

Методы и средства контроля механического состояния опорно-стержневой фарфоровой изоляции высоковольтных разъединителей в условиях эксплуатации

Кухтиков В.А., гл. специалист департамента электрических сетей РАО «ЕЭС России»

Воротницкий В.Э., д.т.н., профессор, АО ВНИИЭ

Демин А.Н., ведущий инженер, АО ВНИИЭ

Как известно [1], за последнее десятилетие резко сократились объемы строительства электрических сетей как взамен пришедших в негодность, так и для присоединения новых потребителей. Сократились объемы работ по техническому перевооружению и реконструкции, а также всех видов ремонтов, направленных на восстановление основных фондов и поддержки их в технически исправном состоянии. Сокращение объемов нового строительства и строительства электрических сетей, взамен пришедших в негодность, увеличило долю оборудования, срок службы которого превышает нормативный. Это, в частности, относится к высоковольтной коммутационной аппаратуре, в том числе к разъединителям.

Как показала практика эксплуатации разъединителей, важнейшей частью, влияющей на надежность их работы, являются опорно-стержневые фарфоровые изоляторы (ОСИ). Повреждаемость разъединителей из-за поломок ОСИ по-прежнему остается высокой, а по мере старения изоляторов вероятность их выхода из строя увеличивается. По данным АО ВНИИЭ [2], практически все отечественные разъединители имеют низкое качество фарфора опорных изоляторов. Это также подтверждается практикой эксплуатации ОСИ – в 70-80 % случаев основной причиной их разрушения является низкое качество изготовления изоляторов, обусловленное нарушением основных технологических режимов процесса производства фарфора. Поломки ОСИ приводят к отключениям потребителей и к несчастным случаям.

Практика работы многих электросетевых предприятий и электростанций показала, что одним из эффективных способов предупреждения таких поломок является выявление внешних и внутренних дефектов ОСИ в процессе их эксплуатации. Это подтверждается двумя циркулярами РАО «ЕЭС России» « О предупреждении поломок опорно-стержневых изоляторов разъединителей 110-22 кВ» № Ц9-04-97 (Э) от 29.12.1997 г. и № Ц01-01 (Э) от 14.05.2001 г.[3].

Ввод в действие этих циркуляров значительно активизировал работу энергопредприятий по применению методов и средств диагностики технического состояния ОСИ, привлек внимание разработчиков к решению этой актуальной проблемы.

В результате, к настоящему времени разработано достаточно большое количество методов и соответствующих приборов, в рекламных материалах, по которым работникам энергосистем, электростанций и электросетевых предприятий разобраться очень непросто.

Цель настоящей статьи – провести классификацию методов диагностики механического состояния ОСИ в условиях эксплуатации, уточнить возможность и область применения этих методов (см. рис.).



Рассмотрим особенности и области применения каждого из методов более подробно.

Визуальный контроль позволяет при внешнем осмотре (в том числе и под напряжением) выявить около половины наружных трещин ОСИ. Эффективность такого контроля может быть повышена за счет сосредоточения внимания на изоляторах «группы риска», выделяемых по результатам обследования другими методами контроля, а также с учетом статистики отказов. Визуальный контроль изоляторов «группы риска» с целью выявления малозаметных трещин фарфора необходимо производить при любой возможности и с особой тщательностью.

При проведении визуального осмотра особое внимание следует уделять изоляторам, статистика отказов которых является неблагоприятной.

Ультразвуковая импульсная дефекто- и структурометрия ОСИ на монтаже и в эксплуатации разработана в АООТ НИИ Электрочерепица, г. Санкт-Петербург. Ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗНК) позволяет выявлять наиболее распространенные дефекты производственного и эксплуатационного происхождения в фарфоровых ОСИ, как смонтированных, (при отключенном напряжении), так и россыпью. Могут контролироваться изоляторы, смонтированные в аппараты на любые классы напряжений (имеется опыт УЗНК ОСИ в аппаратах на 35, 110, 330, 500, 750 кВ). Могут контролироваться ОСИ, смонтированные в разъединителях, «треногах» выключателей, шинных мостах, стойках.

Аппаратурное обеспечение изоляторов базируется на серийном дефектоскопе общего назначения УД2-12 с рядом специально разработанных датчиков и приспособлений [4].

