



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

А.В. Голенищев-Кутузов, Д.А. Иванов, А.А. Потапов, В.И. Кротов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

alex.kutuzov@mail.ru

Резюме: В электроэнергетике России и за рубежом особое внимание обращено на проблему возрастания числа возникших из-за повреждений высоковольтных изоляторов (ВИ) аварий в высоковольтном оборудовании. Был проведен анализ аварийных ситуаций на подстанциях и открытых распределительных устройствах [1,2,3], показавший, что причинами повреждения ВИ в большинстве случаев являются естественное старение в приложенном электрическом поле (ЭП), перенапряжения и наличие первоначальных дефектов при изготовлении ВИ. Опираясь на этот факт, нами разрабатывались различные методы бесконтактной диагностики ВИ с целью выявления дефектов на ранней стадии их развития. Особое внимание было обращено на метод частичных разрядов (ЧР), поскольку характеристики ЧР позволяют получить информацию о параметрах дефектов.

В статье описан комплекс бесконтактных методов для проведения дистанционной диагностики высоковольтных изоляторов; двухканальный метод дистанционной диагностики рабочего состояния высоковольтных изоляторов, основанный на регистрации частичных разрядов электромагнитным и акустическим датчиками; устройство, позволяющее проводить визуальный контроль и поиск неисправного высоковольтного оборудования; дистанционный бесконтактный метод регистрации электрических полей высокой напряженности промышленной частоты, а также их пространственной ориентации на основе электрооптического эффекта.

Мы разработали макет мобильного прибора для реализации методик исследования высоковольтных диэлектрических элементов для диагностики их технического состояния с помощью описанного комплекса бесконтактных методов. Измерительное устройство в составе мобильного диагностического прибора состоит из набора сенсоров для сбора диагностической информации, детектированной электромагнитным, акустическим и электрооптическим датчиками и сигнала фазы напряжения, приложенного к исследуемому ВИ. Одновременное использование сразу нескольких датчиков позволило повысить точность локализации ЧР в ВИ. Визуализация результатов диагностики возможна на диспетчерском пункте в виде амплитудно-фазовых, частотно-фазовых и амплитудно-частотных диаграмм распределения характеристик частичных разрядов и на портативном устройстве в виде интенсивности излучения с выбранного датчика. Мобильный диагностический прибор позволил в лабораторных условиях выполнить изучение электрофизических процессов в различных диэлектрических материалах и изделиях под воздействием сильных переменных электрических полей. Выполнено изучение особенностей дефектов на стержне и контакте «стержень-оконцеватель», построена схема электрофизических процессов, сопровождающих излучение ЧР, и установлены причины их возникновения.

Ключевые слова: дистанционная диагностика, частичные разряды, неразрушающий контроль, высоковольтные изоляторы, фотонный кристалл, дефекты изоляции, мобильный диагностический прибор

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-08-00203.

Для цитирования: Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Потапов А.А., Кротов В.И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С. 123-133. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-123-133.

USING CONTACTLESS METHODS OF DIAGNOSTICS OF HIGH ELECTRIC FIELDS

AV. Golenischev-Kutuzov, DA. Ivanov, AA. Potapov, VI. Krotov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

alex.kutuzov@mail.ru

Abstract: *In the electric power industry of Russia and abroad, special attention is paid to the problem of an increase in the number of accidents caused by damage to high-voltage insulators in high-voltage equipment. An analysis of emergencies at substations and open switchgears [1-2, 4] was carried out, which showed that in most cases the causes of damage to high-voltage insulators are natural aging in an applied electric field, overvoltage, and the presence of initial defects in the manufacture of high-voltage insulators. Based on this fact, we developed various methods of non-contact diagnostics of high-voltage insulators in order to identify defects at an early stage of their development. Particular attention was paid to the method of partial discharges because the characteristics of partial discharges provide information on the parameters of defects.*

The article describes a set of non-contact methods for remote diagnostics of high-voltage insulators; a two-channel method for remote diagnostics of the operating state of high-voltage insulators, based on the registration of partial discharges by electromagnetic and acoustic sensors; a device that allows visual inspection and the search for faulty high-voltage equipment; remote non-contact method for recording electric fields of high tension of industrial frequency, as well as their spatial orientation based on the electro-optical effect.

We developed a mock-up of a portable diagnostic device for implementing research methods for high-voltage dielectric elements to diagnose their technical condition using the described complex of non-contact methods. The measuring device as part of a portable diagnostic device consists of a set of sensors for collecting diagnostic information detected by electromagnetic, acoustic and electro-optical sensors and a voltage phase signal applied to the studied high-voltage insulator. The simultaneous use of several sensors at once made it possible to increase the accuracy of localization of partial discharges in high-voltage insulators. Visualization of diagnostic results is possible at the control room in the form of amplitude-phase, frequency-phase and amplitude-frequency diagrams of the distribution of characteristics of partial discharges and on a portable device in the form of radiation intensity from the selected sensor. A portable diagnostic device made it possible in laboratory conditions to study electrophysical processes in various dielectric materials and products under the influence of strong alternating electric fields. A study was made of the features of defects on the rod and the terminal-terminal contact, a diagram of the electrophysical processes accompanying the emission of partial discharges was constructed, and the causes of their occurrence were established.

