

ДИАГНОСТИКА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ БЕЗ СНЯТИЯ РАБОЧЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Л.Г. Сидельников, А.М. Седунин, А.Ю. Сыкулев
ООО «ТестСервис», Пермь

Рассматриваются вопросы и проблемы в диагностике силовых трансформаторов без снятия рабочего напряжения. Отмечается многофакториальность задачи, необходимость разработки обобщенной функции качества и критериев оценки технического состояния. Основные положения и выводы получены на основании большого числа экспериментальных исследований выполненных на трансформаторах промышленных предприятий.

Характерной особенностью состояния основных фондов электроэнергетики в настоящее время является большое количество силового оборудования с истощенным нормативным ресурсом эксплуатации. В среднем по России это оборудование составляет (60-80)%. Вместе с тем, действительное техническое состояние оборудования, его физический износ и остаточный ресурс эксплуатации в основном не определены. Поэтому имеющееся сегодня мнение о большом физическом износе силового электрооборудования являются, по крайней мере, не обоснованным. Обновление основных фондов электроэнергетики, как правило, не превышает (3-5)% в год. Совершенно очевидно, что замена такого количества электрооборудования с истощенным ресурсом эксплуатации на новое оборудование в короткие сроки экономически и технически является невыполнимой задачей.

Кроме того, обновление основных фондов электроэнергетики, как показывает практика, вовсе не гарантирует решение проблемы по причине отсутствия в России эффективной системы по контролю качества монтажа вновь вводимых таких объектов и часто из-за низкого качества комплектующих или работ по монтажу. При этом следует иметь в виду, что нормативный ресурс эксплуатации в основном вдвое меньше, чем проектный ресурс, определенный разработчиком того или иного вида силового электрооборудования. Так, например, нормативный ресурс эксплуатации кабельных линий с бумажно-масляной изоляцией 25 лет, а проектный ресурс 50 лет. Это обстоятельство является основанием для выполнения экспертизы оборудования на предмет продления дальнейшего его срока службы с последующим параллельным плановым перевооружением электроэнергетики.

Методы контроля технического состояния объектов силовой энергетики делятся на контроль по предельным значениям параметров, определяемым ПТЭ, инструкциями, нормативами и контроль по текущим значениям параметров, на основании, которого выполняется диагностика технического состояния, прогнозирование остаточного ресурса, определение степени опасности дефектов и выработка экспертного заключения. Контроль по предельным значениям параметров не позволяет оценить качество текущего технического состояние объектов, а также динамику развития дефектов, но чаще всего используется в системах защиты и мониторинга. Динамику процесса развития дефектов и качество технического состояния можно определить только диагностическими методами.

Учитывая большое количество объектов энергетики с истощенным нормативным ресурсом, применение методов контроля по предельным значениям часто становится не допустимым. Диагностика, это разовое или периодическое обследование технического состояния объектов энергетики (тренд). Известно, что развитие дефектов (проблемных мест) до факта аварии в электрооборудовании во времени происходит достаточно медленно. Это время может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет. Поэтому в большинстве случаев необходимости в мониторинге нет.

В отличие от перечисленных методов контроля, диагностика является наукоемкой технологией. Для ее реализации необходима интеллектуальная дорогостоящая аппаратура и специалисты высокого уровня, как правило, имеющие ученые степени. Поэтому реально диагностика возможна только силами специализированных предприятий. Диагностика выполняется не разрушающими методами контроля и позволяет оценить техническое состояние объектов по совокупности параметров, определить динамику развития процессов, остаточный ресурс работы с имеющимися дефектами. Тренд на основании результатов диагностики исключает аварийные ситуации в период между диагностическими исследованиями.

Из-за высокой стоимости диагностической аппаратуры диагностика осуществляется, как правило, с помощью мобильных лабораторий. При наличии на предприятиях собственного диагностического оборудования и отсутствии необходимых для этого специалистов возможно сотрудничество с аналитическими подразделениями сторонних специализированных предприятий. Недостатком диагностики является в основном отсутствие утвержденных общероссийских нормативных документов. Сама по себе диагностика является новым для России научно-техническим направлением и потому находится в стадии развития. Несомненно, как инновационное направление, диагностика это будущее контроля технического состояния объектов электроэнергетики.

