



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.048
DOI: 10.25206/1813-8225-2021-180-48-55

Д. А. ИВАНОВ
Т. Г. ГАЛИЕВА
А. В. ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ
М. Ф. САДЫКОВ
Р. И. КАЛИМУЛЛИН
А. В. СЕМЕННИКОВ

Казанский государственный
энергетический университет,
г. Казань

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ НА ДЕФЕКТАХ ИЗОЛЯЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Статья посвящена методу акустической регистрации частичных разрядов в высоковольтных изоляторах. Рассмотрены физические процессы генерации различных видов частичных разрядов в высоковольтных изоляторах. Описывается приборная реализация и способ обработки диагностической информации с чувствительных элементов — акустических приемников ультразвукового диапазона. Возможность обнаружения источников частичных разрядов с привязкой к месту возникновения важна для локализации неисправного элемента и его дальнейшего диагностирования.

Ключевые слова: высоковольтные изоляторы, частичные разряды, дефекты, акустические датчики, мониторинговая диагностика, техническое состояние.

Введение. Частичные разряды (далее ЧР) являются случайным явлением, то есть носят стохастический характер, зависят от приложенного электрического поля, величины дефекта или загрязнения. Диагностические параметры [1] — фазовый интервал начала и окончания генерации ЧР, интенсивность ЧР, количество ЧР, фазовый интервал максимальных ЧР, интенсивность превышающих среднее значение за период максимальных ЧР, число превышающих среднее значение за период максимальных ЧР — позволяют судить о техническом состоянии высоковольтных изоляторов (далее ВИ), а при мониторинге ВИ в течение периода эксплуатации оценивать их остаточный ресурс.

Объектом данного исследования являются разрядные процессы в опорно-стержневой изоляции открытых электрических подстанций (далее ПС) и подвесной изоляции воздушных линий электропередачи (далее ЛЭП). На ПС и ВЛ применяются полимерные, фарфоровые и стеклянные ВИ, которые эксплуатируются в условиях высоких напряженностей электрических полей, широкого градиента температур и влажности, подвержены загрязнению вблизи промышленных объектов, автомагистралей и пр. Условия эксплуатации могут привести к раннему износу изоляции ВИ, вызывать ее ускоренное старение и, как следствие, сократить срок службы ВИ, элементов ПС и ЛЭП.

Среди сложных высоковольтных электроэнергетических устройств, требующих диагностирования в процессе эксплуатации, высоковольтные изоляторы занимают особое место. Многочисленные ВИ на линиях электропередачи или электрических подстанций подвержены комплексному воздействию сильных электрических полей, градиентов световых и тепловых полей, электродинамических и механических воздействий. Все это создает условия для возникновения дефектов, что неизбежно приводит к разнообразным отказам и даже авариям в сложных электроэнергетических системах. Выполненные лабораторные испытания разработанной системы мониторинга показали реальную возможность её использования для мониторинга состояния ВИ, находящегося в режиме эксплуатации.

Периодический контроль (мониторинг) за развитием дефектов в изоляторах стал еще более актуальным после предсказания, а затем обнаружения сверхбольших частичных разрядов (СБЧР), по интенсивности превышающих обычные частичные разряды в несколько раз [2]. Было установлено, что СБЧР возникают за счет накопления зарядов на диэлектрических поверхностях больших дефектов, созданных предыдущими обычными частичными разрядами. Именно такие СБЧР вызывают деградацию диэлектрических поверхностей, ускоряя развитие дефектов и уменьшая срок эксплуатации изоляторов. Поэтому периодический контроль за характеристиками сверхбольших разрядов является одним из наиболее важных при дистанционном мониторинге состояния высоковольтных изоляторов. Дистанционный мониторинг в процессе эксплуатации может снизить риск выхода из строя высоковольтного оборудования из-за повреждений

ВИ, так как это позволяет перейти от разового контроля параметров ЧР к непрерывным и контролировать развитие дефектов, а следовательно, и прогнозировать остаточный ресурс ВИ. Кроме того, актуальность данного направления подтверждена многочисленными работами ученых в данной области [3–7].