Keywords: *remote diagnosis, partial discharges, nondestructive testing, high-voltage insulators, Photonic Crystal, insulation defects, portable diagnostic tool*

Acknowledgments: *The work, which is made an article is made with the financial support of RUSSIAN FOUNDATION for BASIC RESEARCH under the research project No. 18-08-00203.*

For citation: Golenischev-Kutuzov AV, Ivanov DA, Potapov AA, Krotov VI. Using contactless methods of diagnostics of high electric fields. *Power engineering: research, equipment, technology*.2019;21(4):123-133. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-123-133.

Введение

В настоящее время в условиях активно развивающейся электроэнергетической отрасли становится все более актуальной проблема регистрации электрических полей промышленной частоты (50 – 60 Гц), являющихся частью сверх низкочастотного диапазона радиочастотного спектра, наиболее распространенного как в производственных условиях, так и в быту. На производстве эти поля генерируются таким оборудованием, как линии электропередачи, открытые распределительные устройства, токопроводы, различные высоковольтные аппараты, трансформаторы, высоковольтные вводы, устройства защиты и автоматики, сборные соединительные шины, коммутаторы и т. д. Все эти устройства оказывают сильное негативное влияние не только на электронную

технику, но, самое главное, и на окружающих людей. Воздействие на организм человека может приводить к нарушениям в работе нервной и сердечно-сосудистой систем, к изменениям в составе крови. Степень воздействия, в первую очередь, зависит от интенсивности и продолжительности излучения. Длительные воздействия приводят к патологиям различных органов. В соответствии с санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами предельно допустимый уровень напряженности поля на рабочих местах обслуживающего персонала при воздействии в течение 1 ч за смену – 60 кВ/м. При этом неисправное электрооборудование может выступать дополнительным источником высоко- и низкочастотного излучения.

Литературный обзор

Начиная с конца XX века стал постепенно изменяться взгляд на диагностику рабочего состояния высоковольтного оборудования: от стендового контроля с выводом оборудования из эксплуатации к дистанционному контролю оборудования под рабочим напряжением. Однако до сих пор для реального обследования высоковольтных изоляторов предусмотрен только контактный электрический способ измерения параметров частичных разрядов, что закреплено в новых стандартах. Согласно мировым данным по использованию дистанционных методов инспекции воздушных линий электропередачи и открытых распределительных устройств подстанций, больше чем 40 % компаний продолжают, в основном, осматривать оборудование визуально. Инфракрасную диагностику и наблюдения приборами ночного видения применяют примерно 15 % предприятий. Только небольшая часть предприятий использует радио и ультразвуковой контроль.

Таким образом, представляется крайне важной возможность бесконтактного обнаружения источников электрических полей для определения степени их влияния на окружающее пространство. Кроме того, регистрация локальных перенапряжений в обмотках трансформаторов, в высоковольтных изоляторах и кабелях может указывать на присутствие дефектов изоляции, которые, в конце концов, становятся причиной повреждений и даже разрушений изоляционных элементов. Именно поэтому необходимо контролировать возникновение локальных перенапряжений в процессе эксплуатации высоковольтной изоляции. А это наиболее удобно осуществлять дистанционно и бесконтактно, так как в этом случае нет необходимости вывода оборудования из эксплуатации. Однако до последнего времени, несмотря на актуальность поставленной задачи, степень разработанности подобных способов контроля крайне мала [3–7]. И хотя уже существуют отдельные попытки их создания [8, 9], они до сих пор не нашли широкого применения в высоковольтных системах. Недостаточная разработанность дистанционных бесконтактных методов контроля перенапряжений в высоковольтной изоляции побудила нас продолжить исследования в этом направлении. То есть целью наших изысканий стало создание способа бесконтактного дистанционного измерения электрических полей на различных видах высоковольтной изоляции, в котором устранены недостатки предыдущих разработок. Другими словами, необходима разработка комплексного метода и соответствующего ему приборного обеспечения для непрерывной бесконтактной диагностики рабочего состояния на всех этапах эксплуатации высоковольтных изоляторов, начиная с момента включения их в электрическую сеть. Результатом исследований должно стать обеспечение возможности регистрации момента возникновения преддефектного состояния за счет выявления областей с повышенной напряженностью электрического поля и измерения градиентов напряженности электрического поля в этих областях с последующим выделением дефектов.

