

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА И СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО БЕСКОНТАКТНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Измерение частичных разрядов (ЧР) является общепринятым во всем мире методом диагностики изоляции электрического оборудования. Сегодня тенденция заключается в переходе от обычного автономного тестирования к онлайн-мониторингу для прогнозирования срока службы изоляции. Для тестирования и калибровки разрабатываемых новых методов с контактным методом разработан лабораторный стенд в соответствии с ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000). В статье предлагается применение акустического и электромагнитного методов для системы непрерывного бесконтактного неразрушающего контроля технического состояния изоляционного оборудования, которая позволит контролировать изоляционное оборудование в режиме онлайн и прогнозировать его остаточный ресурс. На их основе разработана система онлайн диагностики высоковольтных изоляторов.

Ключевые слова: частичный разряд, диагностика изоляционного оборудования, лабораторный стенд, электромагнитный метод, контактный метод, акустический метод.

Введение. В 2020 году по данным нового исследования InfoLINE отрасль энергетики России столкнулась с серьезными проблемами: было зафиксировано самое глубокое снижение потребления, примерно $-2,3\%$ за последние 10 лет. Это связано с резким падением потребления энергии предприятиями нефтяной отрасли, повышении общей температуры окружающей среды и с последствиями пандемии из-за коронавируса [1].

Долгосрочные инвестиционные программы компаний энергетической отрасли подверглись корректировкам, снизился экспорт электрической энергии ($-36,4\%$). Восстановление в энергетической отрасли до прежних показателей займет около 2–3 лет. Наиболее перспективными направлениями для развития отрасли прогнозируются: внедрение цифровых технологий, smart grid, увеличение объемов и мощностей передачи электроэнергии и оборудования, мероприятия, направленные на экономию ресурсов и снижение потерь. С непрерывным расширением энергосистемы возрастает риск крупномасштабных отключений электроэнергии, вызванных отказом или повреждением основного энергетического оборудования. Многие

факты показывают, что первопричинами большинства аварий на электрифицированном оборудовании являются дефекты их внутренней изоляции [2–4]. Изоляция с течением времени деградирует, теряет свои диэлектрические свойства и все больше подвергается микропробоям, которые могут привести к полному пробоя и выходу из рабочего состояния. В связи с этим постоянный онлайн контроль изоляционных элементов является актуальной задачей на сегодняшний день. Системы мониторинга изоляционного оборудования играют важную роль при эксплуатации, так как дают возможность контролировать их техническое состояние и с помощью предиктивного анализа выявлять развивающиеся дефекты.

Измерение ЧР как метод диагностики изоляции электрического оборудования. Одной из частых аварийных ситуаций является потеря электрической прочности изоляционного оборудования, частичная деструкция, вызванные появлением и развитием дефектов в нем [5]. Для выявления развивающихся дефектов в диэлектриках учеными предложен хорошо известный и зарекомендовавший себя с положительной стороны метод определения частичных

разрядов (ЧР) [6–8]. Понятие ЧР, а также кажущегося заряда, который мы непосредственно будем измерять, описаны в стандарте ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) [9]:

ЧР — это электрический разряд, который шунтирует лишь часть изоляции между электродами, находящимися под разными потенциалами [9].

Кажущийся заряд — абсолютное значение такого заряда, мгновенное введение которого между электродами испытываемого объекта, установленного в испытательной схеме, могло бы дать такое же показание на измерительном приборе, как и сам импульс ЧР.

ЧР оказывают разрушительное действие и сопровождаются следующими физическими явлениями: электромагнитное излучение, ударные волны, световое излучение, нагрев изоляции, акустическое излучение [10]. Как правило, ЧР являются следствием локальных концентраций электрических напряжений в изоляции или на поверхности изоляции. Они проявляются в виде импульсов с длительностью порядка 1 нс. Характеристики одиночного разряда не представляют интереса, так как для полной диагностики необходимо определять группу ЧР и их распределение в фазовом интервале. В связи с разнообразными факторами дефекты могут увеличиваться в размерах, что сопровождается увеличением интенсивности, амплитуды и числа ЧР в фазовых интервалах, а также снижением начального уровня напряженности поля для их возникновения.

С помощью данного метода диагностируют различные виды высоковольтного оборудования, имеющие изоляцию — кабели [11–14], трансформаторы [15, 16], изоляторы [17–20] и др.