Частичный разряд — это сложное физическое явление, состоящее из локализованного электрического разряда, вызванного частичным пробоем изолирующей среды под воздействием приложенного электрического напряжения. ЧР генерируют электромагнитные и акустические волны [8], излучают свет [9] и вызывают химическое разложение изоляционных материалов. Согласно стандартам [10, 11], для контроля технического состояния высоковольтной изоляции используются электромагнитный, акустический, оптический и химический методы. Выбор подходящего метода зависит от типа диагностируемого оборудования. Здесь мы рассматриваем акустический метод, основанный на регистрации акустических волн от возникающих на дефектах разрядов и относящийся к методам неразрушающего контроля.

Основной принцип акустического метода заключается в регистрации датчиками акустических волн, генерируемых при возникновении ЧР в ВИ. В своих системах мы используем пьезоэлектрические и МЭМС ультразвуковые датчики. Выбор рабочей частоты этих датчиков обусловлен частотной зависимостью затухания волн, производственными шумами и электромагнитными помехами окружающего электрического высоковольтного оборудования [12].

ЧР в ВИ возникают на внутренних и поверхностных дефектах [13–15]. ЧР генерирует нестационарную акустическую волну, возникающую в канале перегретого газа, создаваемую импульсом тока частичных разрядов и являются точечным источником акустических волн. Для диагностики ЧР на внутренних дефектах акустическим методом необходимо использовать датчик, имеющий акустический контакт с телом изолятора, так как на границе фарфор/полимер — воздух происходит практически полное отражение акустической волны. При возникновении ЧР на поверхностном дефекте акустическая волна распространяется сферически, что позволяет регистрировать ее бесконтактно.

Ультразвук можно интерпретировать как локальное изменение давления в материале. С точки зрения физики, температура газа повышается с увеличением давления, а скорость звука растет вместе с температурой. Следовательно, волны распространяются быстрее в фазе высокого давления, чем в фазе низкого давления. Это явление влияет на частотную характеристику волны.

Лавина электронов при возникновении ЧР высвобождает энергию, которая вызывает быстрое локальное повышение давления в дополнение к химическим и оптическим эффектам. Это локальное давление распространяется через материалы и образует акустическую волну. Частота этой акустической волны может достигать нескольких МГц [16–18]. Скорость этой волны является особенностью среды и зависит от не-

скольких параметров, таких как температура среды, плотность, скорость и направление движения воздушных масс.

В полевых условиях затухание ослабляет акустическую волну ЧР и, следовательно, должно быть соответствующим образом учтено в усовершенствованной модели. При проведении мониторинга интенсивности акустических сигналов от ЧР на открытом распределительном устройстве (ОРУ) подстанции источниками могут быть несколько одновременных ЧР на разных изоляторах. Ситуация также отличается для ближних и дальних ЧР. В результате, чрезвычайно трудно установить простую, уникальную связь между акустической волной и зарядом ЧР при одновременном возникновении ЧР на разных дефектах. В этом случае могут накладываться последующие акустические сигналы нескольких событий ЧР. В результате, амплитуда акустической волны становится выше, в то время как заряд ЧР в каждом случае не изменяется. В этом случае невозможно определить связь между кажущимся зарядом отдельного ЧР и амплитудой акустической волны даже с учетом дисперсии, отражения и затухания волны. Однако, несмотря на этот недостаток, акустический метод имеет много преимуществ для обнаружения ЧР.

Особенности частичных разрядов в высоковольтных изоляторах. Поскольку в известной нам литературе не удалось найти рассмотрение особенностей ЧР именно в реальных ВИ, и более того, нами был обнаружен ряд особенностей и отличий в измеренных одновременно двумя методами параметров ЧР, и особенно СБЧР, то была сделана попытка более подробно обсудить физические процессы генерации различных видов ЧР в ВИ.

Частичный разряд по определению [19] относится к предпробойной стадии искрового разряда и представляет собой возникновение и быстрое развитие тонкого плазменного канала в газовом промежутке между двумя электродами с высокой интенсивностью заряженных частиц — электронов, положительных и отрицательных ионов. По существу, ЧР имеет стримерный характер, распространяется вдоль газовой полости со скоростью $10^6 - 10^7$ м/с, превышающей скорость распространения электронов в свободном пространстве под действием электрических полей. Различие в скоростях распространения стримеров, образованных электронами и ионами, приводит к расплыванию потока и расширению его площади. Последнее обстоятельство может приводить к увеличению его заряда, создающего на диэлектрических поверхностях дефекта индуцированное электрическое поле. Распространение зарядового стримера сопровождается излучением импульсов электромагнитных волн в диапазоне частот $10^7 - 10^{11}$ Гц. По современным представлениям [20], волну пространственного заряда, возникающую в свободном пространстве полости с увеличением напряженности поля, можно рассматривать как трансформацию первичного стримера в области дефекта в частичный разряд. Последний по определению является результатом возникновения локального повышения напряженности

приложенного поля в области дефекта, превышающей электрическую прочность ВИ в данном месте.

