

УДК 621.314.22.6

**ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ****Л. М. Рыбаков, Н. Л. Макарова***Марийский государственный университет, Йошкар-Ола*

Рассмотрено состояние вопросов диагностирования силовых трансформаторов высших классов напряжений, разработанных как в нашей стране, так и за рубежом. Показаны их недостатки и дальнейшее направление совершенствования методов и средств диагностирования.

The problem of high voltage power transformer diagnosis developed in this country and abroad has been reviewed. Their weaknesses and future ways of improving the methods and means of diagnostics are shown.

*Ключевые слова:* Диагностирование, силовой трансформатор, экспертная система, электромагнитная совместимость, частичные разряды, вибродиагностика, высокочастотные электромагнитные сигналы.

В последние годы в энергетике наметилась тенденция к переходу от системы планово-предупредительных ремонтов (ППР) к ремонту по действительному техническому состоянию электрооборудования. Опыт эксплуатации силовых трансформаторов показывает, что проведение ППР без предварительного комплексного исследования не оправдало себя, так как приводит к существенным материальным затратам и в ряде случаев к ухудшению характеристик изоляции. Существующие нормативные документы [4] контроля состояния изоляции трансформаторов в процессе эксплуатации не отражают истинного состояния трансформатора и поэтому нужен перечень дополнительных контролируемых параметров, эффективных для диагностирования электрооборудования, находящегося под напряжением, позволяющих оценить состояние силового трансформатора как сложной технической системы с учетом всех узлов.

В настоящее время разрабатываются и внедряются в эксплуатацию автоматизированные системы диагностирования силовых трансформаторов, что вызвано продлением эксплуатации трансформаторов, отработавших свой нормативный срок службы. Доля трансформаторов, находящихся в эксплуатации более 25 лет в России, составляет 40 %, а в США – 60 % [2]. Опыт эксплуатации показывает, что по окончании нормативного срока службы значительная часть трансформаторов сохраняет работоспособность при проведении своевременного ремонта и обслуживания на основании результатов качественного диагностирования. Согласно нормативным документам, величина срока службы устанавливается на основании возможного теплового износа витковой изоляции без учета воздействия других факторов (ток, нагрузки, температура, окружающей среды, системы охлаждения). Известно, что изоляция силовых трансформаторов в основном выполнена на ос-

нове целлюлозы, на которую значительное влияние оказывают величина тока нагрузки трансформатора, качество масла, тип защиты масла от окисления, наличие термосифонных фильтров, системы охлаждения трансформатора, особенности конструкции и другие факторы. Наряду с изоляцией стареет и магнитная система, что проявляется, в частности, в увеличении потерь холостого хода. Для обеспечения работоспособности силовых трансформаторов, отработавших свой нормативный срок службы и перешедших в разряд изношенного, электрооборудования необходимо выполнить следующее [5]:

- 1) улучшать защиту трансформатора от перенапряжений и воздействия токов КЗ;
- 2) следить за тепловой нагрузкой в процессе эксплуатации;
- 3) использовать современную защиту от увлажнения;
- 4) применять улучшенные абсорбционные фильтры;
- 5) совершенствовать систему охлаждения;
- 6) выявлять и устранять потенциальные очаги повышенного нагрева;
- 7) периодически удалять из масла продукты старения и увлажнения;
- 8) повышать надежность работы вводов и РПН;
- 9) совершенствовать систему диагностирования.

Методы и средства диагностирования постоянно совершенствуются, например, в [5] приведены новые методы и средства диагностирования, не вошедшие в перечень [4]: диагностирование деформации обмоток силовых трансформаторов, диагностика усилия прессовки обмоток и магнитопровода трансформатора. В литературе [3] предложена идея использования нелинейной виброакустической диагностики, которая позволит диагностировать состояние изоляции (оценить ее старение) во время эксплуатации.

Таким образом, диагностика технического состояния силовых трансформаторов позволяет своевременно предупредить возникновение аварийных ситуаций, значительно снизить затраты на ремонты, оценить действительное состояние электрооборудования и определить запас его работоспособности.

Анализ отечественных литературных источников показывает, что у нас отсутствует комплексная система диагностирования силовых трансформаторов высших классов напряжения. Имеются разработки различных фирм и институтов по оцениванию состояния отдельных узлов и элементов силовых трансформаторов (вводы, РПН, система охлаждения, трансформаторное масло).

За рубежом в настоящее время находят широкое применение комплексные системы непрерывного контроля состояния силовых трансформаторов. Например, в США разработана система контроля состояния силовых трансформаторов *TPAS* [7, 8], предназначенная для выявления максимально возможного числа вида дефектов на ранней стадии их возникновения. Система *TPAS* разработана для выявления возникающих при работе трансформатора дефектов типа частичных пробоев изоляции, ослабление механической прочности из-за коротких замыканий, появление точек перегрева в обмотке и сердечнике, повреждение комплектующих узлов – устройств РПН и вводов. Системой через короткие промежутки времени контролируются наиболее важные параметры, отражающие состояние трансформатора.

Кроме датчиков, контролирующая эти параметры система использует измерительные трансформаторы тока и напряжения для контроля режима работы, датчики положения устройств РПН, включения и отключения вентиляторов и насосов.