Наиболее важным дефектом фарфоровых изоляторов, выявляемым с помощью УЗНК, является открытая микроскопическая пористость (ОМИП) фарфорового тела изолятора — дефект, в настоящее время ответственный за основную часть разрушений изоляторов по вине изготовителей [6]. ОМИП имеет чисто производственное происхождение, ввиду чего ультразвуковая структурометрия должна проводиться на заводе-изготовителе изолятора.

Действующие стандарты на высоковольтный электрофарфор требуют полного отсутствия ОМИП по всему объему изолятора, однако в силу недостаточного объема контрольных проверок в процессе производства количество изделий с ОМИП, поступающих в эксплуатацию, достаточно велико и составляет от 5 до 10 % к общему числу установленных.

УЗНК изоляторов в эксплуатационных условиях позволяет выявлять макроскопические дефекты производственного характера «опасных» сечений и дефекты, возникающие в эксплуатации из-за впитывания влаги в зоны ОМИП.

Браковочные критерии УЗНК (особенно по дефекту ОМИП) устанавливаются для изоляторов данного «класса» (т.е. данного типа, завода-изготовителя и периода выпуска), с учетом особенностей технологии их изготовления и статистики отказов в эксплуатации.

Эксплуатационный УЗНК изоляторов не рассчитан на выявление околоповерхностных макроскопических дефектов, а при УЗНК ОСИ — на выявление дефектов ствольной части изоляторов (т.е. вне зоны «опасных» сечений и оконечностей); УЗНК не рассчитан также на выявление усталостных дефектов в качественно изготовленных изоляторах.

Метод фуксиновой пробы

Для установления и корректировки браковочных критериев по дефекту ОМИП используется метод фуксиновой пробы под давлением (ФПД), на образцах, отобранных из разрушенных изоляторов [4,6]. Метод ФПД нормирован действующими стандартами на

высоковольтный электрофарфор и необходим также для предъявления рекламаций изготовителям изоляторов с ОМИП.

АООТ НИИЭК разработан переносной вариант установки для испытаний образцов фарфора методом ФПД — цилиндр высокого давления, позволяющий в эксплуатационных условиях проводить испытания в полном соответствии с требованиями стандартов на высоковольтный электрофарфор (ГОСТ 5862, ГОСТ 9984, ГОСТ 26093). Масса установки ЦВД-250-3 — 15 кг, рабочий объем камеры 500 мл, давление 150-250 атм.

Метод регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) позволяет:

- выявлять опасные (растущие в процессе силового нагружения) дефекты ОСИ и покрышек, (вне зависимости от места расположения дефектов) на монтаже и при ремонтах;
- то же в эксплуатации на отключенных ОСИ, смонтированных в одноколонковых разъединителях 35, 110 и 220 кВ.

Существенной особенностью предлагаемого варианта АЭ-контроля является невысокий уровень потребного силового воздействия (не более 40% от величины минимальной разрушающей нагрузки, нормированной для данного типа изоляторов). Этого удалось добиться за счет использования оригинальной методики испытаний, основанной на регистрации дефекта с учетом так называемого «эффекта Кайзера» при повторном нагружении дефектного изолятора [5].

С учетом методики регистрации сигналов АЭ во ВНИИ Электроэнергетики разработаны и на предприятии «Сигма - /О/» производится прибор ПАК-3М с универсальным нагружающим устройством УКИ-1[5].

В предлагаемом варианте аппаратно-методического обеспечения предусмотрена возможность нагружения ОСИ к центру и от центра полюса разъединителя и соответствующего нагрузкам, действующим при эксплуатации [6].

Метод АЭ позволяет выявлять в изоляторах усталостные повреждения. Имеется опыт отбраковки большого количества ОСИ методом АЭ, эксплуатировавшихся в условиях сильного обледенения проводов, причем направление «бракующего» силового воздействия коррелировало с направлением нагружения.

Метод АЭ целесообразно регулярно применять на изоляторах, эксплуатируемых в тяжелых режимах, имеющих длительный срок эксплуатации, неблагоприятную статистику отказов. В любом случае следует производить регистрацию сигналов АЭ при любых механических испытаниях ОСИ и гидравлических испытаниях покрышек.

