагает, что для каждого типа конструкции может существовать оптимальный расход масла.

Работа в целом свидетельствует о важности таких вычислительных методов, как CFD, с целью получения детальной информации о конкретной конструкции и технологии силового трансформатора.

10) Анализ влияния изменений высоты радиального охлаждающего канала на сбалансированный естественный или форсированный поток масла в радиальном охлаждающем канале обмоток

(Nebojša Gavrilov, Ivica Roketinec- Končar Power Transformers Ltd.)

В докладе рассмотрены методы балансировки распределения потока масла в сегменте обмотки при естественной и форсированной циркуляции масла. Метод постепенного сокращения высоты радиальных каналов снизу вверх, продемонстрированный на представленной модели обмотки, показал хорошую способность балансировки для форсированного потока на входной скорости. Современные исследования показывают, что для форсированного потока, большая часть масла проходит через несколько последних каналов, и, наоборот, в случае естественного потока. В этом исследовании показано как постепенное изменение высоты радиального охлаждающего канала влияет на распределение потока масла в радиальных каналах. Анализ проведен в диапазоне входных скоростей, которые соответствуют как естественному, так и форсированному потокам масла.

Необходимо отметить, что для анализа влияния описанных выше методов на максимальные температуры в твердых частях модели, необходимо провести дополнительное исследование. Исследование должно быть проведено на двух разных моделях, принятых для форсированного и естественного потока масла. Кроме того, необходимо исследовать является ли этот метод технологически выполнимым.

11) Анализ связанных магнитомеханических конечных элементов в силовых трансформаторах в условиях короткого замыкания

(Bruno Vošnjak-Siemens AG Power Transformers Nürnberg, Andreas Hauck, Hermann Landes- SIMetris GmbH)

Внешнее короткое замыкание (КЗ) является одним из самых сложных условий нагрузки, которым могут быть подвергнуты трансформаторы. Поэтому способность выдерживать КЗ является одним из важнейших свойств трансформатора для обеспечения его надлежащего функционирования в течение срока службы. Точный расчет сил и напряжений, которым трансформатор подвергается во время короткого замыкания, является необходимым условием для улучшения и оптимизации конструкции активной части. Основное внимание в данной работе уделено исследованию динамического электромагнитного и механического поведения обмотки трансформатора во время внешнего КЗ. Для проведения исследования активная часть однофазного автотрансформатора мощностью 100 МВА была смоделирована с помощью программного обеспечения (ПО) ANSYS и HSS. Конкретные области обмотки были смоделированы с большей степенью детализации для того, чтобы наблюдать воздействие сил Лоренца при коротком замыкании на отдельных проводниках. Механические перемещения, вызванные силами Лоренца, действующими на обмотках трансформатора, приводят к изменениям в основной геометрии моделирования, которая имеет ряд последствий для расчета напряжений. Моделирование, проведенное в данной работе, указывает



ет на то, что механические перемещения, а также неравномерное распределение магнитного потока вдоль поверхности обмотки может привести к увеличению локальных и общих нагрузок в обмотках, а также изменить момент времени при КЗ, в течение которого возникают максимальные напряжения. Кроме того, возможны резонансные явления в обмотках в зависимости от собственной частоты. Все выводы требуют дальнейшего исследования с помощью более детализированного моделирования.

12) Общий подход к вычислению токов КЗ в силовых трансформаторах  
(Kosjenka Capuder, Goran Plišić - Končar Power Transformers Ltd, Željko Štih - University of Zagreb)

Требования к расчетам токов короткого замыкания для трансформаторов являются неотъемлемой частью процесса проектирования. Токи короткого замыкания вводятся для расчета механических усилий и напряжений, а также являются важной частью документации трансформатора.

Виды короткого замыкания меняются в зависимости от различных условий воздействия на обмотки. В данной работе, представлены результаты сравнения наиболее часто используемых для определения величины токов короткого замыкания методов на примере реального трансформатора. Кроме того, описано создание обобщенной схемы, предназначенной для унификации расчета токов короткого замыкания для всех типов силовых трансформаторов, а также сокращения времени получения результатов.

13) Сейсмический анализ силовых трансформаторов  
(Robert Platek, Grzegorz Juszkiewicz - ABB Sp. z o.o. Corporate Research, Poland)

Опыт прошедших землетрясений показывает, что сейсмические характеристики ключевых элементов подстанций - трансформаторов и высоковольтных вводов не являются удовлетворительными. Понимание сейсмического взаимодействия между такими элементами оборудования подстанций, как «трансформатор-ввод-фундамент» и жидкостями очень важно для надлежащей оценки характеристик сейсмоустойчивости оборудования подстанций.

В работе представлены первые результаты исследования, проведенного компанией АВВ, связанного с воздействием жидкости на динамическое поведение системы «трансформатор-ввод». Для того чтобы моделировать эти сложные явления с целью сейсмического анализа было использовано три различных подхода. Один из них построен на базе FSI и комбинации различного программного обеспечения. Другой - основан на акустическом моделировании жидкости. Последний подход основан на формулах Эйлера-Лагранжа.

Представленные методы имеют как преимущества, так и недостатки. При первом подходе, в котором соединены CFD и метод конечных элементов, можно детально оценить поведение жидкости и ее влияние на динамические характеристики конструкции. При сложной геометрии возникают труд-

ности в формировании расчетной сетки. В этом методе для стабильности результатов итерации необходимо значительно увеличивать время расчета. Акустико-структурный подход является удобным и относительно быстрым. С помощью акустических элементов пользователь может оценить максимальное давление, которое создается с помощью жидкости при возбуждении колебаний. Необходимо отметить, что этот метод дает неплохие результаты, когда ожидаемый структурный отклик имеет относительно низкую амплитуду. В случае значительного структурного усиления возможный «эффект плескания» не зафиксирован. Акустико-структурный подход часто ограничивается временем вычислений динамики изменений, следовательно, он не может быть использован, например, в методе спектра реакции. Последний метод (CEL) вводит связь, описанную с помощью уравнений Лагранжа и Эйлера. Таким образом, можно моделировать значительную деформацию и выплескивание жидкости.