Общие вопросы диагностики силовых трансформаторов. При разработке методик расчета и исследований объектов силовой энергетики традиционное внимание уделяется анализу процессов в активных материалах, ферромагнитных и проводящих элементах конструкций. Значительно более редкими являются исследования изоляции. Вместе с тем, при эксплуатации объектов силовой электроэнергетики наибольшее число проблем возникает именно в изоляционных элементах конструкций, а не конструкциях включающих активные материалы. Выделение изоляции из числа активных материалов является в известной степени условным, при допущении, что свойства изоляции являются неизменными и не оказывающими влияние на процессы передачи или преобразования электрической энергии.

В конструкциях включающих активные материалы проблемы возникают, как правило, при аномальных воздействиях. Это нарушение прессовки магнитопроводов и креплений элементов обмоток при возникающих внезапных коротких замыканиях, изменение геометрии обмоток, а также отклонения параметров конструкций при выполняемых ремонтах. В изоляции процессы изменения свойств, без учета влияния электромагнитных полей, во времени идут достаточно медленно, месяцы и годы. И только на завершающем этапе, накануне пробоя, скорость изменения физических свойств изоляции резко возрастает. Задача диагностики изоляции заключается в определении текущего ее технического состояния. А также, степени опасности дефектов, времени принятия решений, закономерностей процессов, с целью прогнозирования остаточного ресурса эксплуатации.

Более сложными объектами электроэнергетики для диагностики, по сравнению со статическими объектами, кабельными линиями и воздушными линиями электропередач, являются силовые трансформаторы, трансформаторы тока, выключатели и электрические машины. В этих объектах наряду с диагностикой состояния изоляции необходимы исследования по целому ряду электромеханических характеристик. При этом возникают проблемы по оценке степени опасности того, или иного дефекта, по причине многофакторности задачи.

Результаты исследований НИЦ «ЭТЗ-Сервис» показывают, что наибольшее число проблем в силовых трансформаторах связано с нарушениями в работе систем охлаждения, вводов и нарушением уплотнений, около 40%. Распрессовка обмоток и магнитопроводов составляет порядка 10% и столько же нарушение характеристик масла. Вместе с тем, опыт исследований показывает, что более 70% дефектов может быть выявлен без отключения трансформаторов.

Для силовых трансформаторов имеются общеизвестные критерии оценки технического состояния, но они ориентированы на предельные значения измеряемых параметров. Например, при анализе содержания газов в трансформаторном масле пользуются нормативами предельно допустимых концентраций, а также отношениями этих концентраций, по которым на основании имеющегося опыта делаются выводы о предполагаемых дефектах. Несмотря на то, что по содержанию газов можно определить до 80% всех возможных дефектов в трансформаторе такой подход является приближенным и требует для анализа результатов специалиста высокой квалификации.

Кроме того, при оценке технического состояния трансформатора, только по маслу, отсутствует целевая функция (функция качества) учитывающая концентрации всех газов в комплексе, что не позволяет выполнить обоснованное прогнозирование развития проблем. Следовательно, такой вид измерений следует отнести к контрольным испытаниям, а не к диагностике, цель которой в комплексном анализе технического состояния и прогнозировании развития дефектов. В некоторой степени результат может быть улучшен на основе анализа специалиста эксперта. Тогда, на базе имеющегося опыта удастся получить приближенное диагностическое заключение о техническом состоянии масла.

Учитывая большое число параметров, по которым оценивается техническое состояние силового трансформатора, определение целевой функции, ее анализ являются чрезвычайно сложной задачей. В настоящее время ООО «ТестСервис» кроме анализа трансформаторного масла (включая анализ на продукты распада твердой изоляции), выполняет работы по: тепловизионному обследованию узлов трансформатора; вибродиагностике, с целью определения состояния магнитопровода и обмоток; измерению частичных разрядов электрическим методом и их локализации в пространстве акустическим методом. Все измерения и сбор данных производятся на работающем трансформаторе.

