

# Обзор методов неразрушающего контроля прочности керамических опорно-стержневых изоляторов и покрышек выключателей

В. И. Емельянов, С. С. Комар  
НПО «Логотех»

Достаточно серьёзной отраслевой проблемой остаётся большое количество выходов из строя керамических опорно-стержневых изоляторов и покрышек выключателей на подстанциях 35 – 500 кВ. Своевременный и эффективный контроль состояния прочности керамических опорно-стержневых изоляторов и покрышек выключателей позволяет снизить частоту аварийных ситуаций, оптимально планировать работы по обслуживанию и ремонту оборудования, снизить экономические затраты.

Для выполнения изоляционных функций изолятор должен сохранять:

- *электрическую прочность;*
- *механическую прочность.*

Эффективная методика контроля прочности изолятора должна удовлетворять следующим требованиям:

- *безопасность выполнения работ;*
- *регулярность выполнения работ;*
- *наименьшее влияние на исходные свойства и характеристики объекта при выполнении работ;*
- *высокая информативность результатов о состоянии объекта;*
- *наименьшие требования к квалификации исполнителей работ;*
- *наименьшие удельные трудозатраты на выполнение работ при высокой производительности;*
- *экономическая целесообразность выполнения работ.*

Снижение диэлектрических свойств изоляторов в большинстве случаев вызывается поверхностными нарушениями изоляции (загрязнение, наружные сколы и трещины). При этом изолятор сохраняет механическую прочность.

Снижение механических свойств изоляторов в большинстве случаев вызывается скрытыми разрушениями изоляторов. При этом изолятор может продолжительно сохранять электрическую прочность до момента своего полного разрушения.

Определение прочности керамических изоляторов в условиях эксплуатации теоретически возможно при использовании следующих видов неразрушающего контроля согласно ГОСТ Р 56542-2015 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов»:

- *электрический;*
- *радиоволновой;*
- *радиационный;*
- *проникающими веществами;*
- *тепловой;*
- *оптический;*
- *акустический.*

Электрический неразрушающий контроль основан на анализе параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом или возникающим в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия.

Для выполнения электрического неразрушающего контроля прочности изоляторов используют следующие способы:

- *регистрация электромагнитной активности поверхностных коронных и частичных разрядов и локация зон разрядов на поверхности изолятора;*
- *измерение напряжённости электрического поля вдоль поверхности изолятора.*

Методы электрического неразрушающего контроля применяют только для изоляторов в составе высоковольтного оборудования и при наличии рабочего напряжения.

Электрический неразрушающий контроль в большинстве случаев выявляет дефекты, связанные с нарушением электрической прочности изолятора. В некоторых случаях выявляются критические дефекты, связанные с нарушением механической прочности изолятора.

Радиоволновой неразрушающий контроль основан на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом.

Проникающие свойства радиоволн сантиметрового и миллиметрового диапазонов, позволяют обнаруживать дефекты на поверхности изделий из неметаллических материалов. Радиоволновой контроль из-за малой проникающей способности микрорадиоволн не позволяет выявлять скрытые повреждения изолятора и имеет низкую эффективность.

Радиационный неразрушающий контроль основан на анализе параметров проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом и позволяет выявлять скрытые дефекты, как в фарфоровом теле изолятора, так и в армировочном шве с высокой точностью. Использование метода позволяет выполнять контроль механической прочности изолятора. Существуют портативные источники излучения, методы регистрации прошедшего излучения, но их применение пока ещё широко не распространено. Метод может быть использован для входного контроля изоляторов, поступающих в эксплуатацию.

Неразрушающий контроль проникающими веществами основан на проникновении веществ в полости дефектов контролируемого объекта и осуществляется с целью обнаружения открытой пористости, поверхностных и сквозных трещин.

Применение данного вида неразрушающего контроля требует определённых условий и длительного времени для проникновения реактивов. Одним из способов применения метода является контроль герметичности покрышек (течеискание). Данный способ контроля имеет низкую производительность, позволяет выявлять сквозные дефекты, при этом нарушение электрической или механической прочности напрямую не оценивается, но может быть установлено косвенно по факту наличия сквозных дефектов.

Метод используют для входного контроля изоляторов, поступающих в эксплуатацию.

Тепловой неразрушающий контроль (так называемый «тепловизионный») основан на анализе параметров тепловых полей контролируемых объектов и осуществляется с целью определения очагов локального нагрева на поверхности изолятора, вызванных снижением диэлектрических свойств изолятора в результате загрязнений, поверхностных сколов и крупных трещин.