Стримерная теория электрического пробоя газов [20] также позволяет объяснить возникновение импульсов акустических колебаний, сопровождающих ЧР. Этот процесс происходит за счет резкого возрастания площади проводящего канала стримера в разрядном промежутке, при котором возрастает давление на границах стримера с возникновением ударных волн. В свою очередь, совокупность ударных волн порождает импульсы акустических волн, детектируемых пьезоэлектрическими датчиками. Как показали эксперименты [21], импульсы ЧР, детектируемые акустическими датчиками с резонансной частотой 150 кГц, имеют быстрорастущий передний фронт с длительностью $\sim 15 - 20$ нс и плавно спадающий фронт ($\Delta t \sim 100$ мкс). Можно предположить, что длительность переднего фронта определяется временем скачка давления в головной части стримера и не зависит от условий накопления зарядов на диэлектрических поверхностях дефекта. Как следует из характеристик СБЧР, измеренных электромагнитным и акустическим датчиками [15], именно для сверхбольших дефектов акустические измерения позволяют получить более точные данные о параметрах дефектов, чем электромагнитные измерения. Причиной этого факта является то обстоятельство, что акустические измерения происходят в основном в период прохождения стримером газового промежутка в дефекте, а электромагнитные измерения включают в себя и распространение импульса ЧР вдоль диэлектрической поверхности дефекта. В образцах с относительно малыми дефектами влияние индуцированных предыдущими ЧР полей E_s на диэлектрических поверхностях на общее поле в дефекте незначительно и фазовое распределение интенсивности и количества ЧР определяется напряженностью приложенного поля в области дефекта fE_a . Поэтому характеристики ЧР в таких образцах (рис. 1), измеренные электромагнитным и акустическим датчиками, близки по своим параметрам.

При увеличении размеров дефекта возрастает влияние индуцированных полей E_s , наведенных предыдущими ЧР на диэлектрических поверхностях дефекта, а суммарное поле E_d внутри полости дефекта представляется в виде геометрической суммы напряженностей полей

$$E_d = fE_a + E_s, \quad (1)$$

где E_a — напряженность поля, приложенного к электродам напряжения, f — фактор изменения напряженности приложенного поля, зависящий от геометрии полости дефекта и соотношения диэлектрических проницаемостей газа и диэлектрического стержня.

Этот эффект наиболее сильно сказывается на дефекте между стержнем и оконцевателем изолятора. При ЧР вначале возникает разряд с распространением стримера в полости параллельно приложенному полю, а затем он сменяется разрядом вдоль диэлектрической поверхности, перпендикулярной E_a . В последнем случае нор-

