

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рыбаков Леонид Максимович

*докт.техн.наук, профессор кафедры Электроснабжения и технической
диагностики Марийского государственного университета*

424000, РФ, Республика Марий Эл, г.Йошкар-Ола, пл.Ленина, д.1

Ласточкин Сергей Валерьевич

аспирант, Марийский Государственный Университет

Соловьев Александр Ильич

студент магистратуры, Марийский Государственный Университет,

Шабалин Андрей Викторович

студент магистратуры, Марийский Государственный Университет

INTEGRATED ASSESSMENT OF THE STATE OF POWER TRANSFORMERS DURING THEIR OPERATION

Rybakov Leonid Maksimovich,

doctor.tech.Professor, Department of power Supply and technical diagnostics,

Mari state University

424000, Russia, Republic of Mari El, Yoshkar-Ola, Lenin square, 1

Lastochkin Sergey Valerievich

post-graduate student, Mari State University

Soloviev Alexander Ilyich

master's degree student, Mari State University,

Shabalin Andrey Viktorovich

master's degree student, Mari State University

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены вопросы диагностирования силовых трансформаторов, в процессе их эксплуатации. Предлагается комплексная оценка состояния изоляции с учетом конструктивных особенностей, воздействующих факторов, влияющих на диагностические признаки.

Ключевые слова: трансформатор, отказ, диагностирование, надежность элементов, амплитудно-частотные характеристики.

ABSTRACT

In article questions of diagnosing of the power transformers having long term of operation are considered. The new technique of an estimation of a condition of isolation taking into account the influencing factors influencing diagnostic signs is offered.

Keywords: transformer, failure, diagnostics, reliability of elements, amplitude-frequency characteristics.

Рассматриваются пути повышения надежности электрооборудования в связи с усилением конкурентной борьбы между предприятиями, связанными с производством, передачей и распределением электроэнергии, что вызывает необходимость повышения рентабельности производства, снижения эксплуатационных расходов парка электрооборудования. Следствием этого является снижение капитальных вложений в обновление парка оборудования, стремление как можно дольше эксплуатировать работающее оборудование.

Эффективность электрического хозяйства неразрывно связана с эксплуатационным обслуживанием, текущим и капитальным ремонтом, а также утилизацией оборудования. Одним из путей поддержания эксплуатационной надежности является применение системы предупредительного ремонта на основе новейших технологий, организации эффективного контроля состояния работающего оборудования [1].

Силовые трансформаторы — наиболее массовые, ответственные и дорогостоящие элементы энергосистемы. Поэтому надежность работы сетей, электростанции и энергосистемы в значительной степени зависит от надежности работы трансформаторного парка. Основное количество трансформаторов энергосистем России было введено в эксплуатацию в 1970-е годы, при этом ГОСТом был установлен минимальный срок службы 25 лет. В настоящее время накоплен достаточно большой опыт эксплуатации, позволяющий разработать рекомендации по поддержанию работоспособности силовых трансформаторов напряжением 10-35-110 кВ, т.к. именно данная группа трансформаторов имеет наибольшее число отказов [2].

Анализ статистики отказов трансформаторов, эксплуатируемых на предприятиях электрических сетей за период 2000-2016 гг. показывает, что 30% технологических нарушений, которые привели к отключению трансформаторов релейной защитой или вынужденными действиями персонала по аварийной заявке, сопровождались возникновением внутренних коротких замыканий в трансформаторе [3]. Основными причинами таких нарушений для трансформаторов со сроком службы 12-25 лет и более являются следующие (в процентах от общего числа нарушений): пробой продольной изоляции — 76%; пробой главной изоляции — 24%; в том числе повреждения РПН — 7%. Из 15% зафиксированных случаев внутренних коротких замыканий трансформаторов отказы сопровождались взрывами и пожарами, что было связано с повреждениями обмоток, высоковольтных вводов и РПН.

