

ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАСЛОСОДЕРЖАЩЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

МИТЬКИН Ю.А., д-р техн. наук, ВИХАРЕВ А.В., канд. техн. наук, ПРУСАКОВ М.В., асп.

Рассмотрены проблемы оценки технического состояния маслосодержащей изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования в эксплуатации. Изложены подходы к прогнозированию изменения технического состояния изоляции и результаты комплексного моделирования физических процессов в маслонаполненном оборудовании.

Ключевые слова: маслонаполненное оборудование, изоляция, параметры изоляции, эксплуатация оборудования, моделирование физических процессов.

THE EVALUATION PROBLEMS OF HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT OILCONTAINING INSULATION TECHNICAL CONDITION DURING MAINTENANCE

MITKIN Yu.A., Ph.D., VIKHAREV A.V., Ph.D., PRUSSAKOV M.V., postgraduate

The article deals with the evaluation problems oil-containing insulation technical condition of high-voltage oil-filled equipment during maintenance. It contains the approaches to the forecasting of insulation technical condition changes and the results of physical processes in oil-filled equipment complex modeling.

Key words: oil-filled equipment, insulation, insulation parameters, equipment maintenance, physical processes modeling.

Введение. В энергосистемах в эксплуатации находится большое количество высоковольтного маслонаполненного оборудования (МНО), в значительной степени определяющего эффективность производства и распределения электрической энергии. Основной электроизоляционной и рабочей средой в этих аппаратах является трансформаторное масло, поэтому методы контроля такого оборудования во многом носят общий характер.

Результаты эксплуатации МНО свидетельствуют о том, что основной причиной его отказов является снижение электрической прочности маслосодержащей изоляции [1]. Так, для силовых трансформаторов основной причиной отказов является повреждение обмоток, связанное со снижением электрической прочности изоляции в процессе эксплуатации из-за ее увлажнения и загрязнения. Повреждения измерительных трансформаторов тока и напряжения связаны в основном со старением твердой изоляции при высоких рабочих температурах и ее увлажнении. Наиболее частым и опасным видом повреждения вводов является перекрытие внутренней изоляции, связанное с ухудшением свойств масла и образованием «желтого осадка» на внутренней поверхности нижней фарфоровой крышки.

К настоящему моменту значительная часть работающего МНО выработала свой нормативный ресурс, однако возможности по его замене весьма ограничены. В этих условиях важно разработать долговременную программу по обновлению МНО. Реализация такой программы требует разработки новых методов оценки и поддержания технического состояния действующего оборудования на заданном уровне и продления его работоспособности на максимально возможный срок.

Основные направления развития методов оценки технического состояния изоляции МНО. В силу большого числа влияющих факторов и сложности протекающих в маслосодержащей изоляции электрофизических и физико-химических процессов в условиях эксплуатации контроль технического состояния этой изоляции проводится с использованием комплекса методов, предусмотренных действующим нормативным

документом «Объем и нормы испытаний электрооборудования». При этом сущность принципа контроля технического состояния МНО заключается в проверке соответствия его параметров требованиям этого документа.

До настоящего времени методы контроля технического состояния маслонаполненного оборудования развивались и совершенствовались на основе результатов исследований, выполненных в лабораторных условиях на моделях изоляционных конструкций с последующей их корректировкой по мере получения данных по изменению параметров изоляции в условиях эксплуатации. При этом нормативные параметры главным образом установлены только для трансформаторного масла. Для параметров, характеризующих внутреннюю изоляцию МНО в целом, предусматривается в основном принцип ориентации на достигнутый ранее уровень с допустимой степенью отклонения. Это объясняется тем, что контроль параметров трансформаторного масла производится на образцах эксплуатационного масла в лабораторных условиях, где можно использовать самые современные технические средства. Опыт эксплуатации маслонаполненного электроэнергетического оборудования, основанный на традиционных методах контроля технического уровня маслонаполненного оборудования, подтверждает эффективность этих методов.