С помощью обнаружения ЧР и проведения анализа их развития можно выявлять дефекты на ранних стадиях, тем самым прогнозируя техническое состояние и запланировать ремонт [21, 22]. Кроме того, важным аспектом диагностических систем является способность не нарушать работу энергетического комплекса, т.е. проводить контроль дистанционно, не вмешиваясь в процесс. Это позволит прогнозировать ремонт оборудования с минимальными затратами и избежать сбоев и аварийных отключений.

В соответствии с тем, какими физическими явлениями сопровождаются ЧР, существуют следующие дистанционные методы определения ЧР: акустический, оптический, электромагнитный, инфракрасный, тепловизионный. Данные методы дают возможность обнаруживать дефекты, отслеживать их развитие и оценивать текущее состояние изоляционного оборудования, что отражено в отечественных и международных документах и стандартах.

Для разработки метода определения ЧР с целью выявления дефектов в изоляции оборудования необходимо сравнивать полученные результаты с истинными значениями, т.е. с эталоном. Самым простым и достоверным методом определения амплитуды и длительности разряда является контактный (традиционный) метод, описанный в ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000).

Для этого в работе предлагается лабораторный стенд с использованием регулируемого источника высокого напряжения, который позволит получать эталонные значения кажущихся разрядов с помощью контактного метода.

Описание лабораторного стенда. Испытательный лабораторный стенд (рис. 1, 2) состоит из следующих основных элементов:

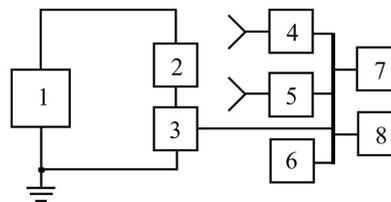


Рис. 1. Схема лабораторного стенда



Рис. 2. Внешний вид лабораторного стенда и лицевая панель программного обеспечения (LabView)

— источника высокого напряжения АИД-70М (поз. 1), имеющего достаточно низкий уровень фоновый шум с тем, чтобы иметь возможность измерять нормированную амплитуду частичного разряда при нормированном испытательном напряжении;

— испытуемого объекта (поз. 2);

— системы высоковольтных соединений, имеющих достаточно низкий уровень фоновый шум с тем, чтобы иметь частичные разряды соответствующего значения кажущегося заряда при нормированном испытательном напряжении;

— измерительной системы, состоящей из бесконтактных (электромагнитного (поз. 4) и ультразвукового (поз. 5)) и контактного (поз. 3) измерительных элементов, датчика фазы напряжения (поз. 6), соединительного кабеля, цифрового осциллографа (поз. 7) и АЦП с ПК (поз. 8);

— защитного устройства (разрядника), подключаемого параллельно измерительному элементу (поз. 3);

— защитного сопротивления, чтобы уменьшить фоновый шум от источника питания.

Установка снабжена блокировкой и автоматической защиты, необходимыми приборами и защитными средствами.

Калибровка и градуировка измерительной системы с испытуемым объектом (в нашем случае это высоковольтный изолятор (ВИ)) выполняется посредством подачи короткого импульса тока известного периодически повторяющегося заряда на зажимы изолятора. Значение должно рассматриваться как значение, полученное в результате испытаний характеристик калибратора.

Лабораторный стенд позволяет создавать переменное напряжение до 50 кВ и постоянное напряжение до 70 кВ.

Последовательность действий:

— на исследуемый объект (в нашем случае высоковольтный изолятор) подается нормированное испытательное напряжение и с помощью калибра-

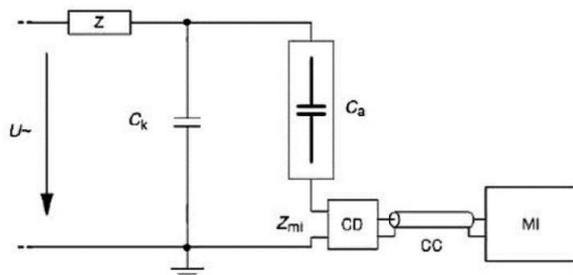


Рис. 3. Схема электрического метода (U — источник высокого напряжения; Z_{mi} — входной импеданс измерительной системы; CC — соединительный кабель; OL — оптический канал; C_a — испытуемый объект; C_k — конденсатор связи; CD — измерительный элемент; MI — измерительный прибор; Z — фильтр) [6]

тора создается разряд заведомо известной амплитуды и длительности;

— с помощью нового разработанного метода определяются ЧР и сравниваются с эталонными результатами, полученными контактным методом.

