ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗОЛЯЦИИ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ДИАГНОСТИКЕ ПОДСТАНЦИЙ

ОТОЗВАНА 10.09.2019 RETRACTED 10.09.2019

Т.А. Стрижова
к.т.н., доцент кафедры электротехники и электромеханики
Горный университет, г. Санкт-Петербург

Силовой трансформатор, диагностика оборудования, испытания, изоляция, пробивное напряжение, кислотное число

The power transformer, diagnosis of the equipment, test, isolation, breakdown voltage, acid number

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 в конструкциях, включающих активные материалы. Выделение изоляции из числа активных материалов объяснимо тем, что свойства изоляции являются неизменными и не оказывают влияния 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. И только на завершающем этапе, накануне пробоя, скорость изменения физических свойств изоляции резко возрастает. Задача диагностики изоляции заключается в определении технического текущего состояния изоляции, а также степени опасности дефектов, времени принятия решений, закономерностей процессов с целью прогнозирования остаточного ресурса эксплуатации оборудования.

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 ха-

рактеристик. При этом возникают проблемы по оценке степени опасности того или иного дефекта по причине многофакторности задачи. В такой ситуации диагностика состояния изоляции трансформатора в условиях многофакторной целевой функции является весьма актуальной задачей [1].

Результаты исследований [2, 3, 4] 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%, столько же – нарушение характеристик масла. Вместе с тем, опыт исследований показывает, что более 70% дефектов может быть выявлено 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 – комплексный анализ технического состояния и прогнозирование развития дефектов. В некоторой степени результат может быть улучшен на основе анализа специалиста-эксперта. Тогда на базе имеющегося опыта удаётся получить приближённое диагностическое заключение о техническом состоянии масла.

Учитывая большое число параметров, по которым оценивается техническое состояние силового трансформатора, определение целевой функции и её анализ являются чрезвычайно сложной задачей. В этой связи актуальным становится вопрос о создании математической модели диагностики технического состояния силового трансформатора и определение целевой функции оптимизации показателей качества.

В настоящее время кроме анализа трансформаторного масла (включая анализ на продукты распада твердой изоляции) выполняют работы по тепловизионному обследованию узлов трансформатора [5, 6], измерению частотных 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 отключённом 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, как правило, на основании утверждённых на предприятиях графиков планово-предупредительных работ, методик типовых испытаний и потому, учитывая большое количество трансформаторов с исчерпанным 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. В этой связи возникает необходимость в определении физико-химического анализа трансформаторного масла и определении степени опасности дефектов.

Методы контроля технического состояния объектов силовой энергетики делятся на контроль по предельным значениям параметров, определяемым ГТГЭ, инструкциями, нормативами, и контроль по текущим значениям параметров, на основании которого выполняются 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 состояния 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

ОТОЗВАНА 10.09.2019 RETRACTED 10.09.2019

большое количество объектов энергетики с исчерпанным нормативным ресурсом, применение методов контроля по предельным значениям часто становится недопустимым.

В отличие от перечисленных методов контроля диагностика является наукоёмкой технологией. Для её реализации необходимы интеллектуальная дорогостоящая аппаратура и специалисты высокого уровня. Поэтому реально диагностика возможна только силами специализированных предприятий. Диагностика выполняется неразрушающими методами контроля и позволяет оценить техническое состояние объектов по совокупности параметров, определить динамику развития процессов, остаточный ресурс работы с имеющимися дефектами. На основании результатов диагностики исключаются аварийные ситуации в период между диагностическими исследованиями.

Нами рассмотрена взаимосвязь полного физико-химического анализа и тепловизионного обследования (рис.1). Показано, как провести начальную диагностику развития дефектов на основе хроматографического анализа.

Рассмотрим каждое испытание отдельно с целью определения достоверности результатов.