Вместе с тем накопленный к настоящему времени богатый и уникальный опыт эксплуатации маслонаполненного оборудования выявил и новые проблемы. Одна из них – поиск направлений по обоснованному продлению ресурса оборудования, выработавшего свой номинальный по проектному уровню срок службы.

На качественно новом этапе развития высоковольтной электроэнергетики нужны и новые подходы к оценке технического состояния маслонаполненного оборудования электростанций и электроэнергетических систем.

Для решения этой задачи можно предложить следующие направления действий:

– комплексное моделирование физических процессов, происходящих в МНО в целом, и выдача на

этой основе рекомендаций по его дальнейшей эксплуатации;

– разработка методов прогнозирования изменения технического состояния изоляции МНО на основе использования результатов эксплуатационного мониторинга параметров изоляции МНО.

Решая поставленные задачи, не стоит забывать о том, что продление ресурса оборудования с большим сроком эксплуатации является важной, но все же частной проблемой. Необходимо ставить более общую цель – повышение ресурса всего трансформаторного оборудования. Тогда мы будем в состоянии прогнозировать долгосрочные технический и экономический эффекты.

С учетом такого решения обозначенной проблемы рассмотрим основные возможные варианты по каждому из вышеназванных направлений прогнозирования технического состояния изоляции МНО.

Комплексное моделирование физических процессов, происходящих в маслосодержащей изоляции, должны выполнять научные учреждения электроэнергетической отрасли с привлечением других научных организаций и вузовской науки. Однако создание полной расчетной методики по оценке технического состояния изоляции маслонаполненного оборудования займет достаточно много времени, поэтому наряду с этим следует одновременно работать и в других направлениях.

Непрерывный мониторинг параметров состояния оборудования, реагирующих на развитие необратимых процессов в маслосодержащей изоляции, с одновременным контролем ряда важнейших традиционных параметров фактически заложен в директивных документах РАО «ЕЭС России». При этом программа обследования технического состояния МНО предусматривает три уровня контроля. На первом уровне контролируются параметры, необходимые для оценки его общего технического состояния. На втором уровне уточняется состояние изоляции оборудования на основе полного контроля параметров масла и электрических характеристик изоляции в соответствии с нормами испытаний электрооборудования. Третий уровень контроля состояния изоляции предусмотрен после вывода оборудования из эксплуатации при участии завода-изготовителя.

Аналогичные подходы предлагают СИГРЭ, EPRI, IEEE и НПО «Техносервис-Электро». Эти концепции фактически систематизируют традиционный подход к текущей оценке технического состояния маслосодержащей изоляции силового МНО. В силу этого их использование для прогнозирования изменения параметров изоляции в эксплуатации затруднительно.

Вместе с тем к настоящему времени электроэнергетика накопила уникальный экспериментальный материал по результатам испытаний маслонаполненного оборудования в течение 25–30 лет его непрерывной работы. В результате встает новая задача – проанализировать эти данные и на этой основе наметить направление решения вопроса о прогнозировании изменения параметров изоляции в условиях эксплуатации. Работа в этом направлении уже наметилась [2].

Применение статистических методов и элементов теории надежности к оценке изменения ресурса маслосодержащей изоляции МНО в эксплуатации в настоящее время затруднительно в силу большого числа влияющих факторов (параметров изоляции), а также небольшой достоверности данных по вероятностям выхода МНО из строя в зависимости от времени его работы.

В ряде работ анализируются изменения отдельных параметров изоляции во времени и на этой основе предпринимаются попытки их дальнейшего прогноза. Так, в [2] по данным эксплуатационных испытаний трансформаторов одного типа рассчитывается математическое ожидание значения газосодержания в масле в зависимости от срока эксплуатации трансформатора. В других работах анализируется изменение отдельных контролируемых параметров (тангенс угла диэлектрических потерь, влажность масла) в зависимости от времени работы МНО, но при таком подходе нет возможности оценить влияние возможных режимов работы оборудования (изменение рабочей температуры, влажности изоляции и др.), а также результаты эксплуатационного мониторинга по другим параметрам изоляции.