Учитывая вышесказанное, все эти подходы могут быть полезными для определения динамической характеристики трансформаторов и трансформаторного оборудования и могут сократить время проектирования, если они подходят для анализируемых случаев.

14) Статистический и численный анализ пробоя трансформаторного масла в трансформаторах переменного тока

(Mladen Marković, Ivanka Radić, Vlatka Matun - Končar Distribution & Special Transformers)

Исследования пробоя трансформаторного масла являются важной частью проектирования изоляции трансформатора. Исследования, представленные в этой работе, состоят из статистического и численного анализа данных пробоя, измеренных портативным прибором. Статистический анализ проводился на основе моделирования данных измерений, как случайного процесса с функциями вероятности Гаусса и Вейбулла. В численном анализе использовались статистические данные для расчета объема масла под напряжением, площадь электрода под напряжением и коэффициенты надежности по методу «кумулятивного напряжения». Результаты анализа показали, что пробивное напряжение зависит от разных переменных, а также почему их важно учитывать при интерпретации результатов измерений.

15) Оптимизация изоляции высоковольтных отводов силовых трансформаторов

(Mladen Marković - Končar Distribution & Special Transformers)

Надежность силовых трансформаторов, в том числе зависит от надежности его системы изоляции. Например, высоковольтные отводы, как часть системы изоляции, должны быть надежно изолированы. Это достигается установкой изоляционного барьера между отводами и баком на определенном расстоянии. Это расстояние оказывает воздействие на коэффициенты запаса (вероятность пробоя) для такой системы. В докладе также представлены предложения по оптимизации, при которых вероятность пробоя и расстояние

между отводами и баком могут быть сведены к минимуму. Также предложен способ возможного подтверждения процесса оптимизации.

16) Моделирование импульсных перенапряжений в сухих и масляных силовых и распределительных трансформаторах

(Jasmin Smajic, Roman Obrist, Martin Rüegg - University of Applied Sciences of Eastern Switzerland (HSR), Bogdan Cranganu-Cretu, Carlos Roy, Benjamin Weber, Ebrahim Rahimpour - ABB AG)

В работе подробно изложены численные методы и приемы моделирования импульсных перенапряжений в силовых и распределительных трансформаторах, в т. ч. сухих трансформаторах. Методы моделирования основаны на эквивалентных схемах замещения обмотки трансформаторов, полученных в результате дискретизации первоначальной обмотки с требуемой точностью. Параметры эквивалентной схемы, такие как сопротивление, собственная и взаимная емкости, индуктивность рассчитываются на основе физического моделирования. Уравнения эквивалентных схем трансформатора образуют систему дифференциальных уравнений, которая решается во временном интервале с помощью стандартного метода численного интегрирования Рунге-Кутты. Полученное решение представляет собой распределение напряжения на обмотках в каждый момент времени грозового импульса (50 мкс). В докладе также представлена проверка результатов, которая показала, что учитывая сложность структуры обмотки и ее высокочастотное моделирование, предложенные методы продемонстрировали уровень точности, достаточный для промышленного проектирования трансформаторов.

17) Влияние моделирования емкости обмоток на расчет наведенных напряжений в силовых трансформаторах

(Goran Plišić, Kosjenka Capuder - Končar Power Transformers Ltd)

Для расчета переходных процессов внутри трансформатора обычно используются схемы замещения обмоток. Точность результатов расчета главным образом зависит от модели, в которой обмотки представляются сосредоточенными элементами R, L и C. Обмотки обычно представляются катушками или группами катушек с соответствующими сопротивлениями, индуктивностью (собственной и взаимной) и емкостью (продольной и относительно земли). При возникновении импульсного напряжения, крутой фронт волны и, следовательно, высокочастотные колебания являются главным фактором, определяющим модель для расчета распределения напряжения в обмотке и между обмотками.

18) Исследование переходного взаимодействия в системе с трансформатором, питающимся от сети через кабель: оценка частот взаимодействия и развития резонанса

(Vasily Larin, Alexey Volkov - All-Russian Electrotechnical Institute (VEI), Daniil Matveev - Moscow Power Engineering Institute (MPEI))

Трансформатор вместе с обмотками представляет собой сложную колебательную систему. Взаимодействие между трансформатором и электрической сетью во время переходных процессов может привести к развитию явления резонанса в обмотках, ведущему к перенапряжениям и риску повреждения трансформатора.

В докладе представлены результаты исследований резонансных явлений в обмотках трансформатора, вызванных взаимодействием с электрической сетью, содержащей питающий кабель. Рассмотрен подход к простой оценке доминирующей частоты колебаний напряжения в системе «питающий кабель - трансформатор» и оценке резонансных частот в обмотках трансформатора. В докладе также приведена методика измерения резонансных напряжений обмотки. Описано явление резонанса в обмотках трансформатора, и сделана оценка влияния уменьшения колебательного приложенного напряжения на наибольшую кратность резонансных перенапряжений.

19) Примеры моделей трансформаторов для расчета высокочастотных наведенных перенапряжений

(Bruno Jurišić, Alain Xemard, Philippe Guinic - EDF R&D, Ivo Uglešić - University of Zagreb, Françoise Paladian - Université Blaise Pascal)

Такие события, как молния, переключение вакуумного выключателя или операции переключения в КРУЭ являются причиной высокочастотных перенапряжений. Оборудование в системах передачи и распределения электроэнергии должно быть защищено от таких явлений.

На стадии проектирования и координации изоляции, которая, как правило, основана на электромагнитном переходном моделировании, перенапряжения, которые передаются через трансформаторы, должны быть точно рассчитаны с целью разработки подходящей защиты системы. Так как эти перенапряжения включают высокочастотные компоненты, традиционные низкочастотные модели трансформаторов не могут быть использованы для точного расчета передаваемых перенапряжений. Поэтому особенно важно иметь надлежащую модель трансформатора, точно представляющую поведение трансформатора на высоких частотах.

Описана разработка двух разных моделей трансформаторов в программе типа ЕМТР. Первая модель, под названием «черный ящик», построена исключительно по значениям, измеренным на зажимах трансформатора, и не требует каких-либо знаний о внутренней геометрии трансформатора. Вторая модель, под названием «серый ящик», основана на RLC параметрах схемы замещения, значения которых выводятся из простой геометрии трансформатора и по его паспортным данным.