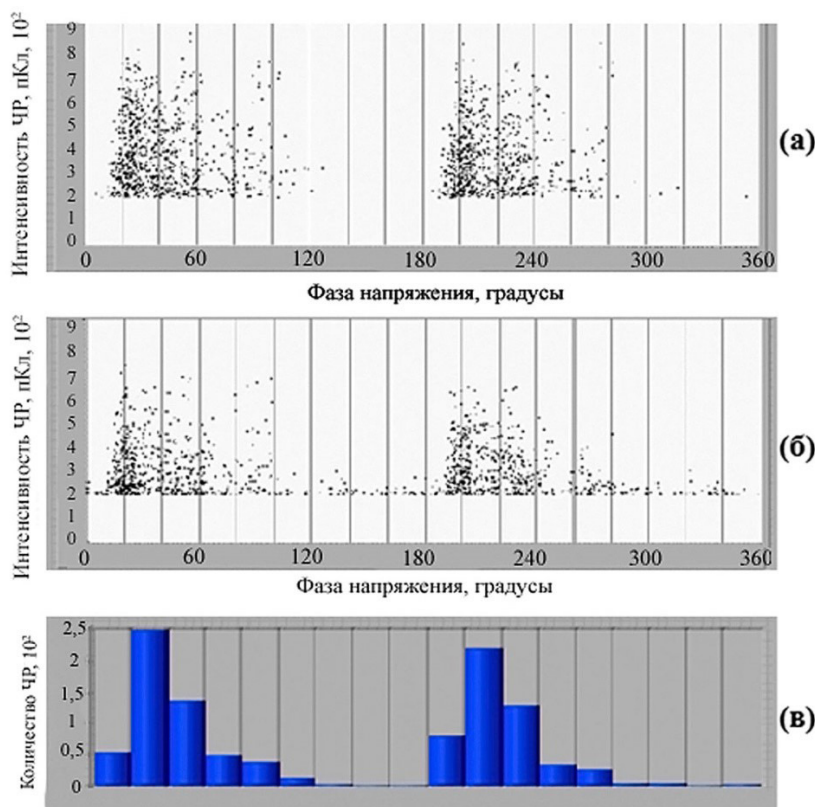


Рис. 1. Характеристики ЧР для дефектного высоковольтного изолятора: амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками [15]; (в) — распределение количества (N) детектированных ЧР в зависимости от интенсивности (дефект на стержне)

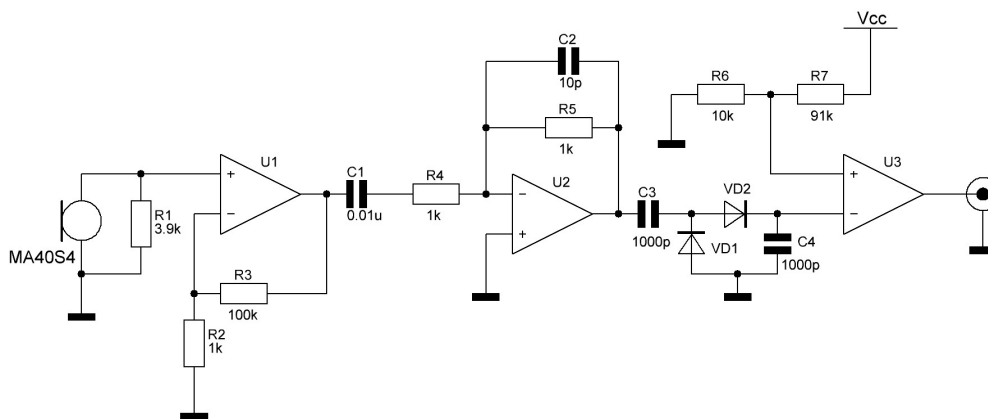


Рис. 2. Ультразвуковой приемник на основе пьезоэлектрического датчика

мальная компонента E_a прижимает дрейфующие заряды к поверхности диэлектрика, что приводит к повышению температуры и проводимости канала поверхностного разряда. При этом будет возрастать или уменьшаться на определенных фазах приложенного напряжения интенсивность СВЧР, а также ширина и количество импульсов СВЧР.

Таким образом, можно было предположить, что использование акустического детектирования ЧР при контроле дефектов позволяет более

точно определять общее количество ЧР, включая СВЧР, и их фазовое распределение.

Акустические датчики для регистрации ЧР.

Обычные акустические датчики имеют чувствительную область в диапазоне от 20 до 500 кГц. Мы исследуем распространение акустических сигналов от источника ЧР в воздухе, где их предельная дальность распространения на частоте 40 кГц достигает ориентировочно 40 м [22].

Для регистрации акустических сигналов ЧР мы используем приемники на основе МЭМС

[23] и пьезоэлектрических [24] датчиков ультразвука. МА40S4R представляют собой составное колеблющееся тело, объединяющее осциллятор, соединяющий металлическую пластину и пьезо-керамику с резонатором, который преобразует механические колебания в электрический сигнал и наоборот.

Схема приемника на основе пьезоэлектрического преобразователя показана на рис. 2. Для усиления сигнала пьезоэлектрического датчика используется двухкаскадный усилитель на операционных усилителях и детектор на основе компаратора.

МА40S4R имеет рабочую частоту 40 кГц, чувствительность 63 дБ, уровень звукового давления 120 дБ. Несомненное достоинство пьезопреобразователей — возможность такой работы, когда один и тот же датчик используется в режиме передачи и приема импульсных ультразвуковых сигналов, а также применение для повышения точности измерений низкочастотной амплитудной модуляции ультразвукового сигнала. Конструктивная простота пьезопреобразователя, элементарная система электрического возбуждения и съема, преобразованного в электрическое напряжение, принятого акустического сигнала позволяют строить системы, состоящие из большого числа однотипных пьезопреобразователей. Такие антенные решетки из пьезопреобразователей обладают повышенной по сравнению с одним преобразователем направленностью. Энергетические устройства управления антенными решетками из пьезопреобразователей относительно не сложны, поэтому подобные решетки широко используются в технике акустических измерений ЧР.