Одной из причин витковых замыканий является недостаточная электродинамическая стойкость обмоток трансформатора при возникновении коротких замыканий. При этом происходит деформация обмотки, их вибрация, появляется очаг ослабления изоляции. Интенсивное развитие частичных разрядов в месте деформации изоляции в конечном итоге приводит к отказу активной части трансформатора,

В связи с изложенным, в последние годы контролю и диагностике основного электрооборудования на предприятиях уделяется особенно большое внимание [4].

Диагностирование электрооборудования, в частности силового трансформатора, подразумевает наличие диагностических признаков для оценки его состояния, а также методов диагностирования, представляющих собой детерминированную и случайную диагностическую ценность. Заметим, что признаки со случайной диагностической ценностью, определяемой отсутствием монотонности изменения значений при развитии контролируемого им процесса, не могут быть использованы для принятия решений о состоянии трансформатора, и лишь в некоторых случаях могут свидетельствовать о необходимости более полного обследования. Диагностическим признакам, обладающим детерминированной ценностью, свойственна монотонность изменения во времени при развитии процесса.

Основным документом, регламентирующим перечень диагностических признаков, обеспечивающих контроль состояния трансформаторов при вводе в работу и в процессе эксплуатации, предельно допустимые значения контролируемых параметров и периодичность диагностирования, является РД

34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» [5]. В нем наряду с традиционными параметрами оценки состояния изоляции введены дополнительные показатели: хроматографический анализ состава газов, растворенных в масле, контроль содержания фурановых соединений в масле, определение степени полимеризации, измерение сопротивления короткого замыкания, тепловизионный контроль, ИК-спектрометрия, измерение частичных разрядов, метод низковольтных импульсов, а также применение устройств для диагностирования внутренней изоляции трансформаторов, находящихся под рабочим напряжением.

В последнее время большое распространение получают методы контроля параметров силовых трансформаторов под рабочим напряжением [4, 8].

Наиболее простым методом диагностирования под рабочим напряжением является диагностирование по внешним признакам. К методам данной группы относятся: тепловизионный контроль, регистрация электромагнитного излучения, вибрационный контроль, регистрация частичных и акустических разрядов. Традиционные методы испытаний: физико-химические методы анализа масла, определение характеристик вводов и сопротивления обмоток и др., — считаются наиболее информативными, но все же недостаточными, т.к. выявляют только симптомы дефектов, но не их место и опасность. С их помощью практически невозможно оценить степень увлажнения и загрязнения, дефекты устройства РПН.

К перспективным видам диагностирования работающего трансформатора относятся [4]:

- а) оценка увлажнения твердой изоляции по равновесному состоянию «бумага-масло»;
- б) определение параметров частичных разрядов — кажущегося заряда, частоты повторения и энергии;
- в) анализ виброакустического спектра;
- г) обследование с помощью тепловизора [7];
- д) снятие параметров частотных характеристик.

Методика контроля может включать в себя наружный осмотр, анализ газов, растворенных в масле (с экспертной системой интерпретации результатов анализа), расчет относительной влажности масла, измерение частичных разрядов (акустическими и электрическими датчиками с определением опасности дефекта), определение распрессовки обмоток и магнитопровода с помощью виброакустических спектров и т.д..

Полный комплекс мероприятий по оценке состояния трансформатора и определения его работоспособности включает в себя непрерывный и периодический контроль параметров в работе и подробное обследование в отключенном состоянии во время ремонта. Отсутствие универсальных и

однозначных параметров оценки состояния трансформатора делает необходимым применение оптимально подобранного комплекса методов его контроля, всестороннего учета всех обстоятельств работы трансформатора при решении вопроса о его дальнейшей работе,

Выработка критериев оценки информативности контролируемых показателей и определение возможности их использования для принятия решения о техническом состоянии и запасе работоспособности трансформаторов является актуальной задачей для диагностирования. При моделировании системы диагностирования состояния внутренней изоляции трансформаторов принципиально важное значение имеют следующие факторы:

- является ли контролируемый показатель функцией физико-химического состояния изоляции или он отслеживает сопутствующие изменения при развитии дефектов;

- наличие существенного изменения значения измеряемого показателя во времени при развитии характеризуемого им дефекта;

- наличие значимых различий между значениями измеряемого показателя и степенью развития дефекта,

В связи с этим был предложен метод диагностирования изоляции, основанный на физико-химических и резонансных явлениях, свойственных обмоткам силового трансформатора как в рабочем режиме, так и при отключенном состоянии [6, 8]. Данный метод диагностирования изоляции силовых трансформаторов под рабочим напряжением позволяет увеличить количество контролируемых элементов изоляции, повысить точность постановки диагноза о состоянии обмоточной изоляции, а также осуществить непрерывное диагностирование силового трансформатора, находящегося в рабочем режиме.