Электрический метод (контактный метод), описанный в стандарте ГОСТ, основан на измерении изменений зарядов элементов измерительной схемы, вызываемых ЧР в изоляции испытуемого объекта.

Схема проведения измерений посредством электрического метода представлена на рис. 3. Измерительный элемент (датчик) в цепи расположен со стороны заземления испытуемого объекта. В этом случае низковольтная сторона испытуемого объекта должна иметь возможность быть изолированной от земли.

Контактным методом проводилось измерение следующих характеристик:

- определения отсутствия ЧР в изоляции при нормированном напряжении, интенсивность которых равна или выше нормированного значения;
- определения характеристик ЧР при нормированном напряжении;
- определения напряжения возникновения и напряжения затухания ЧР в изоляции;
- определение ЧР относительно фазы переменного напряжения.

Проведение стендовых испытаний электромагнитным и акустическим методами детектирования ЧР в изоляции. ЧР генерируют электромагнитные и акустические волны, излучают свет и вызывают химическое разложение изоляционных материалов; эти физические и химические эффекты могут быть обнаружены различными методами диагностики, как говорилось ранее, и соответствующими чувствительными элементами (датчиками). Помимо так называемого «традиционного» электрического метода, описанного в IEC 60270, можно обнаруживать и измерять ЧР различными «нетрадиционными» методами. Акустический и электромагнитный методы хорошо зарекомендовали себя в данной области. Об этом свидетельствуют многочисленные работы ученых [23–25]. Кроме того, по данным методам был разработан стандарт IEC 62478:2016 «Методы испытаний при высоком напряжении — измерение частичных разрядов электромагнитными и акустическими методами» [26], где описаны способы реализации метода, локализации ЧР, калибровка устройств и чувствительности, рекомендации

по выбору полосы частот, а также достоинства и недостатки методов. Также в стандарте рекомендуется одновременное использование электромагнитного и акустического методов с целью наибольшей точности. Так как чувствительность акустических измерений может быть повышена путем объединения обоих методов, т. е. объединения акустического и электромагнитного определения ЧР. Еще одним важным преимуществом связи электромагнитных и акустических измерений является повышенная достоверность результатов комбинированных испытаний ЧР. Акустический шум обычно не генерирует внутренних электромагнитных сигналов, а электромагнитные помехи обычно не создают акустических сигналов [26].

Акустическое излучение можно интерпретировать как локальное изменение давления в материале. С точки зрения физики, температура газа повышается с увеличением давления, а скорость акустической волны 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 [27, 28]. Скорость этой волны является особенностью среды и зависит от нескольких параметров, таких как температура среды, плотность, скорость и направление движения воздушных масс.

Математическое моделирование взаимосвязи между зарядом ЧР и амплитудой генерируемой акустической волны является непростой задачей. Уравнение для смещения частиц в звуковой волне $\xi(x, t)$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}. \quad (1)$$

Приведенное уравнение описывает волну, распространяющуюся в воздухе со скоростью, равной

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}}. \quad (2)$$

При нормальных условиях плотность воздуха $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$, атмосферное давление $P_0 = 1,013 \times 10^5 \text{ Па}$, и скорость звука в воздухе $c = 330 \text{ м/с}$. При комнатной температуре ($T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$) $c = 340 \text{ м/с}$. При условиях, близких к нормальным, волновое сопротивление воздуха равно примерно

$$\rho_0 c = 420 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}. \quad (3)$$

Звуковое давление

$$p = -\rho_0 c^2 \frac{\partial \xi}{\partial x} = p_{\max} \cos(\omega t - kx), \quad (4)$$

где $p_{\max} = \rho_0 c \omega \xi_{\max}$ — амплитуда звукового давления.