В этой статье приведен анализ возможностей «черного ящика» и «серого ящика» для оценки характеристик трансформатора на высоких частотах. В качестве примера выбран распределительный трансформатор мощностью 64 МВА. Рассчитанные на моделях в программе типа ЕМТР перенапряжения сравниваются с проведенными измерениями.

### 3.2. Тема 2 «Материалы и оборудование»

#### 1) Экодизайн и будущее трансформаторов

(Miljenko Hrkac, Roberto Zanol - ABB SpA, Italy, Angelo Baggini - Università degli Studi di Bergamo, Italy, Flavio Mauri - ENEL Distribuzione SpA)

В этой статье описаны современные программы энергоэффективности, которые применяются в разных странах, с особым упором на европейский рынок.

Примером улучшения производительности, связанной с основной функцией трансформатора, является непрерывная гонка в достижении более высоких уровней напряжения и мощности.

Вспомогательные устройства (от самых простых термометров до наиболее продвинутых волоконно-оптических систем прямого измерения наиболее нагретых точек) можно рассматривать в качестве средств для обеспечения дополнительных функций, полезных для максимизации использования активов. То же самое можно сказать и об РПН: их внедрение было предусмотрено для повышения ценности актива.

В настоящее время существует целый ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, ориентированных либо на снижение затрат, либо на значительные улучшения производительности. В то же время, наблюдается растущий интерес к энергоэффективности, уменьшению воздействия на окружающую среду, безопасности, онлайн мониторингу и «пользовательскому интерфейсу».

Что касается будущих тенденций, как правило, возможны два сценария развития событий:

- устаревший продукт полностью исчезает, так как будет заменен новым, который обеспечит более высокую потребительскую ценность;
- устаревший продукт «выживает» и занимает определенную нишу рынка.

В обоих случаях, очевидно, что при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по поиску новых продуктов или новых способов выполнения основных функций продукта необходимо уделять большое внимание области трансформаторной промышленности.

#### 2) Снижение шумов в трансформаторах за счет электротехнической стали

(Belgrand Thierry, Lahn Ludger, Lemaître Régis - ThyssenKrupp Electrical Steel UGO)

Когда в трансформаторах возникают шумовые проблемы, первой причиной является магнитострикция электротехнической стали. До сих пор не найдено корреляции между шумом и магнитострикцией, поэтому для оценки влияния шумов на электротехническую сталь необходима характеристика базовой модели. С целью удовлетворения растущего экологического спроса на рынке компания ТКЕС предложила собственную разработку. В работе представлены экспериментальные результаты, определяющие связь между пара-

метрами электротехнической стали и измеренным шумом. Оптимизация достигается благодаря следующим факторам:

- высокая проницаемость стали;
- покрытие, имеющие соответствующие характеристики;
- оптимизированная методика лазерного скрайбирования.

Компания TKES постоянно совершенствует как саму электротехническую сталь с высокой проницаемостью, так и процесс снижения потерь и уровня шума при высокой рабочей индукции сердечника трансформатора. В настоящее время выполняются НИОКР с целью более глубокого понимания шумообразования и внедрения новых методов испытаний.

### 3) Инновационные материалы для оптимизации производительности изоляционных систем трансформаторов

(Radosław Szewczyk, Giorgio Vercesi, Serge Rebouillat – DuPont)

В докладе представлены новые разработки в области изоляционной бумаги и изоляционных жидкостей для силовых маслонаполненных трансформаторов. На основании выявленных недостатков в рабочих характеристиках, имеющихся в настоящее время изоляционных материалов, были предложены новые материалы.

Описана новая изоляционная бумага - усиленная арамидом целлюлоза, которая сочетает в себе два известных изоляционных материала: целлюлозу и арамид. Тепловые характеристики новой бумаги лучше, чем у термически модернизированной целлюлозы по меньшей мере на 10°C. Это улучшение может быть использовано для оптимизации конструкции трансформатора в части рабочей температуры или продления срока службы системы изоляции.

Также представлена новая жидкость на основе сложного эфира. Новая жидкость на основе природных и модифицированных сложных эфиров удовлетворяет большинству эксплуатационных требований, типичных для эфирных жидкостей, при этом ее вязкость значительно улучшена (снижена). Это может помочь ускорить внедрение экологически чистых жидкостей в трансформаторах без необходимости существенной доработки.

### 4) Биоразлагаемые изоляционные жидкости на основе растительных масел (Anđela Hadži-Skerlev, Božena Musulin - Končar- Electrical Engineering Institute Inc.)

Обычные эфиры (жидкости, основанные на растительных маслах) в качестве нетоксичного и полностью биоразлагаемого материала являются альтернативой минеральным маслам, которые являются экологически неприемлемыми изоляционными жидкостями.

Обычные эфиры только недавно стали использоваться в качестве диэлектрика в силовых трансформаторах в результате нехватки данных по опыту эксплуатации этой новой изоляционной жидкости.

Лабораторные испытания по стойкости к окислению позволяют оценивать качество изоляции и прогнозировать срок службы. В этой статье исследована устойчивость к окислению различных обычных эфиров.

Отмечено, что газообразование в изоляционных жидкостях является важным свойством, так как ХАРГ является диагностическим инструментом для обнаружения и оценки неисправностей в трансформаторе.

В работе также исследован процесс газообразования обычного эфира и минерального масла при термических воздействиях.

5) Роль диэлектрических жидкостей в силовом оборудовании

(Baburao Keshawatkar, Nalin Nanavati, P.N. Narayanan - Raj Petro Specialities Pvt Ltd Chennai)

В работе представлены выводы по результатам долгосрочного применения современных диэлектрических жидкостей в трансформаторах и реакторах сверхвысокого напряжения, полученных по гидрокрекинговой технологии. Наблюдения авторов доклада показали, что диэлектрические жидкости обладают исключительной чистотой, стабильностью и высоким качеством в течение всего срока эксплуатации трансформаторов и реакторов.