На основании полученных результатов, делается заключение о необходимости измерений на отключенном трансформаторе и, в крайнем случае, разборке трансформатора для визуального осмотра и измерений. Такая технология диагностики позволяет существенно снизить затраты на производство работ, обоснованно распределить ресурсы на техническое обслуживание, реализовать систему обслуживания по действительному техническому состоянию. В настоящее время все работы выполняются, в основном, на основании утвержденных на предприятиях планов планово-предупредительных работ, методик типовых испытаний и потому, учитывая большое количество трансформаторов с истощенным ресурсом эксплуатации, являются малоэффективными и затратными.

Все дефекты, возникающие в трансформаторе, носят случайный характер, поэтому для определения целевой функции (например, по маслу) необходимо иметь большое число статистических данных. Для объектов энергетики такого типа целевая функция может быть многоуровневой

$$F = F(Q_1, Q_2, \dots, Q_n),$$

где Q_1, Q_2, \dots, Q_n - целевые функции по отдельным физическим явлениям или элементам конструкций. Например: по маслу, частичным разрядам, вибрационным параметрам, температуре и т.п.

Описанный подход в анализе результатов диагностики позволит максимально автоматизировать выработку заключений по техническому состоянию объектов энергетики и в основном исключить влияние человеческого фактора уникальных в этом деле специалистов. Для формализации методов диагностики, с целью разработки технологических инструкций и стандартов, критериев оценки технического состояния и остаточного ресурса, необходим достаточный объем статистических данных. На основании полученных результатов, их анализа разрабатываются алгоритмы и программное обеспечение, для автоматизации контроля технического состояния объектов.

Диагностики силового маслонаполненного трансформатора.

В настоящее время существует достаточно много трансформаторов по типу исполнения и конструкциям, но наиболее распространенными в практике эксплуатации по-прежнему являются силовые маслонаполненные трансформаторы. Для описания технологии производства диагностических испытаний трансформаторов, принятой в ООО «ТестСервис», г. Пермь, можно рассмотреть конкретный пример. Результаты диагностических испытаний оформляются в виде технического отчета, который начинается с общего заключения объекта по всем видам испытаний.

Основные требования к заключению по диагностике силового маслонаполненного трансформатора.

Заключение о техническом состоянии трансформатора должно быть максимально формализовано, с целью возможности формирования базы данных технического состояния на электронных носителях, создания системы управления обслуживанием по техническому состоянию. База данных имеет общие для всех диагностических испытаний разделы или позиции, а также приложения с информацией о последних и предыдущих результатах диагностик. Структурно заключение имеет вид, представленный ниже.

Заключение.

Дата: _xxxxxxxxxxxxxxxxx _____

Предприятие: _xxxxxxxxxxxxxxxxx _____

Электроустановка: _____ ГПП-1

Диспетчерское наименование: _____ Тр. №2

Тип трансформатора: _____ ТДНГ-25000/110/10

Дополнительно может быть представлена информация о дате ввода трансформатора в работу, заводе изготовителе, выполненных ремонтах, характерных проблемах в эксплуатации.

Результаты анализа масла из бака трансформатора.

По данным физико-химического анализа масло не соответствует нормам эксплуатации по влагосодержанию и содержанию растворимых в воде кислот и щелочей. По данным хроматографического анализа растворенных газов трансформаторное масло не соответствует нормам эксплуатации по содержанию метана, этана, этилена и двуокиси углерода, РД 153-34.0-46.302-00.

Прогнозируется наличие дефекта термического характера, в диапазоне высоких температур, затрагивающего твердую изоляцию. По содержанию фурановых соединений трансформаторное масло соответствует нормам, РД 34.45-51.399-97.

Результаты тепловизионного обследования и визуального контроля.