В системе *TPAS* производится краткосрочный и долгосрочный анализы данных измерений. Краткосрочный анализ использует поминутные измерения – прогноз делается адаптивной моделью. Применение адаптивной модели позволяет приспособить систему к любому конкретному трансформатору.

Тенденция к изменению проявляется уже в начальной стадии развития дефектов в трансформаторе, при их выявлении можно провести корректирующие мероприятия, прежде чем наступит повреждение.

В [1] приведена система *Siemens* непрерывного контроля состояния трансформаторов с широким применением стандартных вычислительных средств, позволяющих обработать измеряемые датчиками сигналы, выполнить их анализ, осуществить для персонала изображение и выдать предупреждения об опасных режимах. Модульный принцип с отдельной их заменой и использование стандартных интерфейсов обеспечивают большую гибкость системы, приспособляемость ее вариантов к требованиям заказчика.

Система включает комплект датчиков, аналого-цифровые преобразователи и компьютерную часть. Система выполняется в двух вариантах. В первом варианте вся

система, то есть аппаратура обработки данных и персональный компьютер, размещены в одном шкафу, который монтируется непосредственно на трансформаторе. Чтобы противостоять климатическим воздействиям (в зависимости от места установки), шкаф снабжается системами охлаждения и подогрева, включаемыми в зависимости от температуры и влажности в шкафу. Указанные типы контроля, укомплектованные в отдельных шкафах, прикрепленных к трансформатору, оказались неработоспособными из-за недостаточной защиты шкафа от электромагнитных помех и недостаточной разработки вопроса электромагнитной совместимости.

Во втором варианте на баке трансформатора располагается только аппаратура приема и обработки данных. Персональный компьютер стандартного исполнения находится в здании пункта управления. Модули аналого-цифрового преобразователя разных групп датчиков соединены между собой и персональным компьютером, интерфейсами.

С помощью компьютера производятся: обработка данных, запоминание и оценка результатов измерений и, кроме того, осуществляется связь с внешними системами. Для обработки и архивирования данных применен промышленный компьютер, рассчитанный на длительную непрерывную работу. Указанная система также требует дополнительной защиты от электромагнитных помех и должна иметь несколько ступеней электромагнитной совместимости.

Непрерывный контроль состояния трансформатора позволяет привязывать профилактические мероприятия к появлению конкретных дефектов в трансформаторе, либо к аномальностям режима его работы. Это дает возможность увеличивать время между ревизиями, сократить число измерений на трансформаторе, требующих отключение от сети. Эти измерения, а также фиксация времени включения и отключения насосов и вентиляторов, определяющая продолжительность их работы, и позволяют проводить профилактику по состоянию этих элементов трансформатора.

Зарубежный опыт разработки системы непрерывного контроля силовых трансформаторов показывает, что для них присущи общие черты описанных систем. В указанных системах производится непрерывное измерение следующих параметров: нагрузка трансформатора, температура верхних слоев масла, температура бака и окружающего воздуха, растворенные газы и влажность масла, вибрация бака, перенапряжения и токи КЗ в каждой фазе, контролируется срабатывание газового реле, реле перегрузки и режим работы охладителей. Для оценки состояния трансформатора используется сравнение измеряемой величины с полученной на моделях. Сбор и обработка данных производятся специальной системой, позволяющей обрабатывать и отображать данные непрерывного контроля аналоговых и дискретных сигналов. Результаты непрерывного контроля отображаются на мониторе ПЭВМ, при отклонениях от нормы подается сигнал обслуживающему

персоналу. Общее для всех зарубежных систем стремление – выявить максимальное количество дефектов на ранней стадии их развития непосредственно на месте работы. Однако для выявления дефектов на ранней стадии их возникновения необходимо проследить за физико-химическими процессами, протекающими в узлах и аппаратах и в изоляционных системах в короткие промежутки времени. Для регистрации указанных быстротекущих изменений на ранней стадии их возникновения нужны высокочувствительные приборы, регистрирующие разные физико-химические параметры.

Зарубежный опыт создания и эксплуатация систем непрерывного контроля состояния электрооборудования особенно важны в настоящее время для оценки состояния длительно работающих отечественных трансформаторов в целях обоснования их дальнейшей эксплуатации на наших энергопредприятиях. Однако в зарубежных разработках нигде не указана стоимость затрат на изготовление, эксплуатацию и ремонт системы непрерывного контроля силовых трансформаторов. Здесь также необходимо учитывать класс напряжения, мощность трансформатора, их месторасположение и вид обслуживания.

В настоящее время в России разработаны несколько экспертно-диагностических систем. Кратко проанализируем указанные системы.

Экспертно-диагностическая система для силовых трансформаторов Нурекской ГЭС разрабатывалась во ВНИИЭ. Минимальный объем вводимой в файлы базы данных (БД) системы информации следующий: паспортные данные трансформатора, результаты ХАРГ (хроматографический анализ растворенных в масле газов) и анализа его физических и химических характеристик, результаты контроля состояния изоляции.