МЭМС-датчик представляет собой переменный воздушный конденсатор, емкость которого зависит от расстояния между мембраной и неподвижной пластиной. При воздействии внешних акустических волн мембрана колеблется, тем самым изменяя емкость МЭМС-сенсора. В своем устройстве мы используем MEMS-микрофон SPU0410LR5H-QB, имеющего чувствительность 38 дБ, уровень звукового давления 94 дБ. Схе-

ма детектирования акустических сигналов ЧР на основе МЭМС датчика показана на рис. 3. Схема усиления и детектирования аналогична схеме для пьезопреобразователя.

Схема микрофонного предусилителя используется для усиления выходного сигнала микрофона до уровня входных сигналов устройств, следующих за ним в цепочке сигналов. Согласование пиков уровня сигнала микрофона с полномасштабным входным напряжением АЦП позволяет максимально использовать динамический диапазон АЦП и улучшает отношение сигнал/шум, который может добавить к сигналу последующая обработка. Один операционный усилитель можно легко использовать в схеме (рис. 3) в качестве предусилителя для выхода микрофона МЭМС. Микрофон МЭМС — это одноканальное выходное устройство, поэтому один каскад операционного усилителя можно использовать для усиления сигнала микрофона или просто для буферизации выходного сигнала.

Градуировка акустических приемников производится с помощью ультразвукового источника с функциональным генератором и более точного прибора SDT270, по показаниям которого устанавливаются измеряемые значения.

Разработанные микрофонные датчики используются для регистрации акустических импульсов сигналов ЧР как отдельные устройства, так и в составе систем мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов. Такая система представляет собой микрофонные решетки (рис. 4), установленные по периметру подстанции.

Вся конструкция микрофонной решетки заключена в металлический корпус для минимизации наведенного электромагнитного шума от высоковольтного оборудования. Для локализации акустического источника с помощью микрофонной решетки используется кросс-корреляция сигналов датчиков. Последовательность получаемого сигнала каждого приемника делится на равные отрезки из N точек. Отрезки с нулевым уровнем сигнала отбрасываются, что позволяет снизить систематическую погрешность. Из-