Другим подходом в этом направлении можно считать *метод группового учета аргументов*, разработанный [3] для прогнозирования сложных систем. Он позволяет получить расчетный тренд изменения рассматриваемого контролируемого параметра с учетом и других параметров оборудования. Однако этот метод предусматривает формальную связь параметров оборудования и не учитывает физических процессов, определяющих поведение изоляции и изменение контролируемых параметров в условиях эксплуатации МНО.

Метод, базирующийся на физических процессах, определяющих закономерности накопления поврежденных изоляции, а также на результатах эксплуатационного мониторинга, используется при оценке ресурса машин и конструкций [4]. При этом характеристикой, указывающей на уровень технического состояния машины, является мера ее повреждения, изменяющаяся от своего начального значения до критического, при котором происходит окончательное повреждение системы. Мера повреждения характеризует условия нагружения и параметры оборудования, позволяя прогнозировать показатель ресурса в сложных условиях по данным эксплуатационных измерений.

Для реализации данного метода применительно к внутренней изоляции МНО важно выбрать меру (меры) ее повреждения. При этом следует учесть, что основные виды повреждения изоляции связаны с нарушением ее электрической и механической прочности. В связи с этим для реализации полной модели постепенного накопления повреждений маслосодержащей изоляции следует учитывать несколько мер ее повреждений. Выбор этих мер повреждений можно провести на основе анализа базы данных, включающей в себя результаты эксплуатационного мониторинга контролируемых параметров изоляции.

Разработка метода прогнозирования изменения технического состояния изоляции МНО. За основу этого метода взята модель постепенного накопления повреждения. Выбирая способы устранения повреждений изоляции важно знать, на какие процессы в эксплуатации реагируют контролируемые параметры. Анализ диагностической ценности основных параметров изоляции показал, что на изменение электрической прочности изоляции реагируют следующие параметры: влагосодержание, газосодержание и содержание примесей в трансформаторном масле; а на изменение механической прочности изоляции – степень полимеризации бумажной изоляции, содержание фурановых производных в масле, степень короткого замыкания.

При обосновании основных мер повреждений маслосодержащей изоляции МНО важно провести предварительный анализ изменения ее контролируемых параметров в условиях эксплуатации, выявить взаимосвязь между ними и на этой основе выбрать меры по-

вреждений, которые в наибольшей степени отражают физические процессы в изоляции оборудования.

Анализ полученных результатов по прогнозированию изменения технического состояния изоляции МНО в условиях эксплуатации с использованием результатов эксплуатационного мониторинга [5] показал, что такие методы позволяют повысить эффективность эксплуатации МНО.

Исследование результатов эксплуатационного мониторинга показало, что при оценке и прогнозировании изменения технического состояния изоляции МНО следует учитывать срок эксплуатации оборудования.

Нормативная область эксплуатации МНО. На этом этапе эксплуатации МНО имеется достаточное количество экспериментальных данных для определения расчетного тренда изменения меры повреждения изоляции. Определение постоянных коэффициентов расчетного тренда производится по методу наименьших квадратов. Истинным считается тренд, соответствующий глубокому минимуму:

$$\sum [x_j^*(t) - x_j(t)]^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $x^*(t)$, $x(t)$ – данные эксплуатационных испытаний и прогнозирующего тренда.

После определения расчетного тренда рассчитывается относительная среднеквадратичная величина отклонений (относительная погрешность).

Реализация данного алгоритма осуществляется методом группового учета аргументов, согласно которому все данные эксплуатационных испытаний разделяются на две области: обучающую T_0 и проверочную T_y . Определение расчетного тренда (постоянных коэффициентов) производится с использованием данных испытаний только обучающей области. Проверочная область используется для оценки ошибки прогнозирования применительно к данному МНО. На этой области данных производится расчет тренда, определенного на обучающей области, и определяется отклонение расчетного тренда от результатов испытаний. Погрешность, с которой расчетный тренд описывает эксплуатационные данные на проверочной области, принимается равной погрешности прогнозирования. Для проверочной области принимаются данные последних эксплуатационных испытаний. Проведенные расчеты показали, что в качестве проверочной области следует принимать отрезок времени 3–5 лет.