Тепловой неразрушающий контроль может быть выполнен дистанционно, но только для изоляторов в составе высоковольтного оборудования и при наличии рабочего напряжения. Для эффективной работы средств теплового неразрушающего контроля требуются определённые благоприятные условия внешней среды.

Тепловой неразрушающий контроль в большинстве случаев выявляет дефекты, связанные с нарушением электрической прочности изолятора. В некоторых случаях выявляются критические дефекты, связанные с нарушением механической прочности изолятора.

Оптический неразрушающий контроль основан на регистрации параметров собственного оптического излучения исследуемого объекта и осуществляется с целью определения нарушений на поверхности изолятора (загрязнения, сколы, крупные трещины на поверхности и прочее).

При оптическом неразрушающем контроле прочности изоляторов используют следующие методы:

- *визуально-оптический метод*;
- *метод рассеянного излучения*;
- *рефлектометрический метод*.

**Визуально-оптический метод** контроля в видимом диапазоне светового спектра может быть выполнен дистанционно с помощью оптических приборов независимо от наличия рабочего напряжения и нахождения изолятора в составе оборудования, но требует достаточного уровня освещённости объекта. При этом выявляются только загрязнения и крупные наружные повреждения.

**Метод рассеянного излучения** (так называемый «электронно-оптический контроль») основан на регистрации характеристик волн или потока частиц, рассеянных от дефекта или поверхности раздела двух сред.

При контроле прочности изоляторов указанным методом используют анализ характеристик оптических волн ультрафиолетового диапазона светового спектра, возникающих от газовых разрядов при активности поверхностных коронных и частичных разрядов.

Оптический неразрушающий контроль в ультрафиолетовом диапазоне светового спектра может быть выполнен дистанционно, но только для изоляторов в составе высоковольтного оборудования и при наличии рабочего напряжения. Для эффективной работы средств контроля требуются определённые благоприятные условия внешней среды.

При этом в большинстве случаев выявляются дефекты, связанные с нарушением электрической прочности изолятора. В некоторых случаях выявляются критические дефекты, связанные с нарушением механической прочности изолятора.

**Рефлектометрический метод** основан на регистрации интенсивности светового потока, отражённого от изделия.

Контроль рефлектометрическим методом может быть выполнен дистанционно с использованием проходящего или отражённого излучения от внешнего источника независимо от наличия рабочего напряжения.

В диагностике высоковольтного оборудования нашли применение инфракрасные дефектоскопы для обнаружения утечек элегаза. Принцип действия таких дефектоскопов основан на свойстве элегаза поглощать инфракрасное излучение определённой длины волны.

В этом случае регистрируется нарушение герметичности покрышек элегазового выключателя, при этом нарушение электрической или механической прочности напрямую не оценивается, но может быть установлено косвенно по факту наличия сквозных дефектов.

Достаточно распространённым в энергетике является акустический неразрушающий контроль, основанный на анализе параметров упругих волн, возбуждаемых или возникающих в контролируемом объекте.

При акустическом неразрушающем контроле прочности изоляторов используют следующие методы:

- *акустико-ультразвуковой метод;*
- *акустико-эмиссионный метод;*
- *метод свободных колебаний;*
- *резонансный метод.*

**Акустико-ультразвуковой метод** (так называемый «УЗНК») основан на анализе параметров прошедшего и отражённого ультразвукового излучения, воздействующего на объект и исследует структуру материала объекта на наличие дефектов.

Акустико-ультразвуковой метод позволяет обнаруживать поверхностные и глубинные дефекты с различной ориентировкой. При некоторых условиях достаточно точно определяются размеры и координаты дефекта, такие как глубина залегания и положение в исследуемом объекте.

Применение определённых алгоритмов анализа позволяет оценить состояние электрической и механической прочности изоляторов. Метод имеет хорошую достоверность, но невысокую производительность.

Акустико-ультразвуковой метод в условиях эксплуатации изоляторов может быть применён только при отключенном рабочем напряжении, а в большинстве случаев требуется демонтаж изоляторов. Существует ряд условий, при которых реализация метода для армированных изоляторов становится сложной в полевых условиях:

- *повышенные требования к поверхности, на которую устанавливаются преобразователи;*
- *невозможность качественного прозвучивания изолятора в аксиальном направлении с торцовых поверхностей опорно-стержневых изоляторов, так как они закрыты фланцами, и имеются поверхности раздела разных материалов;*
- *невозможность качественного прозвучивания изолятора в радиальном направлении в районе фланцев из-за наличия поверхностей раздела различных материалов;*
- *для качественного прозвучивания изолятора в радиальном направлении в опасных сечениях требуется набор специфических преобразователей с определённым радиусом кривизны контактной поверхности.*

Тем не менее, при квалифицированном применении указанный метод является достаточно эффективным для входного контроля прочности изоляторов, поступающих в эксплуатацию.