6) Факторы, влияющие на испытания моделей изоляции

(Petar Gabrić, Antun Mikulecky, Vladimir Podobnik - Končar Power Transformers Ltd., Damir Plić- Faculty of Electrical Engineering Končar Power Transformers Ltd., and Computing (FER))

Целью данной работы является изучение различных факторов, влияющих на результаты высоковольтных испытаний моделей изоляции. Эти факторы связаны с геометрией модели и процедурой проведения испытаний. Геометрия модели проверялась визуально. При этом с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и кумулятивного метода для конструкции маслобарьерной изоляции были рассчитаны некоторые параметры. Порядок оценки неопределенности геометрии модели проводился с помощью аппроксимации Тейлора первого порядка. Кроме того, была проведена оценка влияния данных по воздействию напряжения образца, так называемый «эффект памяти», с помощью метода общего времени воздействия.

7) Превышения температуры в силовых трансформаторах: комментарии и предложения к МЭК 60076-2:2011

(Zdenko Godec, Vjenceslav Kuprešanin - Končar - Electrical Engineering Institute Inc.)

Два года назад вышла новая, третья редакция стандарта МЭК 60076-2. В течение двух лет авторы имели возможность оценить эту версию стандарта на практике. В работе показано, что критерий  $1K / H + 3h$  является не совсем подходящим в отличие от критерия  $1K / 3h$  или экстраполяции - как указано во втором издании стандарта. Кроме того не была завершена формула для определения наиболее нагретых точек, и не был предложен способ ее улучшения. В новом стандарте даны три формулы для определения средней температуры обмотки. На основании экспериментов, авторы пришли к выводу, что лучшей формулой является простейшая из трех, а две дополнительные

формулы - лишние. Согласно п.7.11 МЭК 60076-2 расчеты результатов измерений неопределенности должны быть указаны в протоколах испытаний - но только в качестве дополнительной информации. Также не были указаны процедуры оценки измерений неопределенности, и в процессе принятия решений не учитывалась погрешность измерения. Таким образом, третье издание стандарта является незавершенным. В работе предложена процедура оценки измерений неопределенности.

- 8) Применение температурно-временного метода для измерения локальных потерь мощности в металлических частях трансформатора  
(Robert Sitar - Končar – Electrical Engineering Institute Inc., Žarko Janić – Siemens)

В работе представлено применение температурно-временного метода для измерения локальных потерь в магнитной стали. Разработанная система измерения описывается с упором на конструкцию датчиков и выбор инструментов. Выбранное оборудование испытывается в цепи постоянного тока, предназначенной для измерения потерь в алюминиевых и медных проводниках. Та же система измерения используется для измерения локальных потерь на магнитных стальных кольцах. В работе проанализированы ошибки измерения из-за неравномерного распределения потерь внутри магнитной стали и выделения тепла в окружающую среду.

- 9) Исследования измерений давления и интенсивности звука в зависимости от расстояния до силового трансформатора  
(Mario Stuhne - Končar - Power Transformers Ltd.)

При измерениях шума прямо могут быть измерены две физические величины- интенсивность звука и звуковое давление. В работе показана математическая взаимосвязь между этими двумя значениями и различия между ними в зависимости от расстояния объекта до измеряемого источника (в данном случае это силовой трансформатор). Также описано выполнение серии измерений звукового давления и интенсивности звука на разных расстояниях от силового трансформатора, после чего проведена оценка функции, которая описывает изменения в зависимости от расстояния до источника шума.

- 10) Новый метод оптимизации шума на холостом ходу силовых трансформаторов  
(Ahmed Gamil, Franz Schatzl - SGB Regensburg)

В работе представлен новый алгоритм для расчета и оптимизации шума на холостом ходу (звуковое давление) силовых трансформаторов, а также для определения параметров листового металла. Расчет состоит из двух этапов: 1-й этап заключается в вычислении начального уровня звукового давления (А-оценка), которое имеет приблизительно 70%-ю точность в пределах интервала допуска  $\pm 2$  дБ (А). 2-й этап заключается в оценке ожидаемого отклонения от первоначального расчета для получения 90%-й точности в окон-



чательных результатах. Это отклонение может быть связано с хранением материалов, допустимым отклонением в качестве и т.д.

Процесс оптимизации состоит из двух частей: первая часть заключается в выборе определенного листа металла для расчета и определения параметров, необходимых для точности вычислений. Вторая часть состоит в рассмотрении конструкции активной зоны с нежелательным уровнем звукового давления с целью его снижения до приемлемых значений. Эта часть также учитывает дополнительные ограничения, такие как потери холостого хода и размеры трансформатора («оптимизация конструкции»).

Необходимо отметить, что сотрудничество между компанией SGB Regensburg и производителями листовой стали сыграло важную роль для разработки данного алгоритма. Были отдельно проанализированы имеющиеся данные, полученные на рабочей частоте (50, 60 и 16 667 Гц).

11) Исследование различных видов стали под высокой нагрузкой при КЗ  
(Emanuel Almeida, Pedro Pedro - EFACEC Power Transformers, Paulo Martins, Carlos Silva - Instituto Superior Técnico)

Основой данной работы являются данные результатов независимых испытаний, касающиеся свойств стали при высокой нагрузке, аналогичной нагрузке силовых трансформаторов во время коротких замыканий. Испытаниям подверглись распространенная нелегированная конструкционная сталь и высокопрочная конструкционная сталь. Эксперименты показали, что наиболее распространенная конструкционная сталь при высокой нагрузке способна поглощать значительно больше энергии, чем в квазистатических условиях. С другой стороны, высокопрочная конструкционная сталь не показала никаких улучшений в характеристиках поглощения энергии при высоких скоростях деформации. В документе приведены некоторые примеры с целью иллюстрации того, как экспериментальные результаты могут применяться при проектировании стальных компонентов для безопасности во время КЗ. В заключительной части работы описана постоянная деформация стали и проведена оценка ее воздействия на изменение импеданса силового трансформатора, следующего за коротким замыканием.

12) Анализ и экспериментальное доказательство поведения статичного наклона проводников с последовательной транспозицией (ППТ) в обмотках трансформатора

(Bruno Bošnjak - Siemens AG Power Transformers Nürnberg, Mario Stuhne - Končar - Power Transformers Ltd.)

