

# МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ В УПРАВЛЕНИИ СРОКОМ СЛУЖБЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

ДАРЬЯН Л. А., д.т.н., профессор кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» НИУ МЭИ

Сегодня электроэнергетические компании во всем мире все больше и больше сталкиваются с вопросами, связанными с управлением активами, в частности, силовыми трансформаторами. Причем эти перемены происходят в период повышения общественного интереса к стоимости электроэнергии, а также воздействию энергетических процессов на окружающую среду. Лучшее решение данных проблем – привлечение передового мирового опыта в части применения новых технологий, конструкций, методов диагностики и технического обслуживания трансформаторов. С этой целью в октябре 2014 года при поддержке Хорватского национального комитета СИГРЭ в Сплите (Хорватия) прошел Третий Международный коллоквиум по исследованию трансформаторов и управлению активами.

Организаторами мероприятия были выбраны три наиболее предпочтительные темы:

■ **численное моделирование:**

- электромагнитное поле,
- переходные процессы,
- численное моделирование в проектировании и т.д.;

■ **материалы и оборудование:**

- изоляционные материалы,
- магнитные материалы,

- компоненты трансформатора,
- новые технологии;

■ **управление сроком службы трансформаторов:**

- мониторинг;
- диагностика;
- отказы;
- управление активами.

Ограниченный объем журнала не позволяет привести здесь полный обзор докладов, сделанных на коллоквиуме, поэтому сосредоточимся на одной, но самой интересной, на наш взгляд, теме – управление сроком службы трансформаторов.

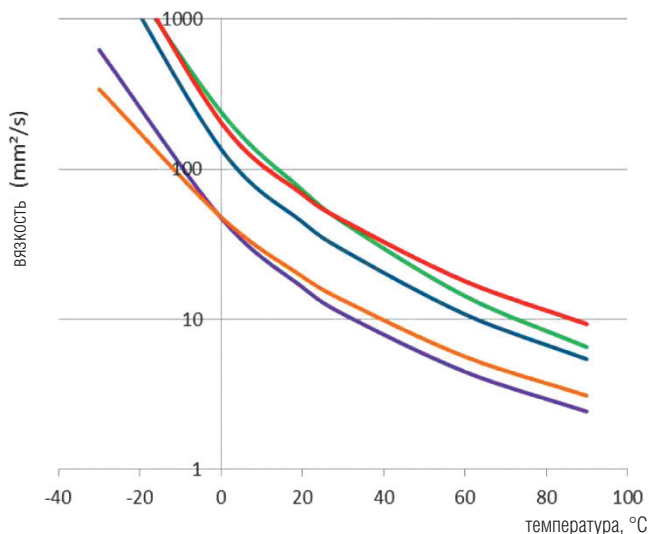


Рис. 1. Вязкость различных изоляционных жидкостей

- Нафтенное масло, — синтетический эфир,
- изопарафиновое масло, — синтетический эфир

В докладе **Ivanka Atanasova-Höhlein (Siemens E T TR)** рассмотрены разработки, тренды и влияние свойств новых изоляционных жидкостей на диагностику. 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 (рис. 1).

Новые технологии изменения химической структуры изоляционных жидкостей позволяют обеспечить свойства жидкостей, отвечающие самым высоким требованиям.

В работе «Стратегия и внедрение мониторинга для управления активами» **Josias Matos de Araújo, Paulo Veloso Almeida, Roberto Jander Costa Padilha, Lillian Ferreira Queiroz, Cleusomir Carvalho dos Santos** –

**Eletronorte Eletronorte** описана практика компании Eletronorte по применению системы диагностики (СД) оборудования – «Диана». Данная система позволяет своевременно определить развивающиеся повреждения на основе данных по испытаниям 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) (рис. 2).

Вопросы увеличения срока эксплуатации трансформаторов и управления активами подняты **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 (рис. 3).

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 CIM-моделей (Common Information Model), информация из различных систем может быть преобразована в общий формат.