Применительно к ОСИ, в соответствии с Циркуляром Ц-01-01 (Э) от 14.05.2001 г. «О предупреждениях поломок опорно-стержневых изоляторов разъединителей 110-220 кВ», акустико-эмиссионному контролю должны подвергаться:

- вновь поступающие на энергопредприятия изоляторы 110 кВ серии ИОС (как в составе разъединителей 110-220 кВ, так и отдельных партий);
- изоляторы любых типов по истечении гарантийного срока на разъединители 110-220 кВ;
- изоляторы любых типов при проведении среднего ремонта разъединителей 110-220 кВ;
- изоляторы любых типов при обнаружении на них сколов фарфора, дефектов армировочных швов или контактной системы разъединителя, которые могли бы привести к

снижению механической прочности изоляторов и (или) к существенному увеличению нагрузок на них;

- изоляторы, отобранные из резерва (после длительного хранения) для замены.

Контроль методом АЭ не рассчитан на выявление ОМИП, а также иных дефектов, неразвивающихся в процессе силового испытательного нагружения изолятора.

Как показали результаты проведенных обследований ОСИ с помощью УЗНК и АЭ контроля с участием представителей АОТ НИИ ЭК и АО ВНИИЭ, эти методы хорошо дополняют друг друга [6].

Методика и аппаратура АЭ контроля ОСИ получили широкое распространение на электрических станциях и подстанциях РФ.

Наибольший опыт применения метода АЭ и аппаратуры ПАК-3М и УКИ-1 накоплен в «Челябэнерго», «Ростовэнерго», «Курганэнерго», «Вологдаэнерго». В связи с имеющимся положительным эффектом применения АЭ-контроля в электроэнергетике, проявлен интерес и начато применение метода и аппаратуры на энергетических объектах МПС, РАО «Газпром», Росатомэнерго, Минавтопрома.

В качестве иллюстрации можно привести подход и результаты использования метода и АЭ аппаратуры в ОАО «Челябэнерго», которое внедряет метод АЭ контроля изоляторов с 1989 г.[7]. Ежегодно каждым прибором АЭ контроля проверяется около 500-600 изоляторов. Кроме того, проверяются резервные изоляторы, находящиеся на складе подстанций. Работы по АЭ контролю изоляторов проводятся по технологической карте или ППР (ПТБ п. 3.2.4.) с оформлением допуска по наряду.

Процент отбраковки от числа испытанных составляет в среднем 4 %. Первоначальный процент отбраковки был в пределах 16 % (1989-1994 гг.). При повторном испытании изоляторов через 4 года дефектов не зафиксировано.

Из опыта работы АО «Челябэнерго» следует, что для соответствующих этой энергосистеме климатических условий, нагрузкам и состоянию оборудования периодичность обследований составляет 1 раз в 4 года. Почти все случаи разрушения изоляторов и браковки прибором ПАК-3М приходится в основном на 10-15-й год эксплуатации изоляторов, что подтверждается [3]. В настоящее время идет отбраковка изоляторов, изготовленных в 1980-1985гг. Достоверность выявления бракованных изоляторов, по мнению специалистов ОАО «Челябэнерго», является высокой.

Аналогичен подход к использованию метода и аппаратуры АЭ в ОАО «Ростовэнерго». Более того, в этой энергосистеме на основании результата обследований методом АЭ принимается решение о продлении срока службы изоляторов и, соответственно, получается значительная экономическая выгода без снижения надежности эксплуатации изоляторов.