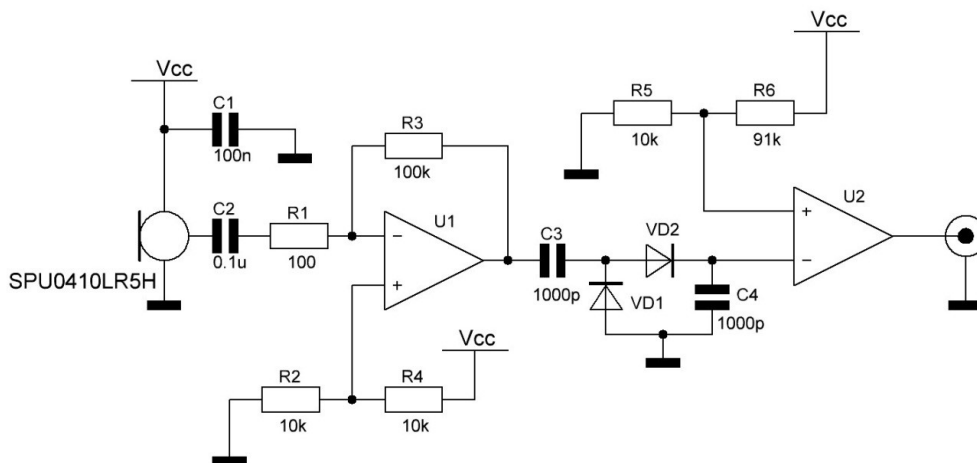


Рис. 3. Ультразвуковой приемник на основе МЭМС микрофона

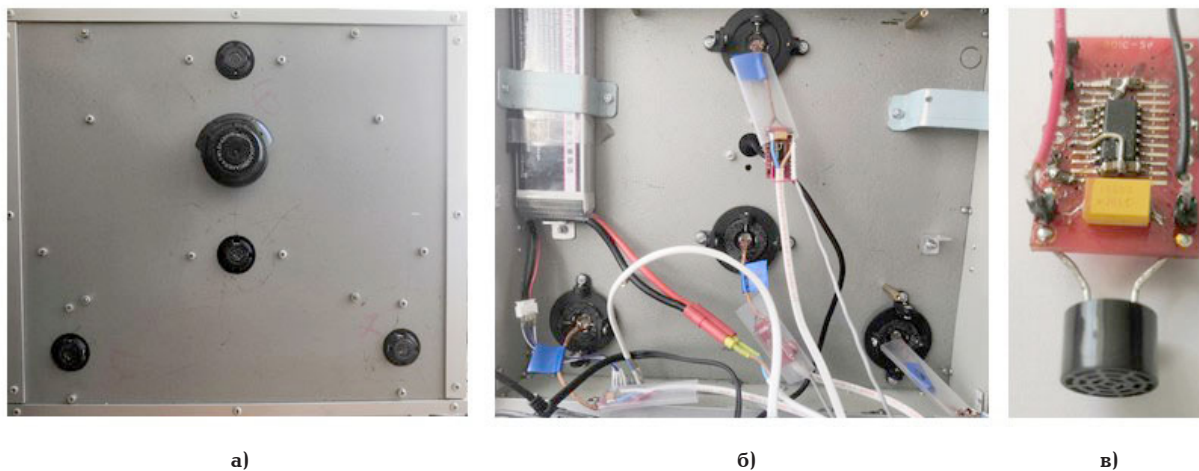


Рис. 4. Прототип измерительной ячейки на основе микрофонной решетки:
а — вид спереди; б — вид сзади; в — пьезоэлектрический датчик с платой усилителя

мерения с опорного датчика синхронизируются с фазой высокого напряжения.

Обработка диагностической информации.

Рассмотрим процесс регистрации ЧР акустическим методом. Для обработки диагностической информации [25] разработан программный комплекс [26], позволяющий собирать и записывать информацию. Затем информация об амплитуде, частоте повторения и фазе сигналов обрабатывается с помощью разработанной программы [27]. Для каждого объекта испытаний (ВИ) строятся амплитудно-фазовые распределения интенсивностей частичных разрядов, полученных с помощью диагностических устройств системы мониторинга. Измерения синхронизируются с фазой высокого напряжения. Отдельно усредненные параметры характеристик ЧР для испытываемых ВИ заносятся в таблицу: фазовый интервал начала и окончания генерации ЧР, интенсивность ЧР, количество ЧР, фазовый интервал максимальных ЧР, интенсивность превышающих среднее значение за период максимальных ЧР, число превышающих среднее значение за период максимальных ЧР.

Процесс обработки сигналов ЧР заканчивается построением следующих характеристик: амплитуд и числа импульсов в каждом фазовом интервале и распределения числа импульсов по амплитудам. Результаты обработки данных представлены в статье [1].

Полученное фазовое распределение параметров импульсов сравнивается с ранее записанным распределением параметров импульсных сигналов для бездефектного ВИ того же типа.

Скорость развития наиболее опасных дефектов определяется по изменению таких диагностических параметров, как фазовое смещение сверхбольших разрядов в фазовые интервалы с приближением к началу полупериодов (0° и 180°), а также увеличение их интенсивности, количества и кажущегося заряда во временном интервале между двумя последовательными измерениями диагностических параметров.

По скорости развития наиболее опасных дефектов возможно прогнозирование остаточного

ресурса рабочего состояния изоляторов на основе физической модели развития дефекта [28] по параметрам временного изменения характеристик частичных разрядов.

Заключение. Акустические методы широко используются в неразрушающем контроле оборудования и материалов, например, ультразвуковые эхо-импульсные методы, методы акустической эмиссии и пр.

Для бесконтактного акустического контроля используют пассивные или активные способы. Согласно первому из них, с помощью микрофона или пьезопреобразователя регистрируют импульсные акустические сигналы от электрических разрядов на дефекте. При этом акустическое излучение, регистрируемое направленной акустической антенной, характеризует местонахождение источника разряда на поверхности или в объеме материала.

На основе изучения основных причин преждевременного старения и электрического разрушения основных диэлектрических элементов электрооборудования высокого напряжения разработана система для обнаружения и периодического контроля дефектов высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации под рабочим напряжением. Полученный экспериментально набор диагностических параметров дефектов позволяет регистрировать их зарождение, развитие, а также определять с достаточной степенью достоверности остаточный ресурс диэлектрических элементов.