Излучение акустического излучения частичным разрядом в твердых диэлектриках обычно интерпретируется как термоакустическое явление. В этой концепции излучаемый акустический им-

пульс является результатом локального образования плазмы либо в уже существующей полости дефекта, либо в полости, которая создается в процессе разряда. Энергия извлекается из электрического поля развивающейся электронной лавиной и передается для возбуждения молекул, разрыва связей и ионизации за счет столкновения свободных электронов связанными электронами. Используя упрощающее предположение о сферической полости глубоко в однородной изотропной среде, результирующий акустический импульс излучается в виде исходящего сферического волнового фронта. Пиковое акустическое давление p на расстоянии r от центра полости может быть оценено по излучаемой акустической энергии W_{ac} согласно [29]

$$p = \sqrt{\frac{W_{ac} \rho c}{2\pi r^2 \tau}}, \quad (5)$$

где ρ — плотность среды в области дефекта, c — скорость акустической волны, τ — длительность акустического импульса.

$$W_{ac} = \alpha E_{PD}, \quad (6)$$

где E_{PD} — суммарное поле внутри полости дефекта, α — коэффициент пропорциональности [30],

$$E_{PD} = U q_{PD}, \quad (7)$$

где U — напряжение на полостях дефекта, q_{PD} — величина кажущегося заряда PD.

Еще один момент, который следует учитывать, заключается в том, что на практике возникают потери и поглощение акустической энергии средой [31]. При этом по мере распространения акустической волны от источника ЧР излучаемая энергия распределяется на всю увеличивающуюся поверхность волнового фронта и, соответственно, уменьшается поток энергии через единицу поверхности, т.е. интенсивность звука. Для сферической волны, волновая поверхность которой растёт с расстоянием r от источника как r^2 , амплитуда волны убывает пропорционально r^{-1} .

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. 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. Таким образом, невозможно определить связь между зарядом ЧР и амплитудой акустической волны даже с учетом дисперсии, отражения и затухания волны. Однако, несмотря на этот недостаток, исследование акустического излучения по-прежнему имеет значительные возможности для обнаружения ЧР.

К настоящему времени были разработаны только несколько физических моделей, описывающих распространение стримеров в газовых прослойках

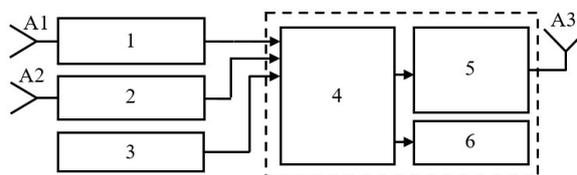


Рис. 4. Блок-схема бесконтактного диагностического устройства:

1 — электромагнитные датчики, 2 — ультразвуковые датчики, 3 — датчик фазы, 4 — микроконтроллер с аналого-цифровым преобразователем, 5 — радиомодуль, 6 — флеш-память, A1 — антенна электромагнитного датчика, A2 — приемники ультразвукового датчика, A3 — антенна для передачи данных



Рис. 5. Внешний вид диагностического устройства с акустическими датчиками

дефектов в виде сфер или трехмерных эллипсоидов [32]. В их основе лежит предложенное положение о зависимости интенсивности q от общей поверхности полости дефекта [33]

$$q = \pi \epsilon_0 \epsilon b^2 [1 + \epsilon_r (K (a/b) - 1)] E_{PD}, \quad (8)$$

где ϵ_0 и ϵ_r — соответственно диэлектрические проницаемости газа и диэлектрика; a и b — продольный и поперечный размеры полости дефекта; значения K -фактора инверсной поляризации были эмпирически определены в работе [34]: $K \approx 1$ ($a/b \ll 1$), $K = 3$ ($a/b \sim 1$), $K \approx 4 a/b$ ($1 < a/b < 0$).

Это выражение было использовано в работах [35, 36] при изучении особенностей ЧР в модельных полимерных образцах.

В связи с этим разработана система мониторинга высоковольтных изоляторов (ВИ), включающая два метода диагностики ЧР: электромагнитный и акустический. Блок-схема диагностического устройства системы мониторинга представлена на рис. 4. Более подробно функционирование системы описано в работе [37].

Основные измерения диагностическое устройство проводит с помощью электромагнитных и ультразвуковых датчиков и датчика фазы. Диагностические устройства устанавливаются на заранее определенном расстоянии от испытуемого объекта. Ультразвуковой датчик позволяет локализовать группу неисправных ВИ, электромагнитный датчик с помощью антенны измеряет электромагнитное поле, излучаемое ЧР.