Новые инструменты для мониторинга и диагностики силовых трансформаторов изложены в докладе **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 концен-

## ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Ведущий рубрики



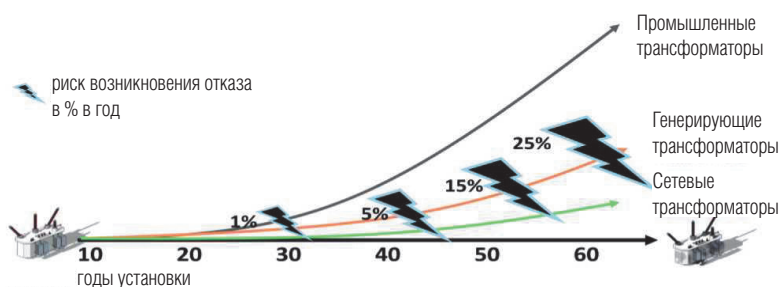
### Дарьян Леонид Альбертович

Доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» НИУ МЭИ.

Член Российского национального комитета СИГРЭ, с 2000 года представляет Россию в Исследовательских комитетах СИГРЭ



**Рис. 2.** Подтверждение анализов на основе СД «Дианы». Фланцы ввода, на которых показана карбонизация, плавление и коррозия материалов



**Рис. 3.** Риск возникновения отказа

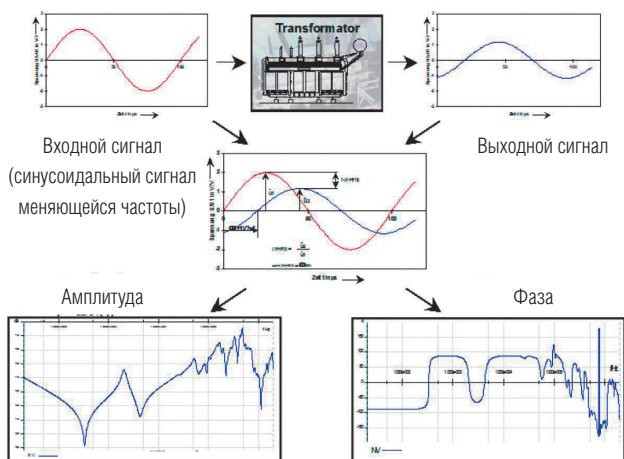


Рис. 4. Принцип работы анализа диэлектрического отклика

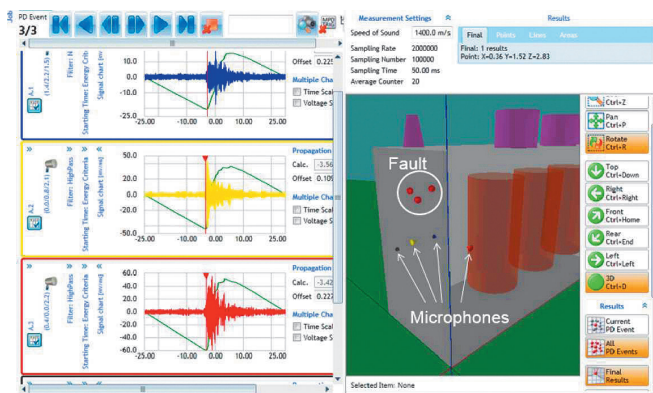


Рис. 5. Акустические измерения ЧР

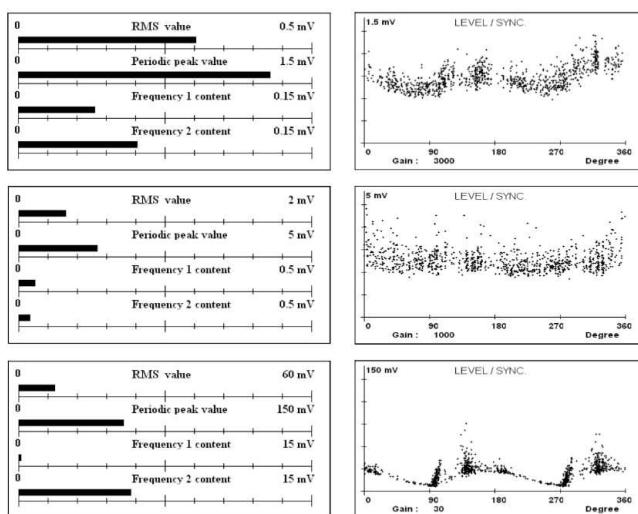


Рис. 6. Результаты акустических измерений ЧР

траций 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

(рис. 4) 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.

В работе **Ivan Kajapi, Anton Mataija, Luka Miškulin – NEP-PROIZVODNJA d.o.o** 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.