1) Анализ масла из бака трансформатора рекомендуется начинать с испытания на влагосодержание. По методике проводились 2 измерения. Результатом испытания считается среднее арифметическое между двумя анализами (X), расхождение между которыми не должно превышать $0{,}60\sqrt{X}$ (табл.1).

Результат анализа можно считать достоверным при 0,2<1,05.

2) Пробивное напряжение.

После получения шести значений пробивного напряжения (78,77,78,78,77,78) выводим среднее арифметическое значение по формуле:

$$U_{пр.} = 1/n \sum U_{пр.i}, \quad (1)$$

где $U_{пр.}$ – пробивное напряжения трансформаторного масла, кВ;

$U_{пр.i}$ – пробивное напряжение трансформаторного масла i-го испытания;

n –количество испытаний.

Получаем $U_{пр.}$=(78+77+78+78+77+78)/6=77,7 кВ и округляем до целого числа – $U_{пр.}$=78 кВ.

Проверим получившийся результат на достоверность. Для этого рассчитаем σ_u – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения пробивного напряжения

$$\sigma_u = \sqrt{\sum(U_{пр.}i - U_{пр.})^2/n(n-1)} \quad (2)$$

$$\sigma_u = 0{,}25$$

Затем рассчитаем коэффициент вариации V по формуле :

$$C_V = \sigma_u \cdot 100/U_{пр.} \quad (3)$$

$$C_V = 0{,}32\ \%$$

Коэффициент вариации не превышает 20%.

ОТОЗВАНА 10.09.2019 RETRACTED 10.09.2019

Рисунок 1– Взаимосвязь различных видов испытаний оборудования подстанций

Таблица 1 – Обработка результатов испытания на влагосодержание

Дата	Оборудование	Результат первого анализа (X_1)	Результат второго анализа (X_2)	Расхождение X_1-X_2	Среднее значение (X) $\frac{X_1+X_2}{2}$	Значение 0,6√X
13.05.14	АТ-1,бак ф.«А»	3,2 г/т	3,0 г/т	0,2	3,1 г/т	1,05

Результат можно считать достоверным.

3) Кислотное число.

Результатом испытания считается среднее арифметическое между двумя анализами, которое является достоверным, если расхождение между ними не превышает 0,08 (табл. 2).

Таблица 2 – Обработка результатов испытания на кислотное число

Дата	Оборудование	Результат первого анализа (X_1)	Результат второго анализа (X_2)	Расхождение X_1-X_2	Среднее значение (X) $\frac{X_1+X_2}{2}$
13.05.2014	АТ-1,бак ф.«А»	0,003	0,003	0	0,003

4) Температура вспышки в закрытом тигле .

За результат испытания принимают среднее арифметическое не менее двух последовательных определений температуры вспышки $T_{вс.}$. Результат считается достоверным (табл. 3), если

$$T_{вс.макс.} - T_{вс.мин} < 6. \quad (4)$$

Расхождение между испытаниями не превышает 6 и результат считается достоверным.

По результатам испытаний, внесённых в карты, построим график (рис. 2), на котором хорошо прослеживаются изменения по всем параметрам.

Таблица 3 – Обработка результатов определения $T_{вс}$

Дата	Оборудование	Результат первого измерения (X_1)	Результат второго измерения (X_2)	Расхождение X_1-X_2	Среднее значение(X) $\frac{X_1-X_2}{2}$
13.05.2014	АТ-1,бак ф.«А»	141	139	2	140

На графике хорошо видно, что значительных изменений в трансформаторном масле по основным параметрам не произошло. Кроме этого, прослеживается зависимость пробивного напряжения от влагосодержания: чем больше увлажнено масло, тем ниже пробой.

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

Выводы

Сравнительный анализ результатов полного физико-химического анализа изоляции силовых трансформаторов ОРУ-750 кВ ПС «Ленинградская», приведённых в таблицах, показывает, что при диагностике прослеживается зависимость пробивного напряжения от влагосодержания.

