

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

МАЯКОВ В.П., ОСЕРВАСЕР М.Я., СОКОЛОВ В.В.
НИЦ «ЗТЗ-СЕРВИС»

Вступление

В последние годы наблюдается интенсивное развитие методов диагностики трансформаторного оборудования с выраженной тенденцией выбора эффективных методов оценки состояния без отключения оборудования от сети. НИЦ ЗТЗ-Сервис, выполняя работы по диагностике оборудования, установленного в энергосистемах разных стран, стремится при этом решать следующие задачи:

- Выполнять испытания в соответствии с основными международными стандартами (МЭК, IEEE, СИГРЭ, ASTM).
- Анализировать и использовать по возможности новейшие методы диагностики.
- Оценивать состояние оборудование в соответствие с национальными нормативными документами и международными стандартами.
- Выявлять дефектное состояние, используя методологию разработанную непосредственно НИЦ.

В ряде случаев методическая и нормативная база в международных документах существенно отличается от принятых в нормах России, а некоторые эффективные методы и диагностические оценки остаются практически неизвестными специалистам энергосистем. В настоящем докладе делается попытка представить характерные методы применяемые при диагностике силовых трансформаторов, а также эффективность некоторых методов.

Традиционная система диагностических испытаний. Наиболее систематизированным и цельным документом, представляющим традиционную систему диагностических испытаний и оценки технического состояния Трансформаторов, Регуляторов и Реакторов, является Руководство IEEE Std 62-1995 по диагностическим испытаниям Электрических Силовых Аппаратов в полевых условиях, Система испытаний представлена в Табл. 1 с выделением методов, допускающих испытания под напряжением. Трансформатор традиционно представляется состоящим из нескольких компонентов, и состояние каждого из компонентов оценивается по результатам нормированных испытаний.

Методы испытания в Руководстве IEEE в значительной степени похожи на методы «Норм России», но в ряде случаев существенно отличаются.

Тенденции развития методов испытаний. На основе анализа материалов СИГРЭ, комитетов DOBLE, а также работ, представленных в последние годы на конференциях IEEE и EPRI можно определить следующие основные тенденции:

- Интенсивное развитие методов контроля под напряжением, а также методов непрерывного контроля с предложениями на уровне коммерческих поставок (после полноценных испытаний опытных образцов в эксплуатации).
- Расширение методов контроля продуктов деградации в масле.
- Развитие методов, основанных на оценке частотных характеристик (переходных функций).
- Развитие методов контроля температуры и экспертных программ контроля температурно-нагрузочного режима и расчета износа целлюлозы.
- Развитие портативной техники диагностики.

Методы непрерывного контроля

- Контроль растворенных газов. Распространены две типичных модификации:
 - измерение суммы характерных горючих газов ($H_2+CO+C_2H_4+C_2H_2$) типа

HYDRAN-установлены более чем на 15000 ед. оборудования;

- индивидуальный контроль 7 типичных газов
- Контроль влажности (относительной влажности масла), сопровождающейся экспертной системой оценки влажности твердой изоляции. Широкое развитие датчиков влажности. Значительный интерес вызывает метод "Water Heat Run Test" разработанный ЗТЗ-Сервис
 - Измерение частичных разрядов акустическими датчиками
 - Измерение частичных разрядов с помощью электрических датчиков как с целью выявления и идентификации проблем связанных с внутренними разрядами, так и для оценки ухудшения состояния изоляции. Имеются предложения по комбинированной системе с дополнительным использованием акустических датчиков.
 - Измерение диэлектрических характеристик вводов, в том числе основанного на анализе амплитудно-фазового спектра тока небаланса в трехфазной системе
 - Анализ вибро-акустических спектров для оценки распрессовки обмоток и магнитопровода
 - Контроль состояния РПН с помощью измерения тока и мощности в двигателе привода, измерения момента сопротивления на валу привода, измерения акустических сигналов

Масло как диагностическая среда

Анализ продуктов деградации материалов является наиболее благодарным средством для выявления аномалий в маслonaполненном оборудовании. Кроме измерения влаги, идентификации количества и видов механических примесей, анализа растворенных газов, анализа фурановых компонентов, широкое распространение находят методы идентификации продуктов старения масла инфракрасной спектроскопией, определение фенолов и крезолов, в частности m-крезола (жидкостная хроматография), а также определение растворенных металлов, особенно меди (молекулярная абсорбция).

Детальный анализ масла является ключевым методом предварительной оценки состояния оборудования. По данным НИЦ более 70 % дефектов выявляется посредством анализа проб масла.