В статье описаны численная модель и экспериментальная проверка расчета силы критического наклона для проводника в обмотке трансформатора под статичным осевым давлением. Для целей данного исследования на основе структурного метода конечных элементов была разработана модель неэпоксидно-связанных ППТ, используемых для производства обмоток трансформатора. Было проведено моделирование механического поведения двух разных проводников обмоток трансформаторов под действием статического

осевого давления. Радиальное положение ППТ варьировалось в зависимости от разрешенных допусков производителя для того, чтобы ближе соответствовать фактическим физическим моделям. Были представлены и проанализированы смещения, напряжения и деформации, полученные в результате моделирования. Было проведено сравнение этого расчета с существующими аналитическими и эмпирическими расчетами по МЭК 60076-5: 2006 и другой доступной литературе. Результаты этих вычислений были экспериментально проверены путем сжатия трех физических моделей обмотки в гидравлическом прессе с силой, соответствующей вычисленной критической силе. Полученные в результате деформации проводников обмотки были сфотографированы, а также было проведено их сравнение с результатами моделирования.

В качестве вывода можно отметить, что по сравнению с аналитическими расчетами, численная модель смогла более точно предсказать деформацию проводника под действием постоянной силы. Хотя численная модель 2D точно предсказала форму деформации, недостаточно точно был предсказан порядок величины смещений, наблюдаемых в эксперименте из-за модельных упрощений. Дальнейшие исследования необходимо выполнять на более детализированных 3D-моделях, содержащих все детали геометрии обмотки, для более точного прогнозирования поведения проводника под действием статических сил.

13) Ток намагничивания в больших силовых трансформаторах и его гармонический состав в нормальных условиях и в условиях индуцированных геомагнитных токов

(Leonardo Štrac, Franjo Kelemen - Končar - Power Transformers Ltd.)

В работе представлены результаты измерений гармонического спектра тока намагничивания. Проанализированы результаты гармонического спектра тока намагничивания во время стандартного испытания без нагрузки при различных значениях индукции. Учитывались намагниченность текущего гармонического спектра во время однофазного испытания без нагрузки и воздействие тока намагничивания при постоянном и переменном токах на поведение сердечника и гармонический спектр. Была введена математическая модель сердечника трансформатора. Представлены результаты расчета.

Результаты, рассчитанные с помощью математической модели, качественно сопоставимы с измеренными значениями. Следует отметить, что точный расчет гармонического распределения по всему спектру индукции затруднительно проводить из-за отсутствия кривой намагничивания сердечника трансформатора. Кроме того, математическая модель рассчитывает только ток намагничивания и общий ток без нагрузки, который состоит из тока намагничивания, потерь тока и емкостного тока обмотки.

14) Компенсация постоянного тока – опыт эксплуатации в рабочих условиях  
(Helfried Passath, Peter Hamberger, Gerald Leber, Florian Bachinger - Siemens AG, Transformers)

В этой работе представлены эксплуатационные данные, представляющие собой 4-х месячный профиль нагрузки постоянного тока однофазных трансформаторов, оснащенных активной компенсацией постоянного тока. Рассматриваемый блок, состоящий из трех однофазных автотрансформаторов, находится в эксплуатации и подвержен воздействию постоянного тока из воздушных линий через обмотки с общей нейтралью. Величина постоянного тока варьируется от 0,05А до 0,2А на фазу в течение дня. Заводские испытания показали, что только 0,2А вызывает увеличение шума на 5,6 дБ (А) по сравнению с уровнем шума без какой-либо компенсации постоянного тока. Это может создать проблемы на подстанции, когда шум должен быть ниже гарантированного уровня.

Анализ данных опыта эксплуатации показывает, что величина постоянного тока с четким профилем и самыми высокими показателями в течение дня приходится на полночь и время обеда. Это может указывать на корреляцию с нагрузкой и/или операциями переключения в сети для настройки реальной необходимой нагрузки. Тем не менее, оборудование компенсации постоянного тока полностью исключает постоянный ток, вызывающий увеличение шума.

#### 15) Расширение границ конструкции индуктивного трансформатора напряжения

(Igor Žiger, Zvonimir Ubrekić, Danijel Krajtner - Končar - Instrument transformers Inc.)

Проектирование индуктивных трансформаторов напряжения для самых высоких уровней напряжения (550 кВ и выше) является сложной задачей. Основной причиной является их сложное внутреннее строение, в том числе система изоляции, которая должна быть устойчива ко всем видам перенапряжений. Поэтому в процессе проектирования необходимо испытывать такие трансформаторы с помощью следующих видов стандартных испытаний: напряжение промышленной частоты (PFVV), грозовые перенапряжения, коммутационные перенапряжения.

Основная идея работы состоит в том, чтобы продемонстрировать, что на основе понимания влияния важнейших параметров соответствующей эквивалентной схемы на распределение напряжения в активной части трансформатора, можно рассчитать конструкцию индуктивных трансформаторов напряжения таким образом, что они могут удовлетворить даже самым строгим требованиям к изоляции, расширяя при этом возможности проектирования.

Показано, что уменьшение общего числа первичных витков имеет положительное влияние на распределение напряжения в целом. Отмечено, что увеличение емкости основной изоляции оказывает положительное влияние на распределение напряжения при воздействии грозового и коммутационного импульсов.

#### 16) Улучшение конструкции современных распределительных трансформаторов

(Branimir Ćučić, Martina Mikulić, Nina Meško, Dominik Trstoglavac - Končar – Distribution & Special Transformers Inc.)

В данной работе показано, что усовершенствование конструкции распределительных трансформаторов связано с повышением энергоэффективности с учетом экологических проблем. В работе проанализирован экодизайн различных видов трансформаторов: аморфных трансформаторов, автотрансформаторов и трансформаторов, наполненных эфиром.

В связи с ростом значения энергоэффективности Европейская комиссия приняла новое правило, которое определяет максимально допустимые уровни нагрузки и потери без нагрузки для трансформаторов с номинальной мощностью  $\leq 3150$  кВА, а также минимальный показатель эффективности для трансформаторов с номинальной мощностью  $> 3150$  кВА до 40 МВА. В докладе описано влияние принятия новых правил на проектирование трансформаторов.