При обследовании были обнаружены локальные нагревы бака трансформатора. Работы выполнялись в соответствии с РД 34.51.300-97, «Объемы и нормы испытаний электрооборудования» и РД 153-34.363-99, «Методика инфракрасной диагностики электрооборудования». Дефект термического характера подтверждается результатами хроматографического анализа растворенных газов. Кроме того, было установлено нарушение циркуляции масла в двух радиаторах системы охлаждения.

Измерение частичных разрядов.

В шине заземления отмечено наличие в баке трансформатора частичных разрядов в акустическом и электромагнитном спектре. Измерение разрядов в шине заземления исключает подключение датчиков к высоковольтным вводам трансформатора, что невозможно при диагностике без снятия рабочего напряжения. Возникновение разрядов во всех фазах одновременно практически невозможно.

Диагностика качества прессовки активных материалов.

Состояние прессовки магнитопровода трансформатора, в приведенном примере - хорошее. Состояние прессовки обмоток – хорошее. Общее состояние активной части трансформатора по параметрам вибрации – хорошее. Оценка состояния прессовки

магнитопровода и обмоток трансформатора осуществляется по методике разработанной производителем аппаратуры, с помощью имеющегося программного обеспечения.

Рекомендации.

Для определения причин локальных нагревов трансформатора и неудовлетворительных результатов хроматографического анализа, растворенных газов требуется вскрытие и внутренний осмотр трансформатора. Возможные причины дефектов: горячая точка в сердечнике; перегрев меди из-за вихревых токов, плохие контакты; циркулирующие токи в сердечнике или баке.

Для контроля тепловых процессов и скорости изменения концентрации газов в масле, необходимо не реже одного раза в 4 месяца отбирать пробу масла. Для выполнения хроматографии необходимо измерение нагрузки, температуры масла, а также повторное тепловизионное обследование, при максимальной нагрузке.

Необходимо восстановить работу радиаторов системы охлаждения. Для восстановления эксплуатационных свойств масла рекомендуется заменить адсорбент в термосифонном фильтре и провести регенерацию трансформаторного масла. *При наличии обнаруженных дефектов дальнейшая эксплуатация трансформатора не рекомендуется.*

В заключении пока отсутствует ранжирование по степени опасности дефектов, времени их устранения и последующих действиях. Кроме того, нет информации о необходимых материальных затратах для устранения дефектов, что необходимо для планирования работ.

Приведенное заключение требует разборки трансформатора для уточнения вида дефекта и его места положения. Эти работы входят в перечень капитального ремонта. Однако, как показывает практика диагностики, такие заключения о техническом состоянии достаточно редки. В основном по результатам диагностики требуются работы исключающие разборку трансформатора. К ним относятся: ревизия внешних контактных соединений, регенерация или дегазация масла; диагностика высоковольтных вводов и регулятора напряжения, РПН; ревизия масляных радиаторов и т.п.

Полученные результаты диагностики оформляются единым отчетом технической диагностики оборудования с анализом, выводами и рекомендациями. Результаты диагностики позволяют оценить состояние трансформатора, выявить недостатки, наметить пути их устранения. Данные диагностики могут быть использованы в дальнейшем для контроля работы трансформатора.

Общие положения.

Комплекс методов, используемых в диагностике силовых трансформаторов, обоснован следующими нормативными документами:

1. РД 34.45-51.300-97. Объемы и нормы испытаний электрооборудования./ ЭНАС, Москва, 1988 год;
2. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле./ ДСРиНТП РАО "ЕЭС России", Москва, 2000 год;
3. РД 153-34.0-20.363-99. Методика инфракрасной диагностики электрооборудования./ ДСРиНТП РАО "ЕЭС России", Москва, 1999 год.

В число методов диагностики силовых трансформаторов входят:

- сравнительный анализ результатов хроматографического содержания газов растворенных в масле трансформатора;
- физико-химический анализ масла;
- хроматографический анализ фурановых производных в масле;
- тепловизионное обследование узлов и элементов конструкций трансформатора;
- измерение частичных разрядов;
- измерение вибропараметров.