ОТОЗВАНА 10.09.2019 RETRACTED 10.09.2019

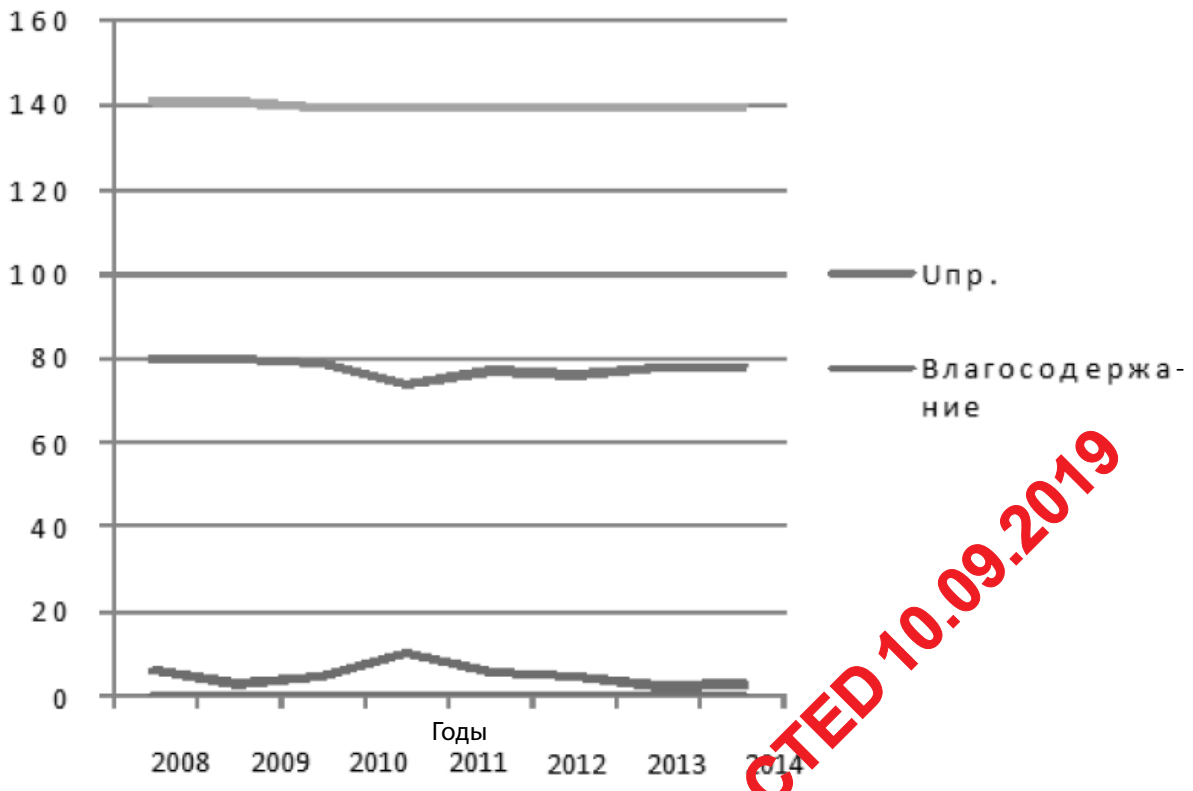

Рисунок 2 – Результаты испытаний физико-химического анализа

ОТОЗВАНА 10.09.2019 RETRACTED 10.09.2019

Чем больше увлажнено масло, тем ниже пробой. Кроме того, как показали расчеты, погрешность предлагаемого метода при использовании одного члена ряда не превышает 4%, а при увеличении их числа достигается любая, заранее заданная точность. Результаты испытания считаются достоверными, если расхождение между испытаниями не превышает 0,08.

Литература

1. РД 34.45-51.300-97 Объем и нормы испытаний электрооборудования [Текст] – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2007. – 587 с.

2. Попов, Г.В. Экспертная поддержка при диагностике состояния силовых трансформаторов [Текст] / Г.В. Попов, А.В. Ватлецов, С.С. Аль-Хамри // Электротехника. – 2003. – № 8. – С. 5–11.