**Акустико-эмиссионный метод** основан на анализе параметров упругих волн акустической эмиссии.

При контроле прочности изоляторов акустико-эмиссионный метод реализуют следующими способами:

- *контроль акустической эмиссии утечки в ультразвуковом диапазоне свыше 20 кГц, возникающей от истечения газов под давлением через малые сквозные дефекты;*

- *контроль акустической эмиссии газовых разрядов в ультразвуковом диапазоне свыше 20 кГц, возникающих от активности поверхностных коронных и частичных разрядов;*
- *контроль акустической эмиссии материала в частотном диапазоне до 20 кГц при силовом нагружении объекта исследования.*

*Контроль акустической эмиссии утечки* основан на регистрации волн ультразвукового диапазона, возникающих в процессе истечения газов под давлением через малые сквозные дефекты покрышек.

Контроль акустической эмиссии утечки позволяет дистанционно выполнять проверку герметичности покрышек элегазовых выключателей независимо от наличия рабочего напряжения. Для регистрации ультразвуковых акустических волн применяют высокочувствительный направленный микрофон. Эффективность способа снижается при наличии внешних акустических помех от работающего оборудования.

Способ позволяет выявить дефекты герметичности, при этом нарушение электрической или механической прочности напрямую не оценивается, но может быть установлено косвенно по факту наличия сквозных дефектов.

*Контроль акустической эмиссии газовых разрядов* в ультразвуковом диапазоне, возникающих от активности поверхностных коронных и частичных разрядов, может быть выполнен дистанционно, но только для изоляторов в составе высоковольтного оборудования и при наличии рабочего напряжения.

Для регистрации ультразвуковых акустических волн применяют высокочувствительный направленный микрофон. Эффективность способа снижается при наличии внешних акустических помех от работающего оборудования.

В большинстве случаев выявляются дефекты, связанные с нарушением электрической прочности изолятора. В некоторых случаях выявляются критические дефекты, связанные с нарушением механической прочности изолятора.

*Контроль акустической эмиссии материала* изолятора (так называемый «акустико-эмиссионный контроль») основан на эффекте Кайзера (снижение уровня сигналов акустической эмиссии вплоть до полного прекращения их регистрации при повторных циклах нагружения, пока не превышен уровень предварительно приложенной нагрузки).

Для силового нагружения опорно-стержневого изолятора применяют достаточно массивное приспособление, при монтаже которого на изоляторы, установленные на разъединителях, требуется подъём на высоту. Для силового нагружения покрышки применяют гидравлическую аппаратуру высокого давления, монтаж которой требует частичной разборки выключателя.

Регистрацию акустической эмиссии выполняют контактными микрофонными датчиками, монтаж которых требует определённую подготовку поверхностей и достаточную квалификацию персонала.

При применении указанного способа требуется отключение рабочего напряжения, а в некоторых случаях требуется демонтаж изоляторов.

Способ оценивает механическую прочность изоляторов, имеет хорошую достоверность, но низкую производительность.

Указанный способ применяют при средних и капитальных ремонтах разъединителей, но при этом значительно увеличиваются трудозатраты.

В процессе нагружения возможно непрогнозируемое разрушение дефектного изолятора.

**Метод свободных колебаний** основан на регистрации параметров свободных механических колебаний, возбуждённых в контролируемом объекте.

Метод свободных колебаний обеспечивает контроль механической прочности изоляторов.

Возбуждение свободных колебаний выполняют нормированными ударами по изолятору. Регистрацию свободных колебаний выполняют как контактными датчиками, так и дистанционным способом. Состояние механической прочности изолятора определяют по частотному спектру вынужденных свободных колебаний.

На сегодняшний день производители диагностического оборудования предлагают четыре способа реализации метода.

Способы, требующие отключения рабочего напряжения и подъём на высоту:

- *возбуждение колебаний контактными ударниками, регистрация колебаний контактными датчиками;*
- *дистанционное возбуждение колебаний, дистанционная регистрация колебаний лазерным лучом по смещению датчика или контрольного индикатора, устанавливаемого на изоляторе.*

Способы, не требующие отключения рабочего напряжения:

- *дистанционное возбуждение колебаний, дистанционная регистрация колебаний высокочувствительным направленным микрофоном – существует высокая чувствительность приёмного датчика к внешним помехам от работающего оборудования;*
- *дистанционное возбуждение колебаний, дистанционная регистрация колебаний лазерным лучом по смещению контрольной точки без установки индикаторов – требуется применение высокоточного лазерного оборудования с высокой стоимостью (более \$100000).*

**Резонансный метод** акустического неразрушающего контроля основан на регистрации параметров резонансных механических колебаний, возбуждённых в контролируемом объекте.