Трансформаторы с аморфным сердечником с уменьшением потерь без нагрузки до 70% по сравнению с обычными трансформаторами, могут являться альтернативным решением в части эффективности использования энергии. Хотя их начальная цена выше, чем цена обычных трансформаторов, некоторые исследования показывают, что они могут иметь экономические преимущества в будущем.

Растущее применение распределенных источников энергии может привести к увеличению колебаний напряжения в сетях низкого напряжения. Чтобы сохранить напряжение в пределах, установленных EN 50160, могут быть использованы распределительные трансформаторы с регулированием напряжения.

Хотя минеральное масло используется в качестве жидкого диэлектрика в трансформаторах в течение многих лет, есть некоторые экологически более безопасные альтернативы - натуральные и синтетические жидкости на основе сложных эфиров.

#### 17) Современная конструкция автономных тяговых трансформаторов

(Mario Jurković, Ivan Sitar - Končar - Distribution & Special Transformers Inc., Damir Žarko - University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing)

В работе описан современный дизайн автономного тягового трансформатора,

Проанализировано влияние характеристик электроснабжения (переменного или постоянного тока) на конструкцию трансформатора, а также различия между уни-и мульти-системными конструкциями трансформаторов. Наконец, показано влияние гармоник воздействия тока нагрузки на конструкцию трансформатора, особенно на конструкцию системы охлаждения.

#### 18) Улучшенная эффективность и надежность энергосистемы

(Dr. Audrius Ilgevičius, Erich Steindl Dipl.-Ing. (FH) – Maschinen fabric Reinhausen Germany)

Традиционным решением в ответ на повышенный и колеблющийся спрос на электроэнергию является увеличение мощности сети. В работе представлены альтернативные стратегии, которые отвечают новым условиям энергосистемы, путем повышения ее эффективности и надежности. Ключевыми факторами являются регулирование потока мощности и усовершенствованное автоматическое регулирование напряжения сети. Эти задачи выполняются с помощью такого оборудования, как фазорегулирующий трансформатор, управляемый шунтирующий реактор, усовершенствованные автоматические регуляторы напряжения.

В докладе рассмотрены следующие вопросы:

1) регулирование напряжения и реактивной мощности:

- автоматическая регулировка напряжения с компенсацией потерь при передаче;
- автоматическая регулировка напряжения в сетях с децентрализованными источниками генерации;
- регулирование реактивной мощности с использованием управляемых шунтирующих реакторов;

2) регулирование потока мощности:

- регулирование потока мощности с помощью фазорегулирующих трансформаторов;
- регулирование потока мощности с помощью преобразовательных трансформаторов постоянного тока высокого напряжения.

### **3.3. Тема 3 «Управление сроком службы трансформаторов»**

1) Изоляционные жидкости – разработки, тренды и влияние на диагностику

(Ivanka Atanasova-Nöhlein - Siemens E T TR)

Как известно, идеальных изоляционных жидкостей не существует, но глубокие знания об их преимуществах и недостатках помогают сформировать правила для выбора изоляционных жидкостей в зависимости от специфики применяемого оборудования. Ужесточение законов, касающихся экологических ограничений и противопожарной безопасности, открыли «нишу» для эфирных и кремнийорганических жидкостей. Новые технологии изменения химической структуры изоляционных жидкостей позволяют обеспечить свойства жидкостей, отвечающие самым высоким требованиям.

2) Стратегия и внедрение мониторинга для управления активами

(Josias Matos de Araújo, Paulo Veloso Almeida, Roberto Jander Costa Padilha, Lílian Ferreira Queiroz, Cleusomir Carvalho dos Santos - Eletrobras Eletronorte)

В работе описана практика компании Eletronorte по применению системы диагностики оборудования – «Диана». Данная система позволяет своевременно определить развивающиеся повреждения на основе данных по ис-

питаниям оборудования, а также виды повреждения по результатам онлайн контроля. Использование систем диагностического мониторинга позволяет обнаружить повреждения на ранней стадии их развития, что приводит к снижению затрат за счет уменьшения времени простоя оборудования путем проведения своевременного технического обслуживания и профилактических мероприятий. Указанная система получила широкое распространение в Eletronorte для проведения технического обслуживания (ТО).

3) Вопросы увеличения срока эксплуатации трансформаторов и управления активами

(Fleischmann Werner, Ilgevicus Audrius, Krüger Thorsten - Maschinenfabrik Reinhausen GmbH)

Различные типы трансформаторов, различные виды РПН, множество функциональных узлов, различные концепции эксплуатации, нормативные и сверхнормативные нагрузки, влияние окружающей среды – жизненно важные факторы для выявления тенденций при определении срока эксплуатации трансформаторов и разработке стратегий управления активами, позволяющие сохранить эксплуатационную надежность оборудования.

Подход, основанный на применении индекса исправности оборудования («индекса здоровья»), позволяет проводить риск-ориентированное ТО и замену оборудования по выставленным приоритетам. Следует отметить, что при использовании системы передачи данных на основе СИМ-моделей (Common Information Model), информация из различных систем может быть преобразована в общий формат.

4) Новые инструменты для мониторинга и диагностики силовых трансформаторов

(Michael Krueger, Stefan Hoek- OMICRON, Klaus, Austria)

С увеличением срока службы силовых трансформаторов, периодический контроль их состояния становится все более важным. ХАРГ является проверенным способом выявления повреждений на основе увеличения концентраций водорода и углеводородных газов. Отмечено, что для выявления причины повышения концентраций газов, должны быть проведены дополнительные испытания. К общим методам относятся измерение сопротивления обмотки, испытание РПН, измерения коэффициента трансформации и тока возбуждения, а также измерение емкости и диэлектрических потерь.

Инновационные методы, такие как анализ диэлектрического отклика с током поляризации-деполяризации и спектроскопия частотной характеристики, измерения функции передачи с анализом частотной характеристики, измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь на разных частотах, а также измерение частичных разрядов с помощью современных синхронных многоканальных и многочастотных систем, позволяют проводить более детальные диагностические измерения в трансформаторах. Мощным инструментом для регистрации ЧР являются акустические измерения совместно с электрическими или УВЧ-измерениями. Одновременные измерения

ЧР этими методами позволяют получить более полную информацию об источниках ЧР и местах их возникновения.