После определения количества ЧР, их интенсивности и местоположения, полученное распределение сравнивается с аналогичным для исправных, преддефектных и дефектных изоляторов. С помощью разработанной методики определяется скорость процесса старения и развития различных дефектов, что позволяет прогнозировать остаточный ресурс высоковольтного изолятора.

Благодарности

Научные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и выс-

шего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2020-172.

Библиографический список

1. Голенищев-Кутузов А. В., Иванов Д. А., Калимулин Р. И., Семенников А. В. Дистанционно измеряемые диагностические параметры, позволяющие оценивать остаточный ресурс высоковольтных изоляторов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Т. 84, № 12. С. 1763–1766. DOI: 10.31857/S0367676520120224.
2. Голенищев-Кутузов В. А., Голенищев-Кутузов А. В., Маковеев А. А., Черношашенцев А. Ю. Контроль высоковольтных полимерных изоляторов по измерению частичных разрядов // Электричество. 2008. № 12. С. 11–14.
3. Поляков Д. А., Никитин К. И., Терещенко Н. А., Новосёлов А. С., Билевич Я. П. Исследование частичных разрядов в опорных изоляторах // Омский научный вестник. 2020. № 1 (169). С. 32–38. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-32-38.
4. Поляков Д. А., Терещенко Н. А., Комаров И. В., Никитин К. И., Полякова У. В. Исследование характеристик частичных разрядов в искусственных дефектах линий электропередачи // Омский научный вестник. 2020. № 6 (174). С. 63–68. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-63-68.
5. Терещенко Н. А., Мирошник В. Ю., Холмов М. А., Никитин К. И., Коврижин Б. Н. Разработка диагностического устройства штырьевых изоляторов // Омский научный вестник. 2021. № 3 (177). С. 70–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-70-74.
6. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L. Comparison between three-capacitance, analytical-based and finite element analysis partial discharge models in condition monitoring // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2017. Vol. 24, Issue 1. P. 99–109. DOI: 10.1109/TDEI.2016.005971.
7. Rodriguez-Serna J. M., Albarracin-Sanchez R. A study on the life estimation and cavity surface degradation due to partial discharges in spherical cavities within solid polymeric dielectrics using a simulation based approach // Polymers. 2021. Vol. 13, Issue 3. 324. DOI: 10.3390/polym13030324.
8. Pihera J., Hormak J., Tmka P. [et al.]. Partial discharge detection using acoustic camera // 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD). 2020. P. 830–833. DOI: 10.1109/ICD46958.2020.9341902.
9. Wen T., Zhang Q., Ma J. [et al.]. Research on the detecting effectiveness of on-site lightning impulse test for GIS equipment with insulation defects // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Vol. 25, Issue 2. P. 551–558. DOI: 10.1109/TDEI.2018.006961.
10. IEC TS 62478:2016 High voltage test techniques — Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. TC 42 — High-voltage and high-current test techniques. Publ. 2016-08-29. International Electrotechnical Commission. 2016. 29 p. ISBN 978-2-8322-3560-7.
11. IEEE 4-2013-IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques. URL: <https://standards.ieee.org/standard/4-2013.html> (дата обращения: 07.09.2021 г.).
12. Голенищев-Кутузов А. В., Иванов Д. А., Потапов А. А., Кротов В. И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2019. № 4. С. 123–132.
13. Иванов Д. А., Садыков М. Ф., Ярославский Д. А., Голенищев-Кутузов А. В., Галиева Т. Г. Система контроля акустического излучения разрядных процессов на электрической подстанции для целей диагностики технического состояния изоляционного оборудования // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85, № 11. С. 1597–1601.
14. Ivanov D. A., Sadykov M. F., Yaroslavsky D. A., Golenishchev-Kutuzov A. V., Galieva T. G. Non-contact methods for high-voltage insulation equipment diagnosis during operation // Energies. 2021. № 14. 5670. DOI: 10.3390/en14185670.
15. Голенищев-Кутузов А. В., Ахметвалеева Л. В., Еникеева Г. Р., Иванов Д. А., Семенников А. В., Марданов Г. Д. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 2. С. 117–127.
16. Usachev A. E., Kubarev A. Yu. Problems of insulation diagnostics of power equipment by the method of partial discharges // E3S Web Conf. 2021. Vol. 288. 01077. DOI: 10.1051/e3sconf/202128801077.
17. Zaripova A., Zaripov D., Usachev A. Investigation of the algorithm to find defects in high-voltage insulators for an automated thermal imaging control system // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 288. 01070. DOI: 10.1051/e3sconf/202128801070.
18. Novokreshenov V. V., Ivanova V. R., Rozhencova N. V. Distributed automated control and protection system for power lines with any degree of longitudinal compensation // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 288. 01023. DOI: 10.1051/e3sconf/202128801023.
19. Вдовико В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с. ISBN 978-5-02-023210-5.
20. Niemeyer L. A generalized approach to partial discharge modeling. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2, no. 4. P. 510–528. DOI: 10.1109/94.407017.
21. Ramirez-Nino J., Pascacio A. Acoustic measuring of partial discharge in power transformers // Measurement Science and Technology. 2009. Vol. 20 (11). 115108. DOI: 10.1088/0957-0233/20/11/115108.
22. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996). Шум. Затухание звука при распространении на местности. Введ. 2007–01–01. Москва: Стандартинформ, 2006. 15 с.
23. Ультразвуковой датчик SPU0410LR5H-QB. Техническое описание. URL: https://www.knowles.com/docs/default-source/model-downloads/spu0410lr5h-qb-rev32421a731dff6ddb37cff0000940c19.pdf?Status=Master&sfvrsn=cebd77b1%20_4 (дата обращения: 07.09.2021 г.).
24. Ультразвуковой датчик Murata MA40S4S/MA40S4R. Техническое описание. URL: https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/sensor/ultrasonic/open/datasheet_maopn.ashx (дата обращения: 07.09.2021 г.).
25. Andreev N. K. Influence of sensitivity and specificity of measuring methods on their informativity and hardware requirements // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 124 (8). 05043. DOI: 10.1051/e3sconf/201912405043.
26. Ivanov D. A., Golenishchev-Kutuzov A. V., Yaroslavsky D. A., Sadykov M. F. Portable complex for remote control of high-voltage insulators using wireless data collection and transmission module // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13, № 6. P. 2358–2362.
27. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2014612238 Российская Федерация. Программа записи, обработки и распределения сигналов частичных разрядов по амплитуде и фазе / Голенищев-Кутузов А. В., Синюгин И. Е., Марданов Г. Д. № 2013661998, заявл. 23.12.13; опублик. 21.02.14.
28. Pan C., Chen G., Tang J. [et al.]. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical

ИВАНОВ Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника».

SPIN-код: 1343-8400

AuthorID (РИНЦ): 734836

Адрес для переписки: ivanov.da@kgeu.ru

ГАЛИЕВА Татьяна Геннадьевна, аспирант кафедры «Промышленная электроника и светотехника».

SPIN-код: 1338-1627

AuthorID (РИНЦ): 928275

Адрес для переписки: 79534929817@ya.ru

ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ Александр Вадимович, доктор физико-математических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Промышленная электроника и светотехника».

SPIN-код: 9331-1357

AuthorID (РИНЦ): 27936

Адрес для переписки: alex.kutuzov@mail.ru

САДЫКОВ Марат Фердинантович, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники».

SPIN-код: 9004-5471

AuthorID (РИНЦ): 40022

Адрес для переписки: sadykov@kgeu.ru

КАЛИМУЛЛИН Рустем Ирекович, доктор физико-математических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Промышленная электроника и светотехника».

SPIN-код: 7578-7965

AuthorID (РИНЦ): 39793

Адрес для переписки: kalru@yandex.ru

СЕМЕННИКОВ Антон Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника».

SPIN-код: 1612-6892

AuthorID (РИНЦ): 982428

Адрес для переписки: samprosebe@gmail.com

Для цитирования

Иванов Д. А., Галиева Т. Г., Голенищев-Кутузов А. В., Садыков М. Ф., Калимуллин Р. И., Семенников А. В. Детектирование акустических сигналов частичных разрядов на дефектах изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 48–55. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-1180-48-55.

Статья поступила в редакцию 07.10.2021 г.

© Д. А. Иванов, Т. Г. Галиева, А. В. Голенищев-Кутузов, М. Ф. Садыков, Р. И. Калимуллин, А. В. Семенников