Так, например, исследование проб масла из 127 трансформаторов, установленных в энергосистеме Боготы (Колумбия) в лаборатории Doble Eng., где регулярно проводились традиционные испытания, выявил 45 % дефектных трансформаторов (табл. 2).

Оценка старения изоляции и масла

Для оценки степени старения изоляции применяются в основном три метода
Измерение степени полимеризации (микроробы витковой изоляции, отводов)

Окислы углерода CO, CO₂

Фурановые компоненты (5), особенно наиболее устойчивый фурфурол

Отмечается, что повышенное содержание CO, CO₂ характеризует главным образом перегретую изоляцию, но также и другие перегретые материала, в частности масло в присутствии достаточного количества кислорода. Имеется слабая корреляция между концентрацией газов и значениями СП

Следует отметить существенную разницу в трактовке оценки результатов анализа фурановых соединений в РД «Объемы и нормы..» и в международных документах

На основании многочисленных лабораторных экспериментов и данных обследования большого числа трансформаторов, преимущественно с открытым дыханием предложен следующий критерий вероятно состаренной или перегретой изоляции:

Содержание фурфуrolа - более 1000 ppb (1 ppm)

Скорость нарастания - более 50 ppb в год

Ведущая США сервисная организация S.D.Myers Inc на базе статистических исследований (более 15000 результатов испытаний) предложила 4 уровня состояния изоляции (Табл.3).

Измеряются 5 компонентов: 5H₂F, 2FOL, 2FAL, 2FCF, 5M₂F

Анализируется сумма всех составляющих

Таблица 1

Схема диагностических испытаний Руководства IEEE Std 62-1995

Компоненты	Методы испытаний под напряжением	Методы испытаний после отключения оборудования
Обмотки включая изоляцию	Частичные разряды: Радиопомехи (RIV) Акустические Содержание влаги (интерпретация по относительной влажности масла)	Сопротивление постоянному току Коэффициент трансформации Ток намагничения (холостого хода) Сопротивление КЗ Сопротивление изоляции Емкость Коэффициент потерь (tanδ)
Изоляционное масло	Содержание влаги Растворенные газы Пробивное напряжение Частицы (число) Коэффициент потерь (tanδ) Поверхностное натяжение Кислотное число Цвет РСВ содержание Стабильность Сопротивление изоляции Потенциальный шлам Плотность	
Вводы	Визуальная инспекция/уровень масла	Коэффициент потерь/емкость участков С1 и С2 Измерение ЧР (ввод отдельно)
Переключающее устройство	Температура Ток двигателя привода	Непрерывность контрактов Коэффициент трансформации Временные характеристики Программа специальной инспекции
Магнитопровод		Сопротивление изоляции Проверка и испытание схемы заземления
Система охлаждения	Поток воздуха Чистота поверхности Вращение Ток в обмотках двигателей Подшипники (вибрации, шум, визуальный контроль)	

Результаты обследования 123 трансформаторов

Проблемы	Число трансформаторов	Ключевой метод выявления дефекта
Не обнаружено	70	
Состаренная/перегретая изоляция	21	Содержание фурфурола (16), АРГ (5)
Повышенная влажность	13	Равновесное содержание воды при температуре >60°C
Состаренное масло	25	Некислые полярные продукты в ИК спектре (1700 – 1720 см ⁻¹). Поверхностное натяжение
Разряды в масле	9	АРГ
Разные	17	

Таблица 3

Граничные уровни	Фактическое Распределение (выше чем)	Оценка и действия
100 ppb	24.405	Первый сигнал, ожидаемое снижение СП от 1200 до 444. Повторение испытаний через год
250 ppb	13.334	Испытания каждые три месяца, ожидаемое снижение СП 443-333, повторение испытаний через 6 мес.
1,000 ppb	3.678	Риск повреждения, ожидаемая СП 332-237 регенерация масла необходима для уменьшения скорости старения. Рекомендуется анализ кислот, альдегидов, кетонов, мыл металлов. Испытания ежемесячно.
2,500 ppb	1.714	Ожидаемая СП – менее 127, необратимое повреждение изоляции. Целесообразно планировать замену

Температурная миграция фуранов

При изменении температуры в пределах 22-45С

Влажность менялась от 10 до 26

Сумма фуранов - от 012921 до 1722 ppb

Отмечается значительное снижение фуранов при регенерации масла. Однако большая их часть концентрируется в бумаге и после регенерации содержание фуранов восстанавливается в течение нескольких месяцев

Рабочая группа СИГРЭ 12.18 «Life Management» рекомендует обращать особое внимание на роль кислых и полярных продуктов старения масла в ускоренном старении целлюлозы. К сожалению, традиционные характеристики старения (кислотное число, тангенс угла потерь, водорастворимые кислоты и даже содержание ионола) недостаточно отражают состояние масла, особенно принимая во внимание активное адсорбирование продуктов старения целлюлозой

НИЦ успешно применяет такие дополнительные показатели как: цвет (по ASTM), поверхностное натяжение, число омыления, шлам, наличие полярных продуктов по ИК-спектру, коэффициент полярности (увеличение диэлектрической проницаемости).