Рис. 6. Влагоизоляционная камера

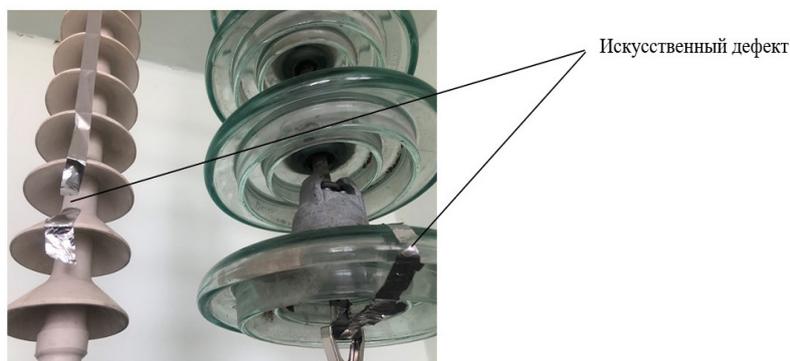


Рис. 7. Искусственный дефект в высоковольтных изоляторах

Регистрация электромагнитных импульсов ЧР производится с помощью широкополосного сканирующего приемника AOR AR-5000A, имеющего следующие характеристики [38]:

- диапазон принимаемых частот: 0,01...3000 МГц;
- скорость сканирования, каналов/с: до 45;
- виды модуляции: AM FM SSB USB LSB CW;
- количество каналов памяти: 2000 в 40 банках;
- питание: $\pm 12,0 \dots 16,0$ V DC, 1A.

Направленная антенна позволяет детектировать импульсы в интервале частот, рекомендованных IEC/TS 62478:2016 — ВЧ, СВЧ и УВЧ. В диагностическом устройстве использовались полосы частот 0,5 – 600 и 800 – 900 МГц.

Данные с приемника поступают в АЦП National Instruments USB-6251 [39], который имеет частоту дискретизации 1,25 МГц при разрядности 16 бит.

Регистрация акустических импульсов с помощью активной параболической антенны осуществляется на частоте 40 кГц. Внешний вид устройства приема акустических сигналов представлен на рис. 5.

Так как одним из наиболее неблагоприятных условий работы изоляционного оборудования является повышенная влажность окружающего воздуха, то было предусмотрено проведение испытаний в различных климатических условиях:

1. В нормальных климатических условиях — температура окружающего воздуха $+25^{\circ}\text{C}$, влажность 45 %.
2. В условиях повышенной влажности — температура окружающего воздуха $+25^{\circ}\text{C}$, влажность — 95 %.

Для тестирования в условиях высокой влажности использовалась специальная влагоизоляционная камера размером 60×120 см, выполненная из экструдированного пенополистирола толщиной 70 мм, со специальными отверстиями для подведения внешнего источника влажности (рис. 6).

Испытания проводились на двух типах высоковольтных изоляторов: подвесной полимерный (ЛК701); подвесной стеклянный (ПС 70Е). На каждом ВИ был введен искусственный дефект — нарушение изоляционной прочности путем наклейки полос из металлических лент (рис. 7), позволяющий создавать разряд.

В составе стенда работает разработанный программный комплекс, который позволяет собирать и записывать в память информацию об амплитуде, частоте повторения и фазе сигналов с устройства диагностики. Обработка полученных данных производится в программном обеспечении (рис. 8), разработанном в программной среде LabView.

Далее для каждого ВИ строятся амплитудно-фазовые распределения интенсивностей частичных разрядов, полученных с помощью диагностических устройств системы мониторинга. 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