Резонансный метод обеспечивает контроль механической прочности изоляторов.

Возбуждение резонансных механических колебаний выполняют воздействием на изолятор механической вибрацией. Состояние механической прочности изолятора определяют по частотному спектру зарегистрированных вынужденных резонансных механических колебаний изолятора.

На сегодняшний день в мировой практике существует единственный способ реализации метода, который разработан и внедрён специалистами НПО «Логотех».

Технология контроля механической прочности изоляторов по методике НПО «Логотех» состоит из выполнения следующих задач:

- 1) мониторинг параметров вынужденных резонансных колебаний изолятора;
- 2) анализ частотных характеристик вынужденных резонансных колебаний изолятора и постановка диагноза.

Резонансные колебания изолятора возбуждают воздействием внешней случайной вибрации с плоским спектром типа «белый шум» от контактного виброизлучателя, установленного на фланце изолятора, регистрируют контактными вибродатчиками. Виброизлучатель и вибродатчик совмещены в едином регистрирующем приборе, который перемещается оператором к месту контакта дистанционными электроизолирующими приспособлениями.

Мониторинг параметров вынужденных резонансных колебаний керамических опорно-стержневых изоляторов выполняют независимо от наличия рабочего напряжения, без подъёма на высоту и без демонтажа оборудования.

Производительность мониторинга под рабочим напряжением имеет высокие показатели даже при минимальной подготовке персонала и снижается только при наличии труднопроходимого снежного покрова.

Данные мониторинга накапливаются во внутренней памяти регистрирующего прибора и передаются для анализа на стационарный компьютер, ноутбук или планшет.

Анализ частотных характеристик вынужденных резонансных колебаний изолятора выполняют с использованием специализированного программного обеспечения.

Для постановки диагноза используют нормированные параметры частотных характеристик вынужденных резонансных колебаний изолятора и сравнение частотных характеристик, зарегистрированных в различные промежутки времени.

Методика НПО «Логотех» для контроля механической прочности керамических опорно-стержневых изоляторов под рабочим напряжением имеет следующие особенности:

- *безопасность выполнения работ – при мониторинге параметров вынужденных резонансных колебаний изолятора не требуется производство работ на высоте, контакт регистрирующего прибора с изолятором происходит на заземлённых элементах конструкции при отсутствии потенциала, контакт оператора с регистрирующим прибором происходит через электроизолирующие средства защиты, анализ данных мониторинга выполняется с использованием компьютерного оборудования на любом безопасном рабочем месте;*

- *регулярность выполнения работ – мониторинг параметров вынужденных резонансных колебаний изолятора выполняется при температуре воздуха от минус 30 °С до +50 °С, средства контроля не требуют внешнего питания;*

- *отсутствие влияния на исходные свойства и характеристики изолятора – энергия вибрационного воздействия на изолятор достаточно низкая;*

- *высокая информативность результатов о состоянии изолятора – результаты мониторинга представляются в графическом виде, анализ графиков выполняют по точным алгоритмам;*

- *невысокие требования к квалификации исполнителей работ – приёмы мониторинга и основы анализа параметров вынужденных резонансных колебаний изолятора могут быть освоены как инженерно-техническим персоналом, так и персоналом ремонтных бригад при краткосрочном обучении;*

- *низкие удельные трудозатраты на выполнение работ при высокой производительности – для мониторинга параметров вынужденных резонансных колебаний изолятора не требуется отключение оборудования, демонтаж изоляторов или производство работ на высоте, мониторинг выполняется двумя исполнителями и имеет производительность от 90 до 600 изоляторов за одну рабочую смену, анализ данных мониторинга выполняется одним исполнителем и имеет производительность от 240 до 600 изоляторов за одну рабочую смену, полный цикл работ с выдачей заключения на месте обследования выполняется двумя исполнителями и имеет производительность от 90 до 300 изоляторов за одну рабочую смену.*

- *экономическая целесообразность выполнения работ – при низких трудозатратах и регулярности обследований обеспечивается своевременный вывод из эксплуатации аварийных изоляторов, эффективное и оптимальное планирование ремонтных работ, исходя из фактического состояния оборудования.*

Следует заметить, что ни один из перечисленных способов контроля прочности изоляторов не даёт точного значения остаточного ресурса изолятора в конкретных условиях эксплуатации, оперируя результатами анализа других косвенных параметров с разным уровнем достоверности. Тем не менее, большинство из них обладают несомненными достоинствами и при квалифицированном использовании могут быть полезными, особенно при определённом взаимодополняющем сочетании нескольких видов, методов и способов контроля.