Применяемые измерительные приборы.

При производстве работ использовались следующие приборы и оборудование:

- для сравнительного анализа газов, используются данные, полученные на аппаратно-программном комплексе, включающем хроматограф серии "Хроматэк-Кристалл";
- для анализа фурановых производных используется хроматограф «Милихром А-02»;
- профессиональная камера инфракрасного контроля Thermo Tracer TH 7800 фирмы «NEC» (тепловизор) для визуализации и дистанционного измерения температур с архивацией данных измерения;
- для обследования бака трансформатора на наличие частичных разрядов применяется аппаратура AR700 производства ПВФ «Виброцентр», г. Пермь;
- измерение вибропараметров осуществляется аппаратурой «Диана-2М» производства ПВФ «Виброцентр», г. Пермь.

Порядок выполнения работ.

Перед началом работ производится сбор информации по выполненным ремонтам, авариям, особенностям работы и эксплуатации трансформатора. Порядок выполнения работ следующий:

- отбор масла из бака трансформатора;
- тепловизионное обследование узлов трансформатора;
- измерение частичных разрядов в нулевом проводе трансформатора;
- измерение частичных разрядов акустическим методом;
- измерение вибрационных характеристик;
- анализ результатов измерений и экспертиза технического состояния;
- оформление технического отчета.

Применяемые методы диагностических исследований силовых трансформаторов без снятия рабочего напряжения не являются единственно возможными. Методы не охватывают такие важные исследования, как диагностика вводов и регуляторов напряжения, РПН. В настоящее время ведутся работы по охвату исследованиями возможно большего числа элементов конструкции трансформаторов. Среди перспективных следует считать, например, измерения разрядов во вводах дистанционно, с использованием измерителей электромагнитного излучения. В связи с заменой существующих вводов на перспективные новые полимерные конструкции, существенно возросла их надежность. И на первый план, из не исследуемых узлов под рабочим напряжением, выходит проблема диагностики РПН.

Экспертиза.

Казалось бы, нет необходимости давать определение понятию экспертиза. Однако это не так. Программное и математическое обеспечение диагностической аппаратуры условно можно разделить на два уровня. Первым из них реализуется сам метод, например метод частичных разрядов, метод возвратного напряжения и т.д. В зависимости от степени реализации аппаратура может быть индикаторной, релейной или измерительной. Измерительная аппаратура позволяет не только измерять тот или иной параметр, но и нормировать измеряемые величины по степени опасности дефектов в объекте. Такая аппаратура стоит дорого и часто имеет уникальные технические возможности.

Второй уровень программного и математического обеспечения предназначен для анализа получаемых результатов, поэтому имеет критерии оценки, базу данных, алгоритмы анализа. Алгоритмы анализа часто многофакториальные, наукоемкие и являются результатами научных работ. Тем не менее, без участия специалистов высокого уровня такая аппаратура не способна автоматически «сделать» правильное заключение о техническом состоянии объекта. Поэтому эти специалисты называются экспертами, а выполняемая ими работа экспертизой. И таких специалистов в стране единицы.

На основании чего специалист-эксперт делает заключение. Если это научно-обоснованные выводы, то это экспертиза высочайшего класса. Но в большинстве случаев заключение формулируется на основании большого практического опыта, эрудиции, интуиции, либо других одному ему (эксперту) известных внутренних ощущений. Таких экспертов большинство. Диагностика находится на этапе развития, но только этот вид

контроля дает основание для развития математического и программного обеспечения второго уровня.

Для создания автоматизированных систем технического состояния электроэнергетики необходима база технического состояния объектов, например, силовых трансформаторов. Наличие технических отчетов только на бумажных носителях не позволяет эффективно реализовать обслуживание по техническому состоянию из-за большого объема имеющейся информации. Решение задачи, можно, рассматривать по следующим основным направлениям:

- определение действительного технического состояния объектов силовой электроэнергетики диагностическими методами;
- анализ и определение количества объектов подлежащих замене (или ремонту);
- восстановление эксплуатируемого оборудования до требуемых параметров;
- планирование развития силовой электроэнергетики и реализация этих планов.