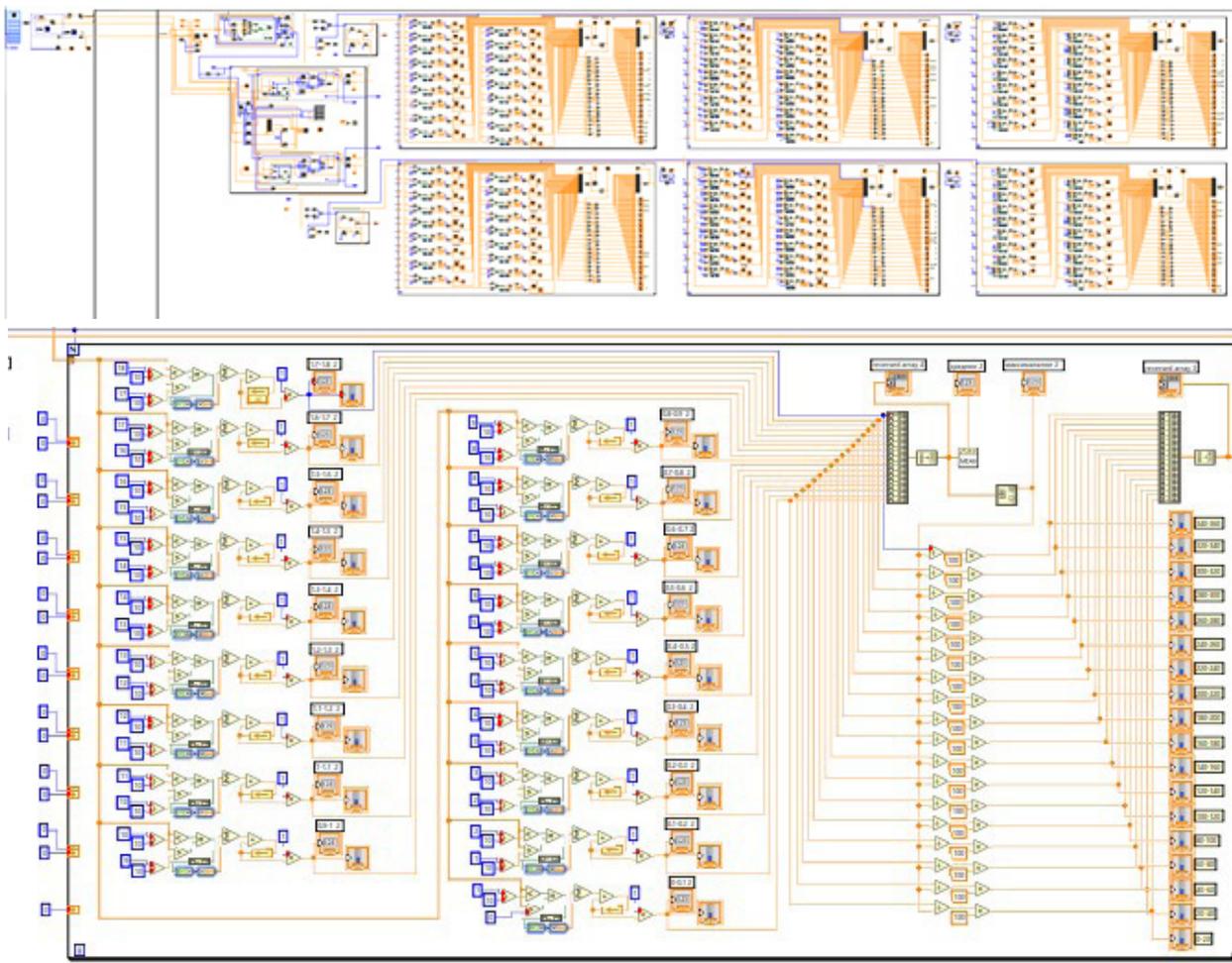


Рис. 8. Блок-схема программного обеспечения обработки сигналов с испытуемого высоковольтного изолятора

и числа импульсов в каждом фазовом интервале и распределения числа импульсов по амплитудам. Результаты обработки данных представлены в статьях [21, 40].

Принцип диагностирования технического состояния ВИ под рабочим напряжением заключается в периодическом измерении набора диагностических параметров ЧР с помощью электромагнитных и ультразвуковых датчиков, необходимых для достоверной оценки их состояния и сравнения получаемых результатов мониторинга с эталонными значениями.

Полученное фазовое распределение параметров импульсов сравнивается с ранее записанным распределением параметров импульсных сигналов для бездефектного ВИ того же типа [21, 40].