В работе описаны все вышеперечисленные новые методы, и проиллюстрировано их практическое применение для мониторинга и диагностики оборудования.

5) Диагностика измерительных трансформаторов на ТС Rijeka  
(Ivan Kajari, Anton Mataija, Luka Miškulin - NEP-PROIZVODNJA d.o.o)

В работе представлен 30-летний опыт применения методов диагностики для определения состояния измерительных трансформаторов, установленных на ПС класса напряжения 110/35 кВ Риека (Rijeka). Рассмотрены преимущества и недостатки конкретного метода диагностики, а также представлен обзор новых методов, которые в настоящее время реализуются на ПС. Результаты периодических измерений позволяют планировать своевременную замену измерительных трансформаторов, срок службы которых подходит к концу. Проведение диагностики позволяет обеспечить нормальное функционирование ОРУ 110 кВ.

6) Испытания измерительных трансформаторов с помощью акустических измерений ЧР

(Goran Skelo, Amgijada Karišik, Fikret Velagić - Electricity Transmission Company of Bosnia and Herzegovina)

В работе проанализирован акустический метод измерения частичных разрядов в маслонаполненных измерительных трансформаторах. Представлены результаты измерения ЧР, сопротивления изоляции и тангенса угла диэлектрических потерь в трансформаторах тока, которые были сняты с эксплуатации. Кроме того, результаты ХАРГ подтвердили плохое состояние изоляции.

Было показано, что, измерение ЧР акустическим методом позволяет обнаружить ухудшение состояния изоляции в измерительных трансформаторах. Отмечена необходимость продолжения исследований, принимая во внимание результаты измерений, выполненных с помощью других методов. Это позволит более точно определить интенсивность и характер ухудшения изоляции, а также определить критерии оценки результатов измерений.

7) Ультразвуковой метод испытаний силовых трансформаторов  
(Danijel Brezak, Dalibor Filipović-Grčić - Končar - Electrical Engineering Institute Inc.)

Ультразвуковой метод для обнаружения ЧР основан на том, что ЧР и наиболее нагретые точки с температурой  $> 200$  °С в изоляции вызывают образование ультразвуковых волн, которые распространяются внутри трансформатора к стенкам бака. Из-за разницы во времени распространения волн с помощью нескольких датчиков, расположенных в разных точках трансформатора, можно вычислить примерное местоположение источника. С помощью ультразвукового метода также можно обнаружить другие дефекты в

трансформаторах, такие как «ухудшение» состояния контактов и локальный перегрев масла ( $T > 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

В работе описаны три тематических исследования. В первом исследовании ХАРГ зафиксировал термическую проблему в масле, а результат ультразвукового контроля указал на проблему в контактах РПН. Во втором случае ультразвуковой метод был применен после электрического метода, который обнаружил высокий уровень ЧР при напряжении ниже, чем номинальное. Ультразвуковым методом удалось обнаружить, что электростатический экран не заземлен. В третьем случае произошел отказ трансформатора – пробой в торцевой области высоковольтного ввода. Предположительно ЧР возникли в эпоксидной изоляции, что в конечном итоге привело к отказу.

Ультразвуковой метод рекомендуется применять в том случае, когда один из стандартных диагностических методов или систем мониторинга указывает на возможные проблемы, то есть когда ХАРГ показывает на высокую интенсивность электрических или тепловых процессов внутри трансформатора. Этот метод наиболее эффективен для диагностики трансформаторов в сочетании с другими диагностическими методами (ХАРГ + электрический метод измерения ЧР).

8) Проверка состояния трансформаторов и эффективности регенерации масла на основе измерений возвратного напряжения

(Bálint Németh - Budapest University of Technology and Economics, István Kispál, Gusztáv Csépes - Diagnostics Ltd., Zsolt Laczkó - MVM OVIT Ltd.)

В различных источниках описываются три вида испытаний: измерение возвратного напряжения, измерения температуры и  $\text{tg}\delta$  в диапазоне от нескольких десятков МГц до 50 Гц, а также измерение тока заряда и разряда (токи поляризации и деполяризации) до нескольких тысяч секунд. Эти эквивалентные методы могут отслеживать изменение состояния изоляции в отличие от классических методов. При этом необходимо отметить, что до сих пор отсутствуют стандарты по методам поляризации. В более ранней исследовательской работе, выполненной в Будапештском университете технологии, были реализованы почти все необходимые измерения, поэтому авторы обладали всеми фундаментальными данными, учитывающими методы поляризации. В работе дан краткий обзор метода измерения возвратного напряжения и интерпретация данных измерений.

Доказано, что измерение возвратного напряжения является эффективным методом получения информации о состоянии бумажно-масляной изоляции. Для трансформаторов этот метод применим как при приемо-сдаточных испытаниях, в качестве подтверждения того, что транспортировка, хранение и установка были осуществлены правильно, так и при периодических испытаниях. Также доказано, что указанный метод является гораздо более информативным, чем классические методы измерения диэлектрических характеристик (сопротивление изоляции, тангенс угла дельта и т.д.).

9) Изменение термической стабильности синтетических эфирных масел

(Veronika Haramija, Vedran Đurina, Domagoj Vrsaljko, Dijana Vrsaljko -



KONČAR – Electrical Engineering Institute Inc.)

Экологически чистая синтетическая изоляционная жидкость на основе эфира подвергается старению при температуре 120°C и 150°C в присутствии воздуха в течение 672 часов. В работе описано проведение дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа на образцах нового и стареющего масла. Также на данных образцах были проведены измерения кинематической вязкости и диэлектрических потерь, наблюдения за цветом и определение содержания воды.

Дифференциальная сканирующая калориметрия и термогравиметрический анализ оказались полезными в части мониторинга процесса окисления синтетических эфиров. Для получения информации о термическом ухудшении состояния синтетических эфирных масел необходимо провести дополнительные измерения.