Методы оценки состояния изоляционной системы трансформатора

Главной задачей при диагностики состояния изоляционной системы является оценка возможности снижения ее электрической прочности под действием влаги, примесей, продуктов старения масла и загрязнения поверхности изоляции. Отдельной задачей является оценка возможной степени увлажнения и загрязнения.

Наиболее эффективным средством является оценка состояния изоляции непосредственно при рабочем напряжении.

Опыт НИЦ показывает, что наиболее эффективными методами являются

Water Heat Run Test оценка уровня увлажнения по выделению влаги в масло при относительном повышении концентрации влаги в поверхностных слоях изоляции с повышением температуры, и сопутствующее снижение пробивного напряжения масла. При этом учитывается содержание примесей в масле и наличие активных продуктов старения и, в частности, снижение поверхностного натяжения масла

Измерение величин кажущегося заряда ЧР, частоты их повторения и энергии ЧР

Характеристики ЧР позволяют идентифицировать дефектное состояние изоляции, определить источник разрядов в масле, предполагаемый по данным АРГ, а также наличие развивающихся разрядов в масло-барьерной изоляции.

Имеются предпосылки для скорого внедрения методов непрерывного контроля ЧР.

Оценка степени увлажнения и загрязнения изоляции и масла по температурной зависимости тангенса угла потерь и сопротивления изоляции с учетом конструктивных размеров и удельного соотношения масла и целлюлозы в изоляционном промежутке

Следует подчеркнуть существенное различие между нормированием допустимого влагосодержания изоляции в «Объемах и нормах...» и Руководстве IEEE. (см.табл.)

Состояние изоляции	IEEE Std 62-1995		Объем и нормы испытания электрооборудования
	Влажность бумаги	Относительная влажность масла	
Сухое: при включении	0,5 – 1,0 %	< 5 %	2 %
В эксплуатации (нормальное)	< 2 %		< 4 %
Влажное	2 – 4 %	6 – 20	> 4 %
Чрезмерно влажное	> 4,5 %	> 30 %	

EPRI считает, что при повышении влажности витковой изоляции более 1 % существует опасность выделения пузырьков пара при перегрузке трансформатора

Выявление деформаций обмоток

Методы идентификации деформаций обмоток:

Относительное изменение реактанса рассеяния как следствие изменения диаметра обмоток и канала рассеяния при радиальной деформации (по опыту НИЦ - это наиболее эффективный метод выявления радиальных деформаций)

Относительное изменение емкости между обмотками как следствие изменения канала рассеяния при радиальной деформации

Метод низкочастотного импульса

Частотный анализ переходных функций (по мнению рабочей группы 12.19 СИГРЭ,

это наиболее чувствительный метод)

Частотный анализ импеданса рассеяния

Частотный анализ добавочных потерь от потока рассеяния (метод IREQ, Канада)

Развитие методологии диагностики. Концепция обслуживания по техническому состоянию

- Трансформатор представляется в виде ряда функциональных (под) систем, включающих соответствующие компоненты.
- Основной системы контроля и диагностики является функциональная модель дефектов, определяющая вероятные дефекты или чувствительные зоны в данной конструкции при данных условиях эксплуатации на базе анализа особенностей конструкции и анализа отказов в эксплуатации, и, соответственно, цели и задачи диагностики: что искать.
- Оценка состояния оборудования представляется в форме вопросника о состоянии его функциональных подсистем и возможности развития дефектного состояния в отказ.
- Программа технического обследования концентрируется на выявлении вероятных дефектов путем использования групп методов, характеризующих конкретный дефект. По меньшей мере, две диагностические процедуры требуются для того, чтобы подтвердить наличие дефекта и оценить его количественно. Следует учитывать взаимосвязь между различными методами, характеризующими дефект.

В настоящее время указанная концепция и соответствующим образом разработанная программа обследования состояния силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов внедряется в энергосистемах Украины.