Об испытаниях измерительных трансформаторов с помощью акустических измерений ЧР (рис. 5) рассказали **Goran Skelo, Amgijada Karišik, Fikret Velagić – Electricity Transmission Company of Bosnia and Herzegovina**. В их работе проанализирован акустический метод измерения частичных разрядов в измерительных трансформаторах. Представлены результаты измерения ЧР, сопротивления изоляции и тангенса угла диэлектрических потерь в маслонаполненных трансформаторах тока, которые были сняты с эксплуатации. Кроме того, результаты ХАРГ подтвердили плохое состояние изоляции (рис. 6).

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.

Ультразвуковой метод измерений ЧР в силовых трансформаторах был использован в исследованиях **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 рас-





Рис. 7. Установка датчика (слева), источник ЧР (справа сверху) и его установка на бак (справа снизу)

пространяются 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 (рис. 7).

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).

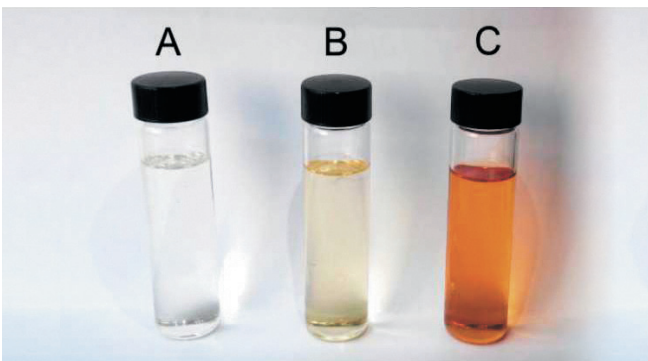


Рис. 9. Изменение цвета изоляционной жидкости (А) после 672 часов термического старения при температурах 120 °С (В) и 150 °С (С); изменение тангенса угла дельта при температурах 120 °С и 150 °С во время старения

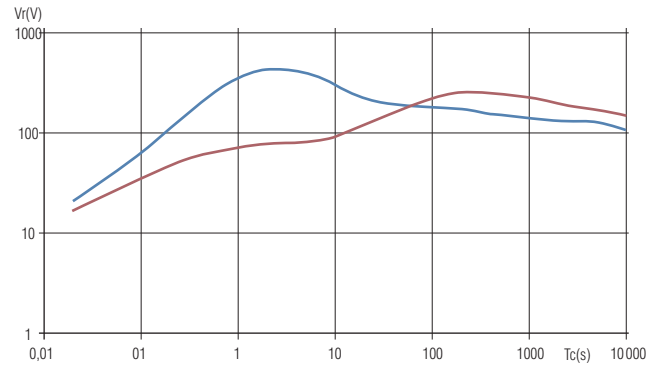
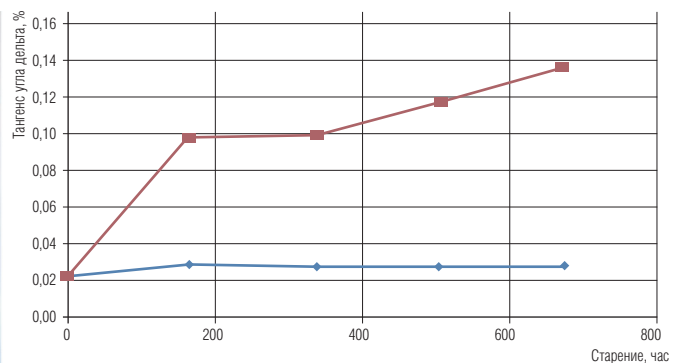


Рис. 8. Измерения возвратного напряжения до и после регенерации масла  
— до регенерации масла, — после регенерации масла

Проверкой состояния трансформаторов и эффективности регенерации масла на основе измерений возвратного напряжения занимались **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 (рис. 8).