3. Стрижова, Т.А. Электрическая прочность маслобарьерной изоляции силового трансформатора [Текст]/ Т.А. Стрижова, Н.М. Олейникова // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://web.snauka.ru/issues/2015/01/46110.

4. Алексеев, Б.Л. Контроль состояния крупных силовых трансформаторов [Текст] / Б.Л. Алексеев. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.

5. Завидей, В.И. Возможности применения тепловизионного контроля для диагностики технического состояния силовых трансформаторов [Текст] / В.И. Завидей, В.И. Печенкин, С.В. Каланчин // Энергоэксперт. – 2011. – № 6. – С. 64-68.

6. Генин, В.С. Диагностический мониторинг в распределительных сетях [Текст] / В.С. Генин, В.В. Козлов, С.О. Фельдман // Электротехника. – 2015. – № 2. – С. 35–40.

References

1. RD 34.45-51.300-97 Ob#em i normy ispytanij jelektrooborudovanija [Tekst] – M.: Izdatel'stvo NC JeNAS, 2007. – 587 s.

2. Popov, G.V. Jekspertnaja podderzhka pri diagnostike sostojanija silovyh transformatorov [Tekst] / G.V. Popov, A.V. Vatlecov, S.S. Al'-Hamri // Jelektrotehnika. – 2003. – № 8. – S. 5–11.

ОТОЗВАНА 10.09.2019 RETRACTED 10.09.2019

3. Strizhova, T.A. Jelektricheskaja prochnost' maslobar'ernoj izoljacii silovogo transformatora [Tekst]/ T.A. Strizhova, A.M. Olejnikova // Sovremennye nauchnye issledovanija i innovacii. – 2015. – № 1. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://web.snauka.ru/issues/2015/01/46110.

4. Alekseev, B.L. Kontrol' sostojanija krupnyh silovyh transformatorov [Tekst] / B.L. Alekseev. – M.: Izdatel'stvo NC JeNAS, 2002. – 216 s.

5. Zavidej, V.I. Vozmozhnosti primenenija teplovizionnogo kontrolja dlja diagnostiki tehnicheskogo sostojanija silovyh transformatorov [Tekst] / V.I. Zavidej, V.I. Pechenkin, S.V. Kalanchin // Jenergojekspert. – 2011. – № 6. – S. 64-68.

6. Genin, V.S. Diagnosticheskij monitoring v raspredelitel'nyh setjah [Tekst] / V.S. Genin, V.V. Kozlov, S.O. Fel'dman // Jelektrotehnika. – 2015. – № 2. – S. 35–40.

ОБЪЯВЛЕНИЕ

В издательстве ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА в 2015 г. вышла монография «Совершенствование зерноуборочного комбайна: конструктивная компоновка, теория и расчёт. Часть 1» / В.А. Николаев.

В части 1 монографии показана конструктивная компоновка новых зерноуборочных комбайнов, рассмотрены теоретические проблемы, связанные с их расчётом, произведён расчёт жатки, наклонного транспортёра, устройства извлечения зерновок из колосьев, верхнего диаметрального вентилятора. В части 2 будут исследованы: сепарация зернового вороха, сушка зерна в комбайне и другие процессы.

Монография предназначена для научных работников, аспирантов, студентов агроинженерных специальностей и специалистов сельского хозяйства.

Монография содержит: 124 рисунка, 6 таблиц, в списке литературы 8 наименований.

УДК 621.436.018; ББК 40.722;
ISBN 978-5-98914-144-9; 252 стр. (твёрдый переплет)

ПО ВОПРОСАМ ПРИОБРЕТЕНИЯ ОБРАЩАТЬСЯ ПО АДРЕСУ:
150042, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, 58,
ФГБОУ ВО Ярославская ГСХА
e-mail: vlv@yarcx.ru