Эксплуатация стареющего оборудования. На этом этапе эксплуатации поведение изоляции на прогнозируемом участке времени в большей степени определяется значениями контролируемых параметров изоляции для моментов времени, близко расположенных к времени прогнозирования. Это учитывалось введением весовых коэффициентов g_i , значение которых увеличивается по мере приближения времени наблюдения к участку прогнозирования. При этом критерий выбора наиболее точного прогнозирующего тренда для меры повреждения (1) принимает следующий вид:

$$\sum g_i [x_j^*(t) - x_j(t)]^2 \rightarrow \min; \quad (2)$$

$$g_i = \left[\left(a + \frac{t_i}{T} \right) / (a+1) \right]^r, \quad r \geq 1, \quad (3)$$

где a , r – постоянные коэффициенты.

Степень влияния весового коэффициента на значение критерия определяется коэффициентами a и r , поэтому вводится дополнительное условие выбора расчетного тренда – минимум погрешности на прове-

рочной области. Тогда расчет тренда изменения меры повреждения производится в два этапа: 1) определяются расчетные тренды изменения меры повреждения по критерию (2) при различных a и r ; 2) для каждого такого тренда рассчитывается погрешность на проверочной области данных и по минимальной погрешности выбирается прогнозирующий тренд.

В более общем случае к обучающей области относятся все данные эксплуатационного мониторинга изоляции. Последние пять лет эксплуатации МНО относятся одновременно к проверочной области. Учет результатов эксплуатационного мониторинга производится с использованием весовых коэффициентов. При этом весовые коэффициенты для данных проверочной области равны 1. Для остальных данных весовые коэффициенты убывают по мере удаления от проверочной области. Этот подход учитывает как область приработки МНО (все данные попадут в проверочную область и будут учитываться одинаково), так и область стареющего оборудования (наиболее старые данные будут оказывать минимальное влияние на прогнозирующий тренд).

Следует отметить, что для МНО имеет место изменение технологических режимов его эксплуатации, в том числе и по причине его ремонта со сменой масла. Это учитывается в предложенной методике следующим образом. Если ремонт осуществляется без замены узлов оборудования (в том числе и без замены масла), то расчет производился по изложенному выше алгоритму. При замене узлов оборудования расчетный тренд на участке после ремонта начинался с нового эффективного значения x_0 , которое также определялось при расчете.

Реализация метода прогнозирования мер повреждения изоляции МНО произведена на основе разработанной методики, включающей в себя программу PROGNOZ_T, с помощью которой были проведены расчеты для 24 силовых трансформаторов напряжением 220–500 кВ. Погрешность расчета для мер повреждения изоляции на проверочной области не превысила погрешности измерения параметров изоляции, что позволяет судить о применимости данного подхода к прогнозированию изменения технического состояния изоляции МНО.

Моделирование физических процессов в изоляции МНО. Для разработки новых методов оценки технического состояния изоляции МНО важно изучить физические процессы в изоляции с учетом воздействующих факторов. К числу основных воздействующих факторов, как отмечалось выше, относятся влага и частицы примеси. В процессе эксплуатации маслонаполненного оборудования выявились случаи нарушения его электрической прочности по причине формирования разрядного канала на поверхности твердого диэлектрика (вводы, трансформаторы). Так, во вводах на внутренней поверхности нижней фарфоровой крышки образуется «желтый осадок».

В процессе эксплуатации маслонаполненного высоковольтного оборудования увеличивается загрязнение масла коллоидными частицами различной природы, продуктами его окисления и разложения. В результате значительно возрастает $\text{tg}\delta$ трансформаторного масла, снижается его электрическая прочность, на поверхности нижней фарфоровой крышки образуется осадок, по которому со временем развиваются разряды. Это обусловлено тем, что под воздействием электрического поля частицы приходят в движение и могут скапливаться в локальных местах, где и

создаются благоприятные условия для формирования предпробивных и пробивных процессов.