10) Новые инструменты для диагностики данных по ХАРГ  
(David Bidwell, Donal Skelly - Qualitrol Corporation)

Системы непрерывного контроля растворенных в трансформаторном масле газов постоянно совершенствуются с учетом возрастающей скорости появления новых продуктов и технологий на рынке. Тем не менее, «тихая революция» происходит и в анализе данных. С увеличением количества устанавливаемых датчиков данных для анализа становится все больше. Требуются новые способы интерпретации этих данных. Один из наиболее важных подходов – использование нейронных сетей (НС) для анализа данных ХАРГ. С учетом того, что данные должны быть легко преобразованы в информацию для конечного пользователя, такие диагностические средства, как треугольник Дюваля (Треугольники 4 и 5) имеют большую ценность для ранее полученных данных. Вопрос, поднятый в данной работе, относится к тому, имеет ли программное обеспечение существующих систем онлайн мониторинга достаточную точность и повторяемость измерений, чтобы обеспечить надежное диагностическое заключение.

В работе описана экспертная система TOAN (Transformer Oil Analysis and Notification), которая, возможно, отражает наиболее значительные изменения в диагностике ХАРГ за последнее десятилетие. Помимо способности идентифицировать конкретную неисправность, данная система в перспективе может идентифицировать старение изоляции в режиме реального времени.

11) Исследование тока включения трансформатора  
(Ivan Šulc, Antun Mikulecky, Robert Sitar - Končar - Electrical Engineering Institute Inc.)

В работе проанализированы явления искрения, которые наблюдались на силовых трансформаторах при первых включениях. Искрение произошло на фланце между крышкой и стенками бака. Явление наблюдалось в трансформаторах от разных производителей, с различными номинальными напряжениями, с сердечниками разных конструкций.

В работе предложена простая электромагнитная модель для анализа таких явлений. Было проведено моделирование трехфазного силового трансформатора с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Упрощенная модель трансформатора в 3D использована для имитации насыщения сердечника при воздействии тока включения. Напряжение между крышкой и стенками бака рассчитывалось для смоделированных условий. Эта же модель использовалась для расчета возможных токов, протекающих между крышкой и стенками бака.

Несмотря на то, что наблюдаемое явление не является опасным, были предложены меры по смягчению возможных последствий с помощью применения сварной крышки бака, а также дополнительных перемычек между крышкой бака и стенкой. Тем не менее, при отсутствии каких-либо действий, искрение исчезает, не вызывая повреждений.

#### 12) Анализ механической структуры трансформаторов

(Zoran Andjelic - Polopt Technologies GmbH, Asim Fazlagic, Ramsis Girgis - ABB, USA, Marcus Ries, Andreas Seidel - Woelfel GmbH, Germany)

Во время перевозки крупных силовых трансформаторов от места производства до ПС, трансформатор обычно подвергается различным механическим воздействиям. Кроме того, механические воздействия на конструкцию трансформатора наблюдаются при включении / выключении. Как правило, трансформаторы должны выдерживать определенные стандартные уровни воздействия при ускорениях в процессе транспортировки во всех трех направлениях –  $x$ ,  $y$ , и  $z$ . Кроме того, трансформаторы обычно оснащены устройствами для записи воздействия ускорений (шок-индикаторы). В работе представлены результаты изучения воздействия вертикального ускорения, зарегистрированного во время железнодорожной перевозки большого силового трансформатора.

#### 13) Бездуговые испытания высоковольтного маслонаполненного электрооборудования на взрывобезопасность

(Л.А. Дарьян, В.П. Полищук, А.В. Шурупов)

В работе представлены результаты экспериментальных исследований ДР в трансформаторном масле (ТМ) в условиях, типичных для начальной стадии разряда: время нарастания тока 3-5 мс, максимальный ток дуги – до 30 кА, время горения ДР - 3-20 мс. Энергия, выделившаяся в ДР, достигала 0,1 МДж. Установлено, что характерное значение напряженности электрического поля в столбе ДР составляет 0,2 кВ/см, коэффициент газообразования в ДР есть 110 л/МДж, темп роста давления в ТМ – 0,3 МПа/мс. Полученные результаты позволили создать БИИД с заданными параметрами. Установлено, что течение ТМ под действием ДР и СПГ являются подобными, если при одинаковой длительности воздействия энергия, выделившаяся в ДР, равняется энтальпии СПГ на входе в жидкость.

В данной работе проанализированы особенности разрушения трансформатора после взрыва, и сформулированы требования для систем безопасно-

сти. С помощью БИИД проведены испытания макетов двух известных методов защиты ВМЭО от взрыва. В первом методе защита ВМЭО от разрушения при взрыве, как считается, достигается за счет быстрого сброса давления внутри корпуса ВМЭО при раскрытии специальных мембран. Во втором методе защиты предлагается устанавливать пористые покрытия на внутренних поверхностях корпусов ВМЭО. При этом предполагается, что под воздействием импульсного давления произойдет сжатие пористой стенки, внутренний объем ВМЭО возрастет, и давление на стенках камеры уменьшится до безопасного уровня. Эксперименты проводились на модели ВМЭО с характерным размером 1 м при энергии воздействия до 1,5 МДж. Результаты испытаний показали, что вышеуказанные системы не могут защитить корпус ВМЭО от значительных повреждений.

В работе описана система динамической защиты от взрыва (СДЗ). Эффективность применения данной системы с БИИД была доказана по результатам проведения испытаний с автотрансформатором 25 МВА. Было показано, что СДЗ защищает трансформатор от значительных повреждений вплоть до энергии динамического импульса в 3 МДж.

#### **4. Выводы**

Представленные доклады свидетельствуют об имеющей место в мире тенденции развития методов и приборно-аналитического обеспечения оценки состояния трансформаторов, контроля за сроком службы трансформаторов и повышения эффективности управления активами. В частности, активно развиваются системы мониторинга состояния оборудования, что повышает его эксплуатационную надежность. В связи со значительным старением оборудования, большое внимание уделяется новым подходам к модернизации и продлению срока эксплуатации оборудования, а также внедрению новых технологий проектирования.

В настоящее время актуальными становятся вопросы совершенствования материалов и улучшения конструкций оборудования. Наблюдается переход к использованию экологически чистых биоразлагаемых изоляционных жидкостей на основе растительных масел (эфира). Большое количество докладов отражают повышенный интерес к применению современных оптимизированных конструкций трансформаторов.

Немалое количество докладов также было посвящено вопросам численного моделированию трансформаторов с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в 2D и 3D.