Все виды силового электрооборудования, по времени ввода в эксплуатацию и текущему техническому состоянию можно разделить:

- на вновь вводимое в эксплуатацию оборудование, подлежащее диагностике технического состояния и испытаниям;
- со сроком эксплуатации меньше нормативного ресурса, где также требуется анализ технического состояния;
- со сроком эксплуатации больше нормативного ресурса;
- оборудование, находящееся в аварийном состоянии.

Важным моментом при налаживании системы обслуживания по техническому состоянию является создание базы данных. Наличие базы данных технического состояния объектов позволяет автоматизировать процесс технического обслуживания и иметь оперативную информацию по каждому объекту.

В настоящее время существует два основных подхода по формированию базы данных. Первый из них, наиболее распространенный в России и за рубежом, основан на создании базы типовых или наиболее встречающихся дефектов в электрооборудовании с указанием характерных для каждого случая признаков. Например, для изоляции это могут быть графические представления разрядов и их основные характеристики (частотный спектр, амплитуда, количество за единицу времени и т.п.). Здесь же приводится информация о возможном в этом случае дефекте или дефектах (информацию получают путем препарирования места дефекта и изучения визуально или с помощью микроскопа). В последствии производится сравнение очередного дефекта с этой базой и делается соответствующий вывод.

Второй подход формирования базы данных основан на определении закономерностей характеристик дефектов, с использованием аппарата теории вероятности и математической статистики. Получаемая в этом случае база данных содержит текущее техническое состояние объектов энергетики, с указанием степени опасности дефектов и рекомендаций по последующим действиям. Кроме этого такая база содержит критерии оценки характеристик, рекомендуемое время устранения дефектов и технологию экспертного заключения, а также необходимые затраты на устранение этих дефектов.

Из сравнения двух этих подходов очевидно, что в первом из них требуются большие материальные и временные затраты на создание базы. Кроме того, большое разнообразие возможных дефектов снижает быстроедействие системы технического обслуживания, а заключение о возможной причине дефекта страдает не точностью и часто приводит к ошибкам. Однако изучение каждого дефекта дает ценную информацию по совершенствованию технологий монтажа, качеству работ технического обслуживания и в конечном итоге сокращению аварийных ситуаций.

Естественно, что второй подход по сравнению с первым подходом формирования базы данных отличается высокой наукоемкостью и требует для реализации специалистов высокого класса. Недостатком подхода является отсутствие информации о причинах

дефектов. Вместе с тем, в процессе устранения дефекта ремонтный персонал имеет возможность его визуального изучения и, следовательно, получения информации о причинах его возникновения. Для исключения этих причин в каждом случае необходимо осуществление ряда организационных и технических мероприятий, что является обязательным для фирм занимающихся техническим обслуживанием и ремонтом электрооборудования. Соблюдение этого правила также в конечном итоге ведет к сокращению числа неконтролируемых аварий.

Несомненным достоинством второго подхода является значительно более высокая точность заключения о техническом состоянии объекта, а также сокращение количества возможных экспертных ошибок. Второй подход формирования базы позволяет оценить ситуацию во времени и позволяет построить систему обслуживания энергетики по техническому состоянию. Учитывая высокую наукоемкость технологии второго подхода эту работу целесообразно выполнять специализированным фирмам.

Следует отметить, что надежда фирм эксплуатирующих силовую энергетику на математическое и программное обеспечение приобретаемых приборов и оборудования в настоящее время лишена основания. Как правило, в диагностической аппаратуре производства отечественных и зарубежных фирм хорошо реализован (не всегда) только сам метод диагностики, а программное обеспечение для анализа получаемых результатов отсутствует. Отдельные виды диагностической аппаратуры имеют в той или иной мере программное обеспечение для анализа результатов измерений, но отличаются при этом высокой стоимостью и часто субъективностью решений.