В силу этого важно знать особенности поведения коллоидных частиц применительно к реальным высоковольтным электроизоляционным конструкциям, в которых имеют место переменные пространственно неоднородные электрические поля.

До настоящего времени в научных работах поведение коллоидных частиц в масляном канале ввода рассматривалось как простой процесс седиментации частиц под действием силы тяжести. Вместе с тем коллоидные частицы имеют электрический заряд, который обусловлен наличием на их поверхности двойного электрического слоя из ионов. Учёт влияния заряда частицы при определенных условиях может привести к качественно иным результатам. В [6] указывается на неоднозначность поведения заряженных дисперсных частиц в неоднородных переменных электрических полях. Отмечается, что на траекторию движения частиц оказывают влияние неоднородность переменного электрического поля, вязкость диэлектрической жидкости, размер и заряд дисперсных частиц, а также электрофизические характеристики частиц и жидкости.

Исследование поведения коллоидных частиц примеси при помощи натурального эксперимента сопровождается значительными трудностями, связанными с заданием параметров полей, контролем размера, заряда частиц и наблюдением за их движением. В связи с этим выбраны методы математического и компьютерного моделирования поведения частиц примеси в упрощенных модельных условиях, отражающих реальные явления в действующем маслonaполненном высоковольтном вводе. Проведенные эксперименты показали, что заряженная частица, участвуя в процессе седиментации, выталкивается из области с повышенной напряженностью электрического поля, а траектория движения частиц зависит от их заряда, размера, физических параметров масла, а также от степени неоднородности электрического поля.

В канале ввода между изоляционным остовом, верхней и нижней фарфоровыми крышками и металлической соединительной втулкой из-за неоднородности теплового поля возникает циркуляция трансформаторного масла. Эта циркуляция масла влияет на траекторию движения коллоидных частиц.

Исследования гидродинамических процессов проводились на физической модели ввода, состоящей из токоведущей трубы, бумажной изоляции (изоляционный остов), масляного канала, верхней и нижней стеклянной крышки для визуального наблюдения за движением масла, металлической соединительной втулки. Наблюдения осуществлялись с использованием катетометра. Проведенные эксперименты показали, что в масляном канале модели ввода при различных режимах работы существует интенсивное гидродинамическое движение масла. Для модели ввода высотой 520 мм и шириной масляного канала 6–19 мм скорость движения масла находится в пределах 2–15 мм/с.

В ходе экспериментов было установлено, что на характер и скорость движения масла по высоте ввода оказывают влияние температура окружающей среды, температура масла в баке трансформатора, омывающего нижнюю часть ввода, установочный угол наклона ввода. Выявлены особенности движения масла в канале в различных частях ввода при изменении угла наклона ввода в диапазоне 0–15°. При увеличении угла наклона наблюдается нарушение симметрии в движении масла в канале.

На основании результатов расчётов и экспериментов установлено, что скорость потока масла (более 2 мм/с) значительно превосходит скорость седиментации частиц (менее 0,35 мм/с при 90°С и радиусе частиц менее 10 мкм), следовательно, движение коллоидных частиц в основном определяется потоком масла в канале.

Таким образом, при описании электрофизических процессов в масляном канале высоковольтного ввода (образование осадка из коллоидных частиц и разрядов по нему) необходимо учитывать влияние гидродинамического движения масла за счет неравномерного распределения температурного поля в бумажно-масляной изоляции и влияние неоднородного переменного электрического поля на поведение коллоидных частиц в масляном канале ввода.

Можно предложить следующий механизм образования осадка и разрядов по нему. Поток масла постоянно поставляет коллоидные частицы к пристеночному слою вблизи твердой изоляции нижней фарфоровой крышки. Около неё формируется вязкий пограничный слой, в котором скорость масла практически равна нулю и коллоидные частицы «закрепляются» в нем. В пристеночном слое частицы за счет действия сил неоднородного электрического поля и зеркального отображения двигаются к поверхности фарфора и образуют на нем осадок. Со временем расстояние между частицами уменьшается, а напряженность электрического поля между ними возрастает. Одновременно за счет коагуляции происходит увеличение размера частиц и их заряда. При определенной напряженности поля происходит пробой масляной пленки между частицами. В результате разряда в небольшом объеме образуются углеродсодержащие продукты в виде коллоидных частиц, что снижает электрическую прочность осадка. Такие местные частичные разряды происходят в течение длительного промежутка времени по всему объему осадка. Продукты разложения масла со временем накапливаются. Затем развиваются более мощные разряды, которые приводят к образованию науглероженных дорожек и к развитию поверхностного разряда по осадку.