Фактически при принятии решения по результатам диагностирования о возможности и целесообразности дальнейшей эксплуатации трансформаторов следует оценить его состояние и возможные последствия принятого решения.

Подход к оценке уровня возможного риска должен учитывать материальные затраты, требуемые для реализации принятого решения, а также многочисленные объективные и субъективные факторы, не поддающиеся четкому учету.

Первостепенное значение приобретает решение таких важных задач, связанных с эксплуатацией электрооборудования, как раннее выявление дефектов, определение взаимосвязи между диагностированием и надежностью электроснабжения, минимальные затраты на диагностирование, непрерывный контроль состояния работоспособности.

Система непрерывного контроля состояния трансформатора должна охватывать параметры, изменения которых сигнализируют о развитии дефектов на начальной стадии их развития. Данные непрерывного контроля являются оперативной базой для постановки диагноза и служат средством прогнозирования дальнейшей работы трансформатора.

Разработано средство диагностирования, собранное из модулей, позволяющее под рабочим напряжением снимать частотные характеристики силовых трансформаторов для выявления развивающихся дефектов [4; 8].

Структурная схема устройства диагностирования приведена на рис. 1, где Т — трансформатор; СТ, С2 высоковольтные конденсаторы связи; ФП1,

ФП2 — фильтры присоединения; БКИ — блок коммутаций и измерений; БГТ — блок генерации тестов; БО — блок обработки; БИ — блок индикации; ПО — пульт оператора; НН и ВН низковольтные и высоковольтный выходы трансформатора.

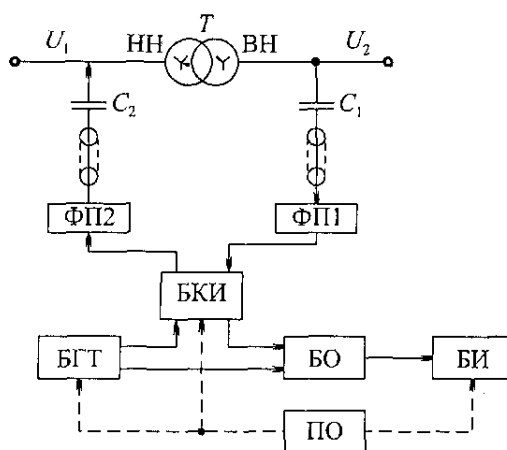


Рисунок 1. Структурная схема устройства диагностирования

Принцип действия устройства диагностирования состояния изоляции силовых трансформаторов 10/0,4 кВ (35/10 кВ) под рабочим напряжением основан на регистрации параметров амплитудно-частотных характеристик при поступлении на одну из обмоток высокочастотного сигнала, равного собственной (резонансной) частоте и измерении разности напряжений $\Delta U = U$ или коэффициента передачи $k = U_1/U_2$. Рост значения разности напряжения и коэффициента передачи служит диагностическим признаком состояния изоляции трансформатора (рис. 2 а – отношение $k_1(f) = U_2/U_1$, б – разность $k_2(f) = \Delta U$)