Заключение. Разработан лабораторный стенд для разработки метода и системы непрерывного бесконтактного неразрушающего контроля технического состояния изоляционного оборудования. Лабораторный стенд позволяет проводить испытания различных методов диагностики ЧР: акустический, оптический, электромагнитный, инфракрасный, тепловизионный. На лабораторном стенде была разработана система непрерывного дистанционного контроля, позволяющая проводить онлайн диагностику высоковольтных изоляторов на линиях электропередач. Система основана на совмещении акустического и электромагнитного методов, позволяет локализовать источник разрядов, определять тип и место возникновения дефекта, отслеживать его развитие.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90145.

Библиографический список

1. Электроэнергетическая отрасль России 2021 года. Итоги 2020 года и перспективы развития до 2023 года // Исследование INFOLine. 2021. URL: <https://infoline.spb.ru/shop/issledovaniya-rynkov/page.php?ID=204722> (дата обращения: 27.07.2021).
2. Wang H., Cheng L., Liao R. [et al.]. Non-destructive testing method of micro-debonding defects in composite insulation based on high power ultrasonic // High Voltage. 2019. Vol. 4 (3). P. 167–172. DOI: 10.1049/hve.2019.0044.
3. Junhao L., Xutao H., Zehui L. [et al.]. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment // High Voltage Engineering. 2015. Issue 8. P. 2583–2601.
4. 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.
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. Голенцев-Кутузов А. В., Голенцев-Кутузов В. А., Иванов Д. А. [и др.]. Комплексная диагностика дефектов в вы-

соковольтных изоляторах // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83, № 12. С. 1651 – 1654. DOI: 10.1134/S0367676519120068.

7. 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.

8. 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.

9. ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000). Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. Введ. 2014–01–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 44 с.

10. Вдовико В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с. ISBN 978-5-02-023210-5.

11. Steiner J. P., Reynolds P. H., Weeks W. L. Estimating the location of partial discharges in cables // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1992. Vol. 27. P. 44 – 59.

12. Поляков Д. А., Никитин К. И., Терещенко Н. А., Комаров И. В., Полякова У. В. Исследование зависимости мощности частичных разрядов от напряжения в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена // Омский научный вестник. 2020. № 1 (169). С. 39 – 44. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-39-44.

13. Polyakov D. A., Komarov I. V., Sarsembayev A. B. [et al.]. Research of partial discharge characteristics in XLPE-insulated cables with single and multiple defects // Proc. of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2021. P. 9387998. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9387998.

14. Polyakov D. A., Kholmov M. A., Plotnikov D. I. [et al.]. Research of cable insulation types operation life // IOP Conf. Series: Journal of Physics. 2021. Vol. 1791 (1). P. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012057.

15. Chai H., Lu Sh., Phung B. T., Mitchell S. Comparative study of partial discharge localization based on UHF detection methods // The 25th international conference and exhibition on electricity distribution (Cired 2019). Madrid, 2019. P. 1076 – 1080.

16. Sinaga H. H., Phung B. T., Blackburn T. R. Partial discharge localization in transformers using UHF detection method // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2012. Vol. 19, Issue 6. P. 1891 – 1900. DOI: 10.1109/TDEI.2012.6396945.

17. Chandrasekar S., Kalaivanan C., Montanari G. C. [et al.]. Partial discharge detection as a tool to infer pollution severity of polymeric insulators // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010. Vol. 17, Issue 1. P. 181 – 188. DOI: 10.1109/TDEI.2010.5412016.

18. Cherney E. A. Partial discharge. V. PD in polymer-type line insulators // IEEE Electrical Insulation Magazine. 1991. Vol. 7, Issue 2. P. 28 – 32. DOI: 10.1109/57.75766.

19. Montanari G. C., Cavallini A. Partial discharge diagnostics: from apparatus monitoring to smart grid assessment // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2013. Vol. 29, Issue 3. P. 8 – 17. DOI: 10.1109/MEI.2013.6507409.

20. Polyakov D. A., Tereschenko N. A., Bilevich Y. P. [et al.]. Investigation of Partial Discharges in Supporting Insulators // Proc. of the 2nd 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2020. P. 9059115. DOI: 10.1109/REEPE49198.2020.9059115.

21. Ivanov D., Galieva T., Sadykov M. [et al.]. Method for the diagnosis of high-voltage dielectric elements during operation based on dynamic registration of electromagnetic radiation // E3S Web Conf. 2020. Vol. 216. 01061. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601061.