**Технологическая карта на испытание акустико-эмиссионным методом
опорно-стержневых изоляторов в составе разъединителя**

Состав бригады	Условия труда и меры безопасности
1. Инженер 2. Электрослесарь 5 разряда	1. Произвести необходимые отключения. 2. Работы выполнять в обязательном порядке по наряду. 3. Убедиться в надежности настила и целостности изоляторов. 4. Расположить прибор ПАК-3М на расстоянии более 3 м. 5. Использовать испытанные страховочные канаты, соответствующие весу изолятора ИОС. 6. Исключить нахождение членов бригады и посторонних в зоне возможного падения изоляторов.
Число испытателей	Приборы, приспособления и защитные средства
1. На испытание одного разъединителя в соответствии с требованиями техники безопасности требуется 2 человека	1. Устройство УКИ-1. 2. Прибор ПАК-3 М 3. Деревянный настил шириной 80 см. 4. Лестница. 5. Страховочный канат длиной 3 м 6. Защитные каски.
Последовательность операций	
1. Оформление наряда, допуск бригады. 2. Развести губки разъединителя до начала размыкания. 3. Установить деревянный настил и лестницу. 4. Закрепить головки разъединителя страховочным канатом. 5. Установить распорное динамическое устройство между верхними шейками (или оголовниками) опорных изоляторов полюса разъединителя. 6. На нижних шейках изоляторов закрепить пьезодатчики и соединить их с прибором. 7. Подключить прибор и проверить работоспособность его согласно инструкции. 8. Произвести замер согласно инструкции.	<div style="text-align: center;"> </div> 1. Прибор УКИ-1 2. Страховочный канат. 3. Датчики прибора ПАК-3М. 4. Прибор ПАК-3М
Контрольные параметры	
При повторной нагрузке, составляющей 0,9 от первоначальной в 44% от минимального разрушающего усилия, количество импульсов не должно превышать допустимого порога, в противном случае изолятор бракуется.	

Помимо указанных 4-х методов, подтвердивших свою эффективность на практике, заслуживают внимания следующие методы:

Звуковые и низкочастотные ультразвуковые методы

К звуковым и низкочастотным ультразвуковым методам относятся: метод сквозного прозвучивания, свободных колебаний, вибрационный (резонансный). Эти методы принципиально позволяют выявлять лишь достаточно крупные дефекты, размер которых сопоставим с размером поперечного сечения изолятора. Такие дефекты, как правило, «прорастают» на поверхность изолятора и могут быть выявлены визуально.

Сквозное прозвучивание на частотах 4-10 кГц реализовано в приборе ПАК-2 и его последующих модификациях («МЕТАКОН», «МЕТАКОН-ЭКСПРЕСС»), г. Томск. Акустический импульс возбуждают в контролируемом изоляторе с помощью фиксированного удара, и после прохождения импульса через изолятор принимают датчиком с резонансной частотой около 150 кГц, т.е. прозвучивание ведется в нерезонансной области. Возникающая при ударе сферическая волна проходит через изолятор, принимается датчиком с преусилителем и передается на пиковый вольтметр, фиксирующий максимальную амплитуду принятого сигнала. В случае если на пути сферической волны окажется дефект достаточно большого размера, амплитуда принятого сигнала может измениться (или уменьшиться или возрасти) в зависимости от взаимного расположения датчика и точки ввода акустического импульса.

Приборы «МЕТАКОН» и «МЕТАКОН-ЭКСПРЕСС» отличаются от исходного прибора ПАК-2 лишь системой регистрации и обработки результатов испытаний при сохранении принципиальной схемы метода и системы браковочных критериев.

Однако сколь угодно совершенная система обработки не может восполнить низкую достоверность обнаружения дефектов, присущих фарфоровым изоляторам и которая является принципиальной особенностью данного метода.

Указанное обусловлено следующим: частотам 4-10 кГц соответствуют длины звуковых волн в фарфоре 1,4-0,6 м, что при использовании метода сквозного прозвучивания в принципе позволяет выявить дефекты размером около 10 см и более; если же заметно сдвинуть границы частотного диапазон данного метода в сторону увеличения частот, исчезнет возможность возбуждения прозвучивающего импульса в любой произвольно выбранной точке изолятора, что сведет метод к обычному направленному сквозному прозвучиванию, используемому как один из вариантов УЗНК [4,6].

Опыт опробования приборов ПАК-2 и «МЕТАКОН» для контроля ОСИ на монтаже и в эксплуатации (в том числе и сотрудниками АО ВНИИЭ и АОТ «НИИЭК») показал, что он позволяет выявлять главным образом видимые трещины, и то не во всех случаях.

Из вышесказанного следует, что приборы ПАК-2М и «МЕТАКОН» принципиально отличаются от прибора ПАК-3М, т. к. не используют АЭ-метод и, соответственно, не могут влиять на внутренние развивающиеся трещины в теле ОСИ.