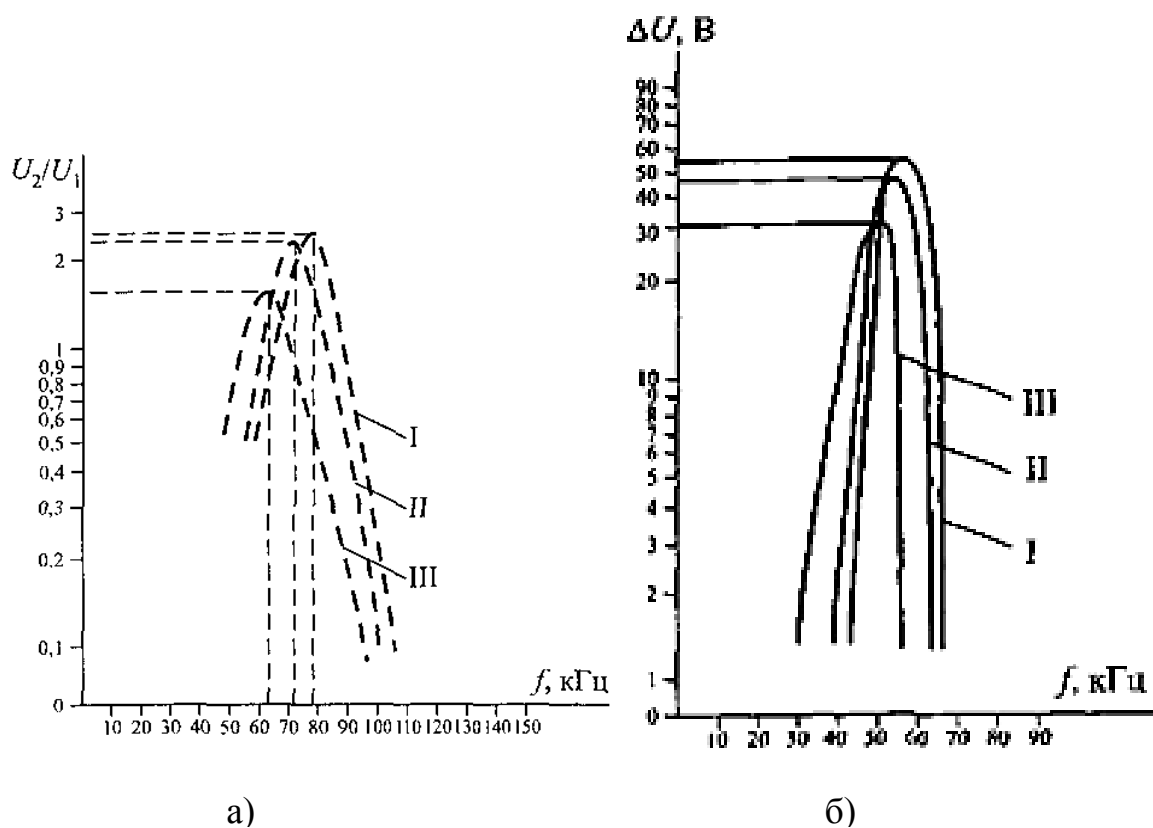


Рисунок 2. Амплитудно-частотные характеристики $k_1(f)=U_2/U_1$ (а), $k_2(f)=\Delta U$ (б) трансформатора ТМ-160/10 кВ при различных состояниях (I, II и III) внутрислойной изоляции по увлажнению: I состояние — увлажненная изоляция; II состояние — изоляция подсушена; III состояние — высушенная изоляция,

Данный метод диагностирования изоляции силовых трансформаторов под рабочим напряжением позволяет выявить дефекты на ранней стадии их развития и является средством прогнозирования дальнейшей работы трансформатора.

Фактически при принятии решения по результатам диагностирования о возможности и целесообразности дальнейшей эксплуатации трансформаторов следует оценить его состояние и возможные последствия принятого решения. Подход к оценке уровня возможного риска должен учитывать материальные затраты, требуемые для реализации принятого решения, а также

многочисленные объективные и субъективные факторы, не поддающиеся четкому учету.

Первостепенное значение приобретает решение таких важных задач, связанных с эксплуатацией электрооборудования, как раннее выявление дефектов, определение взаимосвязи между диагностированием и надежностью электроснабжения, минимальные затраты на диагностирование, непрерывный контроль состояния работоспособности.