На базе разработок ВНИИЭ и ОРГРЭС, в частности, осуществлена экспертная система диагностики как часть прототипа интеллектуальной системы принятия решений в объединенном информационном пространстве электростанции. Система непрерывного контроля и диагностическая экспертная система обслуживают все основное оборудование Загорской ГАЭС, включая и силовые трансформаторы на напряжение 500 кВ.

В Норильском индустриальном институте предложены принципы построения экспертной системы для нового поколения АСУ, осуществляющие диагностирование и управление режимами силовых трансформаторов. Непрерывно контролируемые параметрами являются уровень и температура масла, температура воздуха, средняя нагрузка за определенный промежуток времени. Дополнительная информация, которую нужно ввести в систему: концентрации водорода и горючих газов в масле, интенсивность частичных разрядов, значения напряжения короткого замыкания, изоляционные характеристики вводов, число КЗ, число перенапряжений, вибрация, шумы и др. Оценка параметров должна вестись с использованием аппарата нечеткой логики.

На Чебоксарской ГЭС апробируется разработанная в ЧГУ экспертно-диагностическая система оценки состояния трансформаторного оборудования, позволяющая мотивировать вывод в ремонт на основе непрерывного контроля и диагностирования рабочего состояния трансформаторов вместо системы периодических ремонтов. С помощью экспертной системы принимается решение об остановке оборудования, контролируется качество выполненного ремонта. В Ивановском ГЭУ создана автоматизированная система оценки состояния трансформаторов на базе данных ХАРГ. В этой разработке рассматривается возможность прогнозирования скорости развития дефекта и, в конечном счете – определения остаточного срока службы трансформатора.

Разработанная в ВЭИ экспертная система диагностирования «Трансформатор», позволяет принять решение о состоянии изоляции, используя результаты ХАРГ. Учитываются сведения о профилактических испытаниях, ремонтах, рабочих режимах трансформаторов, которые в БД вводятся вручную. Применяя экспертную систему, можно построить весь комплекс мероприятий по обслуживанию оборудования. Примером такого комплекса может служить система «Альбатрос», разработанная Уральским ГТУ и Свердловэнерго.

В МарГУ разработано стационарное средство диагностирования изоляции силовых трансформаторов под рабочим напряжением [6].

В результате обзора зарубежных и отечественных литературных источников можно сделать следующие выводы:

1. В процессе длительной эксплуатации силовых трансформаторов разрушение его узлов и элементов вызывают воздействия электрических, механических, химических, тепловых, вибрационных факторов и высокочастотных электромагнитных воздействий (корона, разряды). Значение этих воздействующих факторов для шкал мощностей и классов напряжений различно.

2. В разрабатываемых устройствах для всех типов трансформаторов и классов напряжений рекомендуется непрерывно контролировать однотипные факторы (влаго-, газосодержащиеся в масле, частичные разряды, температурный режим), которые также зависят от типов системы охлаждения, защиты от увлажнения, режима нагрузки.

3. Все разработанные системы приспособлены к действующим силовым трансформаторам и не предусматриваются встроенные средства диагностирования при капитальном ремонте и конструировании новых трансформаторов с учетом классов напряжений и мощностей трансформаторов.

4. Не рассмотрены вопросы электромагнитной совместимости.

5. Нужны дальнейшие исследования по разработке встраиваемых в аппараты технических средств диагностирования и их унификация.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев Б. А.* Системы непрерывного контроля состояния крупных силовых трансформаторов // *Электрические станции.* – 2000. – № 8. – С. 62–71.
2. *Киреева Э. А., Цырук С. А.* Повышение сроков эксплуатации силовых трансформаторов // *Электрика.* – 2004. – № 7.
3. *Лукьянов М. М., Харисов Э. А.* Новые принципы виброакустической диагностики изношенного силового электрооборудования // *Электрика.* – 2001. – № 2.
4. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под общ. ред. Б. А. Алексеева, Ф. Л. Когана, с изм. и доп. – М.: НЦ ЭНАС, 2002.
5. *Сазыкин В. Г.* Совершенствование эксплуатации силовых трансформаторов // *Электрика.* – 2003. – № 3.
6. Стационарное средство диагностирования изоляции силовых трансформаторов под рабочим напряжением: пат 2351942 Рос. Федерация: МПК G 01 R 31/06 / Л. М. Рыбаков, В. И. Непрокин, Р. С. Ахметшин; заявитель и патентообладатель Марийский госуд. ун-т. – № 2007116908/28; заявл. 04. 05. 07; опубл. 10. 04. 09, Бюл. № 10; приоритет 04. 05. 07. – 5 с.: ил.
7. Контроль состояния трансформатора, реализованный в интегрированной адаптирующейся системе анализа / Дж. Х. Прованзана, П. Р. Гаттенс, В. Х. Хагман и др. = J. H. Provanzana, P. R. Gattens, W. H. Hagman et. Al // Доклад СИГРРЭ 12-205. – 1998.
8. *Хилсон Д. В., Дайерти Е. Д., Моррис К. В.* Контроль состояния трансформаторов: Опыт непрерывного контроля состояния в электросетях США // Доклад на симпозиуме US/Russia. – Новгород. – 1993.