Контактный метод свободных колебаний реализован в приборах серии «Звук», разработанных ВНИИАШ (г. Санкт-Петербург) и с успехом применяемых для контроля абразивных кругов. Применительно к ОСИ испытания данным методом проводятся на частотах около 20 кГц, что, как показал опыт опробования прибора «Звук-202» на изоляторах ИОС-110-1250, для выявления характерных дефектов фарфоровых изоляторов явно недостаточно.

Оригинальный вариант метода свободных колебаний предложен АО «Волгоградэнергоремналадка». В отличие от других низкочастотных методов, он может

применяться на изоляторах, находящихся под напряжением. Свободные колебания в контролируемом изделии возбуждают ударом изолированной штангой либо пулей из пневматического ружья; прием колебаний ведется с помощью направленного микрофона, результаты сопоставляются с базой данных с помощью компьютера. Реальная эффективность этого метода должна быть установлена специальным исследованием. В любом случае методом могут быть выявлены лишь достаточно крупные дефекты. Например, это могут быть малозаметные наружные трещины, не выявляемые при осмотре с земли.

Вибрационный метод является одним из вариантов резонансного метода и сводится к определению резонансной частоты испытуемых конструкций в режиме вынужденных колебаний (а не свободных колебаний). Вибрационный метод успешно применяется для контроля конструкций, имеющих вращающиеся детали. С точки зрения возможности выявления дефектов изоляторов нет существенной разницы между вибрационным методом и методом свободных колебаний.

Ультразвуковой резонансный метод успешно применяется для измерений толщины и выявления расслоений в конструкциях простой формы, имеющих малую толщину (оболочки, пластины и т.п.), для которых резонансная частота ультразвуковых колебаний может достигать сотен килогерц и даже единиц мегагерц, что и обеспечивает высокую чувствительность резонансного метода к дефектам этих конструкций. Для контроля изоляторов ультразвуковой резонансный метод (ультразвуковая толщинометрия) малопригоден в силу их сложной формы и относительно больших размеров.

Помимо методов, позволяющих оценить непосредственно механическое состояние фарфоровой высоковольтной изоляции, существуют методы позволяющие судить об этом, по совокупности смежных характеристик изоляторов.

В качестве таковых можно отметить следующие методы:

- тепловые методы контроля;
- методы, основанные на выявлении коронного и частичных разрядов;
- методы, основанные на определении влагосодержания фарфора.

Рассмотрим эти методы также несколько более подробно.

Тепловые методы контроля

Для выявления отдельных дефектных изоляторов может оказаться полезным тепловизионный контроль (ТВК) изоляторов, находящихся под рабочим напряжением. Примером известного успешного применения ТВК для контроля стационарной фарфоровой изоляции может служить случай выявления ОСИ с сильнейшей ОМИП, заметно (на 2 порядка) снизившего сопротивление изоляции из-за впитывания влаги, но при этом не разрушившегося и не растрескавшегося [6]. Однако, такие случаи достаточно редки. Кроме того, даже для таких изделий трудно рассчитывать на их выявление методами ТВК, если изолятор установлен не в одноэтажной колонке.

Возможность выявления методом ТВК изделий, разогревающихся за счет появления токов утечки, возникающих на наружных (магистральных) трещинах и в зонах с ОМИП без заметного снижения общего сопротивления изоляции изделия, представляется возможной, особенно при погодных условиях с повышенной влажностью воздуха и выпадением осадков.

Методы, основанные на выявлении коронного и частичных разрядов

Малоэффективны, судя по всему, и методы, основанные на попытках выявления электромагнитной (например, прибор «Филин-5») либо акустической (например, прибор «ULTRAPROBE-2000») составляющих коронного разряда (КР), возникающих на наружных трещинах, хотя отдельные случаи выявления дефектных изоляторов могут иметь место (см. материал фирмы «Диагност» по испытанию изолятора СТ-110 с видимой трещиной в верхней части с помощью прибора «ULTRAPROBE-2000»). Видимо, маловероятно само появление КР, по крайней мере, для ОСИ, смонтированных в двух- и многоэтажных колонках (см. [6], где описан негативный результат обследования 4000 штук ОСИ, смонтированных в многоэтажных колонках, из которых более 100 штук ОСИ имели видимые трещины, прибором «Филин-5», выявляющим ультрафиолетовую составляющую коронного разряда). Тем не менее, с учетом высокой производительности этих методов, представляется целесообразным подробнее исследовать их возможности, в том числе путем стендовых испытаний ранее забракованных изоляторов.