22. Пат. 2679759 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/12. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов / Голенищев-Курузов А. В., Голенищев-Курузов В. А., Иванов Д. А., Марданов Г. Д., Се-

менников А. В. № 2018110016; заявл. 21.03.18; опубл. 12.02.19, Бюл. № 5.

23. Long J., Wang X., Zhou W. [et al.]. A Comprehensive Review of Signal Processing and Machine Learning Technologies for UHF PD Detection and Diagnosis (I): Preprocessing and Localization Approaches // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 69876 – 69904. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3077483.

24. Li Z., Luo L., Sheng G. [et al.]. UHF partial discharge localisation method in substation based on dimension-reduced RSSI fingerprint // IET Generation, Transmission & Distribution. 2017. Vol. 12, Issue 2. P. 398 – 405. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0601.

25. Golenishchev-Kutuzov A. V., Golenishchev-Kutuzov V. A., Ivanov D. A. [et al.]. Remote testing for defects in in-service high-voltage insulators. // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. Vol. 54, Issue 10. P. 682 – 686. DOI: 10.1134/S1061830918100054.

26. IEC/TS 62478:2016. High voltage test techniques — Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. Publ. Aug. 29th, 2016. 68 p.

27. 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, no. 6. P. 2358 – 2362.

28. Usachev, A. E., and A. Yu. Kubarev. 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.

29. Fujita H. An Analysis of Mechanical Stress in Solid Dielectrics Caused by Discharges in Voids // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1987. Vol. EI-22, Issue 3. P. 277 – 285. DOI: 10.1109/TEI.1987.298991.

30. Rohwetter P., Habel W., Heidmann G. [et al.]. Acoustic emission from DC pre-treering discharge processes in silicone elastomer // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22, Issue 1. P. 52 – 64. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004576.

31. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996). Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета. Введ. 2007–01–01. Москва: Стандартинформ, 2006. 15 с.

32. Borghei M., Ghassemi M., Rodriguez-Serna J. M. [et al.]. A Finite Element Analysis and an Improved Induced Charge Concept for Partial Discharge Modeling // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. Vol. 36, Issue 4. P. 2570 – 2581. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2991589.

33. Dissado L., Mazzanti G., Montanari G. C. The incorporation of space charge degradation in the life model for electrical insulating materials // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2, Issue 6. P. 1147 – 1158. DOI: 10.1109/TDEI.1995.8881933.

34. Ilias 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.

35. Wu K., Pan C., Meng Y. [et al.]. Dynamic Behavior of Surface Charge Distribution during Partial Discharge Sequences // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. Vol. 20, Issue 2. P. 612 – 619. DOI: 10.1109/TDEI.2013.6508765.

36. Pan C., Chen G., Tang J., and Wu K. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. Vol. 26, Issue 3. P. 981 – 1000. DOI: 10.1109/TDEI.2019.8726048.

37. Голенищев-Курузов А. В., Иванов Д. А., Потапов А. А., Кротов В. И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей // ИВУЗ. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21, № 4. С. 123 – 133.

38. Сканирующий приемник AOR AR-5000A // AOR. 2021. URL: <http://aor.ru/archive.html> (дата обращения: 20.07.2021).

39. USB-6251. Многофункциональное устройство ввода-вывода // National Instruments. URL: <https://www.ni.com/ru-ru/support/model.usb-6251.html> (дата обращения: 20.07.2021).

40. Ivanov D. A., Sadykov M. F., Yaroslavsky D. A. [et al.]. Non-contact methods for high-voltage insulation equipment diagnosis during operation // Energies. 2021. Vol. 14 (18). Paper 5670. DOI: 10.3390/en14185670.

ГАЛИЕВА Татьяна Геннадьевна, аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники».

SPIN-код: 1338-1627

AuthorID (РИНЦ): 928275

Адрес для переписки: 79534929817@ya.ru

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

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

ГОЛЕНИЦЕВ-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

Для цитирования

Галиева Т. Г., Иванов Д. А., Садыков М. Ф., Голеницев-Кутузов А. В. Лабораторный стенд для разработки метода и системы непрерывного бесконтактного неразрушающего контроля технического состояния изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 80–87. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-80-87.

Статья поступила в редакцию 05.08.2021 г.

© Т. Г. Галиева, Д. А. Иванов, М. Ф. Садыков,
А. В. Голеницев-Кутузов