ВЫВОДЫ

1 . Системы непрерывного диагностирования состояния силовых трансформаторов высокочастотным зондированием позволяет выявлять дефекты на ранней стадии их развития непосредственно во время их работы и является средством прогнозирования срока службы трансформаторов.

2. Математическая обработка полученных результатов оценки состояния изоляции разработанным методом (k_1 и k_2) и традиционными методами ($\text{tg}\delta$, $R_{из}, C_2 / C_{50}$) показали тесную связь, коэффициент корреляции между параметрами составляет более 0,8.

Литература

1. Чупак Т.М., Сизганова ЕЮ. Выбор метода моделирования состояния изоляции силового трансформатора // Электрика, 2006, N212. С. 12-14.

2. Ванин Б.В., Львов Ю.Н., Львов М.Ю. Эксплуатация силовых трансформаторов при достижении предельно допустимых показателей износа изоляции обмоток // Электрические станции, 2004, №2. С. 21-24.

3. Хренников А.Ю. Основные причины внутренних повреждении обмоток силовых трансформаторов в процессе эксплуатации // Промышленная энергетика, 2006, №12. С 13-16.

4. Рыбаков Л.М., Макарова Н.Л., Калявин В.П, Диагностика и надежность в системах электроснабжения: монография / Мар. гос. ун-т; - Йошкар-Ола, 2016 - 319 с.

5. РД 34.45-51.300-97 Объем и нормы испытаний электрооборудования [Под общ. ред. Б.Л. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л. Г. Мимиконянца. 6-е изд., с изм. и доп. - М.: изд-во НЦ ЭНАС, 2001, - 256 с.

6. Стационарное средство диагностирования изоляции силовых трансформаторов под рабочим напряжением. Пат. 2351942 Рос. Федерация; / Рыбаков Л.М., Ахметшин Р.С. Непрокин В.И. (Россия). –заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Марийский государственный университет. № 2007116908/28; заявл. 04.05.2007. опубл. 10.04.2009.

7. Хренников А.Ю., Рубцов А.В., Щербаков ВВ. Тепловизионный контроль электротехнического оборудования и опыт диагностики силовых трансформаторов // Электрические станции, 2006, №5. С. 32-36.

8. Ахметшин Р.С., Рыбаков Л.М. Технические средства диагностирования силовых трансформаторов на основе частотных характеристик // Электричество , № 5, 2005, С. 20-26.

References:

1. Tupac T. M. Syzganova IT. The choice of the method of modeling the state of the power transformer. *Electrica*, 2006, N212. pp. 12-14.

2. Vanin B. V. Lvov Yu. N. Lvov M. Yu. Operation of power transformers at achievement of maximum admissible indicators of wear of isolation of windings *Electric stations*, 2004, No. 2. pp. 21-24.

3. Khrennikov A. Yu. the Main causes of internal damage of windings of power transformers during operation *Industrial power engineering*, 2006, No. 12. From 13-16

4. Rybakov L. M. Makarova N. L. Kalyavin V. P. *Diagnostics and reliability in power supply systems: monograph*. Mar. state University; Yoshkar-Ola, 2016. 319 p.

5. RD 34.45-51.300-97 the Scope and norms of electrical equipment testing [Under the General editorship of B. L. Alekseev, F. L. Kogan, L. G. Mamikonians. 6th ed., with izm. and additional - M: publishing house of the NTS ENAS, 2001, - 256 p.

6. Stationary means of diagnosing isolation of power transformers under operating voltage. Pat. 2351942 Grew. Federation; Rybakov L. M., Akhmetshin R. S. Pushkin V. I. (Russia). applicant and patentee of the state University of Mari. No. 2007116908/28; declared. 04.05.2007. publ. 10.04.2009.

7. Khrennikov A. Yu. Rubtsov A.V. Shcherbakov V. V. Thermal imaging control of electrical equipment and experience of diagnostics of power transformers / Electric stations, 2006, No. 5. pp. 32-36.

8. Akhmetshin R. S. Rybakov L. M. Technical means of diagnosing power transformers based on frequency characteristics. Electricity, No. 5, 2005, pp. 20-26.