В результате исследований также установлено, что наличие заряженных коллоидных частиц в масле приводит к изменению параметров электрогидродинамического (ЭГД) движения трансформаторного масла в электрическом поле. В силу этого в качестве одного из новых методов контроля содержания коллоидных частиц в трансформаторном масле предложено определение параметров ЭГД движения масла в электрическом поле.

Наиболее ярко этот эффект проявляется в неоднородных электрических полях, так как в этих полях диссоциация молекул неоднородна: концентрация распадавшихся на ионы молекул уменьшается с удалением от электрода. Движение ионов в поле (электрический ток) приносит в каждый элемент объема больше зарядов из близкой к электроду области, чем зарядов противоположного знака из более удаленной области, где ионов меньше. В силу этого возле электрода накапливается одноименный объемный заряд. Он отталкивается кулоновской силой и увлекает всю жидкость в струйное течение.

Таким образом, скорость движения жидкости возрастает с увеличением объемной плотности электрических зарядов, то есть зависит от содержания заряженных коллоидных частиц в масле. Следовательно, явление ЭГД течения жидкости можно использовать для контроля содержания заряженных коллоидных частиц в трансформаторном масле.

Для практической реализации такого подхода важно выбрать параметр, характеризующий ЭГД явление, который достаточно легко можно было бы фиксировать при испытаниях в условиях эксплуатации. В качестве такого параметра целесообразно использовать давление жидкости, создаваемое электрогидродинамическим течением масла. Выполненные эксперименты показали, что величина этого давления пропорциональна концентрации коллоидных частиц в трансформаторном масле.

Заключение

Предложенные методы прогнозирования изменения технического состояния изоляции и метод комплексного моделирования физических процессов в маслонаполненном оборудовании позволяют повысить эффективность эксплуатации высоковольтного маслонаполненного оборудования и продлить срок службы стареющих его образцов.

Предложенный метод контроля качества трансформаторного масла на основе электрогидродинамического эффекта реагирует на изменение содержания коллоидных частиц и может быть использован для диагностики технического состояния масла.

Митькин Юрий Алексеевич,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
телефон (4932) 26-97-23,
e-mail: mua@vetf.ispu.ru

Вихарев Алексей Владимирович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
телефон (4932) 26-97-23,
e-mail: vav@vetf.ispu.ru

Прусаков Михаил Вячеславович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
телефон (4932) 26-97-23,
e-mail: vvf@vetf.ispu.ru

Список литературы

1. **О повреждениях** силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации / Б.В. Ванин, Ю.Н. Львов, М.Ю. Львов и др. // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 53–58.
2. **Давиденко И.В., Комаров В.И.** Применение методов математической статистики для получения критериев оценки состояния силовых трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов // Электр. – № 1. – С. 37–41.
3. **Ивахненко А.Г.** Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. – Киев.: Техніка, 1975. – 312 с.
4. **Болотин В.В.** Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
5. **Митькин Ю.А., Вихарев А.В.** Прогнозирование изменения механической прочности бумажной изоляции в действующем маслонаполненном высоковольтном оборудовании // Вестник ИГЭУ. – 2003. – Вып.3. – С. 82–85.
6. **Волков В.Н., Крылов И.Л.** Эффект выталкивания заряженных частиц суспензии из области сильного переменного электрического поля: Сб. науч. тр. / Иван. энерг. ин-т им. В.И. Ленина. – Вып. 4.: Новые методы исследования в теоретической электротехнике и инженерной электрофизике. – Иваново, 1975. – С. 76–83.