Метод выявления водонаполненного фарфора

В процессе эксплуатации значительный процент повреждений возникает из-за проникновения воды в тело фарфорового изолятора, имеющего технологический производственный дефект типа ОМИП. При понижении температуры вода, попавшая в тело изолятора, замерзает, происходит увеличение объема льда и увеличение размера полости со льдом. Таким образом, имеющийся механический дефект будет увеличиваться с нарушением механической целостности фарфора.

На сегодняшний день на образцах фарфора массой до нескольких килограммов, с различной водонаполненностью (от 0 до 4% по объему) был успешно опробован экспериментальный образец измерителя влажности фарфора, разработанный АО ВНИИЭ, г. Москва.

Этот метод, в случае подтверждения его эффективности, будет хорошо сочетаться с УЗНК-структурометрией, выявляя изделия, не только имеющие развитую ОМИП, но и уже впитавшие влагу в тело фарфора, т. е. требующие немедленной замены.

АО ВНИИЭ и АО ОТ «НИИЭК» планируют совместные исследования в данной области, а в дальнейшем — разработку методики эксплуатационного контроля влагосодержания в фарфоре. Основной проблемой является исследование возможности ранней диагностики водонаполненности фарфоровых изоляторов, армированных металлическими фланцами.

Выводы

1. На сегодняшний день в эксплуатации наибольшее применение получили два взаимодополняющих метода:

- метод регистрации сигналов акустической эмиссии при силовом нагружении изоляторов – разработка АО ВНИИЭ, г. Москва.

- метод ультразвукового неразрушающего контроля (УЗНК) в двух основных вариантах (дефекто- и структурометрия) – разработка АООТ «НИИЭК», г. Санкт-Петербург.

Эти методы и разработанные на их основе приборы уже подтвердили свою эффективность на практике.

2. Многообразие других методов и технических средств контроля механического состояния ОСИ подтверждает актуальность проблемы в целом и стимулирует к поиску новых путей ее решения. Для выбора наиболее перспективных из них необходим тщательный анализ этих методов, сравнительные испытания, а также анализ опытной эксплуатации предлагаемых приборов. Это даст возможность энергосистемам выбрать для практического применения наиболее эффективные методы и приборы и, в конечном итоге, повысить надежность работы разъединителей.

Литература.

1. Основные концептуальные подходы к реконструкции и техническому перевооружению электрических сетей. Программа технического перевооружения электрических сетей РАО «ЕЭС России» на 2001-2005 г.г. М., РАО «ЕЭС России», 2000 г.

2. Сводный технический отчет по итогам отраслевых мероприятий по сбору информации, анализу и обобщению состояния электротехнического оборудования энергосистемы России. Приказ РАО «ЕЭС России» от 08.12.98 г. № 249, М. РАО «ЕЭС России», 1999 г.

3. Циркуляр РАО «ЕЭС России» Ц-01-01 (Э) от 14.05.2001 г. «О предупреждении поломок опорно-стержневых изоляторов разъединителей 110-220 кВ».

4. Шейкин А.А. Контроль качества изделий из высоковольтного электрофарфора на производстве. Сборник материалов 2-го семинара “Диагностика технического состояния фарфоровых изоляторов высоковольтных коммутационных аппаратов”, М., ВНИИЭ, 27-29 октября 1999 г.

5. Аронштам Ю.Л., Демин А.Н. Методика акустико-эмиссионного контроля фарфоровых изоляторов разъединителей 110-220 кВ. Труды международной научно-технической конференции “Изоляция-99”, С-Пт, 15-18 июня 1999 г.

6. Омельченко Ю.А., Шейкин А.А. Контроль качества изделий из высоковольтного электрофарфора на монтаже и в эксплуатации. Сборник материалов 2-го семинара “Диагностика технического состояния фарфоровых изоляторов высоковольтных коммутационных аппаратов”, М., ВНИИЭ, 27-29 октября 1999 г.