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



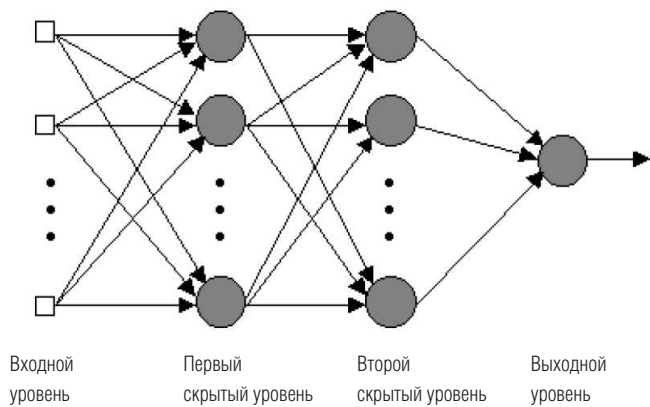


Рис. 10. Пример структуры ИНС

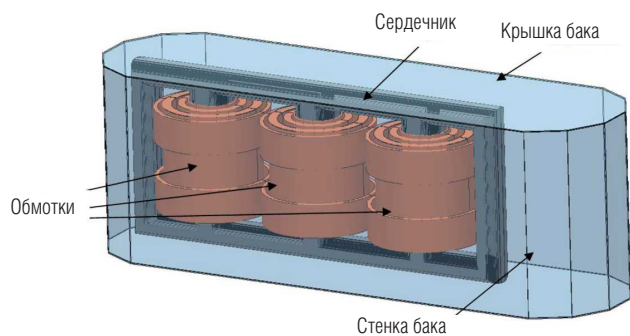


Рис. 11. Модель трансформатора, использованная в анализе

классические методы измерения диэлектрических характеристик (сопротивление изоляции, тангенс угла дельта и т.д.).

Работа **Veronika Haramija, Vedran Đurina, Domagoj Vrsaljko, Dijana Vrsaljko – KONČAR – Electrical Engineering Institute Inc.** посвящена изменению термической стабильности синтетических эфирных масел. 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 (рис. 9).

О новых инструментах для диагностики данных по ХАРГ сообщили **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 Дювала (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 (рис. 10).

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.

Интересное исследование процессов, возникающих при включении трансформатора провели **Ivan Šulc, Antun Mikulecky, Robert Sitar – Končar – Electrical Engineering Institute Inc.** В их 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 (рис. 11).

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.

С докладом «Анализ механической структуры трансформаторов» выступили **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 воздей-

ствия 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 (рис. 12).

И наконец, российские исследователи **Дарьян Л.А., Полищук В.П., Шурупов А.В.** поделились результатами бездуговых испытаний высоковольтного маслонаполненного электрооборудования на взрывобезопасность.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований дуговых разрядов (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 бездуговой источник импульсного давления (БИИД) с заданными параметрами (рис. 13).

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 (рис. 14).

В работе описана система динамической защиты от взрыва (СДЗ), предложенная авторами. 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.

## Выводы

Представленные доклады свидетельствуют об имеющей место в мире тенденции совершенствования существующих и разработки новых методов и приборно-аналитического обеспечения оценки состояния трансформаторов, контроля за сроком службы трансформаторов

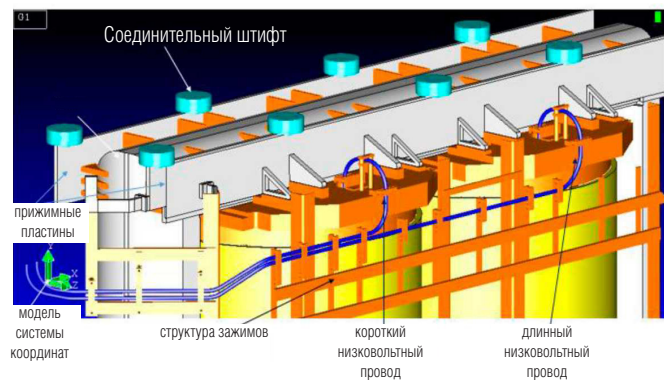


Рис. 12. Модель трансформатора



Рис. 13. БИИД с энергией 5 МДж



Рис. 14. Автотрансформатор с системой динамической защиты до испытаний

и повышения эффективности управления активами. В частности, активно развиваются системы непрерывного контроля состояния оборудования, которые позволяют определить развивающиеся повреждения на ранней стадии их развития и тем самым повысить эксплуатационную надежность оборудования. В связи со значительным старением парка трансформаторного оборудования во всем мире большое внимание уделяется новым подходам к модернизации и продлению срока эксплуатации оборудования, а также внедрению новых технологий и материалов, в частности изоляционных жидкостей.