Методика исследования

Двухканальный метод, включающий электромагнитный и акустический методы диагностики, заключается в следующем. Регистрация электромагнитных импульсов частичных разрядов (далее – ЧР) (рис.1) осуществляется электромагнитным датчиком – в данном случае направленной антенной, позволяющим детектировать импульсы в интервале частот 0,5 – 600 МГц. Регистрация акустических импульсов осуществляется акустическим датчиком, которым является активная параболическая антенна, работающая на частоте 40 кГц. Выбор частоты измерений был обоснован такими факторами, как частотная зависимость затухания волн, производственные шумы и электромагнитные помехи окружающего электрического оборудования. Так акустические шумы доминируют в низкочастотной области (20–20 кГц), верхний частотный предел ограничен частотной зависимостью затухания ($f \geq 100$ кГц). В интервале 35 – 45 кГц, как показали эксперименты, при отношении сигнал/шум ≈ 2 акустические импульсы от ЧР регистрируются на расстоянии 15 – 25 м. С учетом низкочастотных производственных

электромагнитных помех в диапазоне 50–200 МГц и выше 600 МГц наиболее предпочтительными для электромагнитной регистрации ЧР являются полосы 20 – 50 МГц и 400 – 550 МГц, причем интенсивность сигналов ЧР значительно выше во второй полосе, чем в первой.

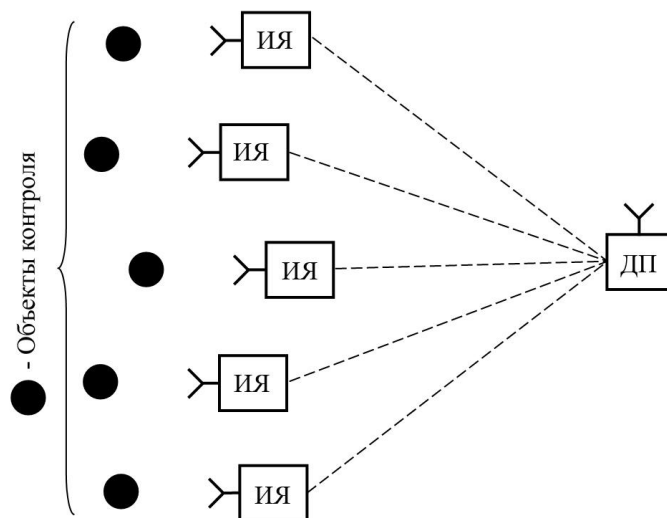


Рис. 1. Схематичное расположение измерительного комплекса:
ИЯ – измерительная ячейка, ДП – диспетчерский пункт

При использовании направленной антенны комплекс обеспечивает локализацию источника сигналов с точностью до 1–2 метров с расстояния 5–10 метров даже в полевых условиях при большом количестве источников сигналов и отражающих поверхностей. В диапазоне СВЧ уровень помех значительно ниже и можно использовать антенны с высокой степенью направленности, обеспечивающие локализацию источника сигналов в хороших условиях с точностью локализации порядка 0,5 метра. Эти датчики наиболее чувствительны к дефектам в наружных частях оборудования.

Входящий в состав комплекса акустический датчик позволяет провести довольно точную локализацию источника сигналов внутри объекта низкочастотных ЧР [10]. При этом измеряется задержка момента прихода акустического импульса относительно электрического сигнала в нескольких точках оборудования и, на основании этого, вычисляется ориентировочное положение источника с учетом конструкции конкретного объекта. Акустические датчики практически не подвержены внешним помехам на силовом оборудовании подстанций.

Схематичное расположение измерительных ячеек в составе комплекса с объектами измерения показано на рис. 1. Акустические и электромагнитные датчики, подключенные к АЦП с модулем беспроводной сети автоматизации процессов (далее – БСАП), помещаются рядом с объектом контроля. Данные, получаемые от датчиков (далее – ИЯ), посредством модуля БСАП собираются и передаются на диспетчерский пункт (далее – ДП).

Модуль БСАП представляет собой микроконтроллерное устройство с радиопередатчиком, работающим по стандарту *IEEE 802.15.4* на программном обеспечении собственного производства. В зависимости от прикладных задач модуль БСАП может использоваться отдельно как радиопередающее устройство, так и с шлюзованием данных на нужный протокол (*USB, RS-485, PLC* и т.д.) [11, 12].

Метод визуального контроля и поиска неисправного оборудования заключается в следующем [13]. Мы разработали конструкцию портативного прибора, позволяющего визуально определять дефекты в высоковольтном оборудовании. Схема использования устройства показана на рис. 2. В состав устройства входят: акустический датчик, электромагнитный датчик, мобильный телефон с видеокамерой, программное обеспечение. Для выявления неисправного оборудования необходимо направить устройство камерой телефона на обследуемый участок объекта. Входящие в состав комплекса датчики выявляют сигналы с неисправного оборудования и, с помощью установленного на телефоне программного обеспечения, накладывают интенсивность сигнала с датчиков на картинку с камеры (рис. 2).

Выявление дефектных изоляторов из общей системы высоковольтных изоляторов,

находящихся под рабочим напряжением и расположенных на определенных расстояниях друг от друга на распределительных узлах и подстанциях, представляет весьма сложную задачу [14]. Исходя из этих условий, нами было разработано портативное устройство для визуального выявления неисправных изоляторов и другого высоковольтного оборудования на объектах энергетики.

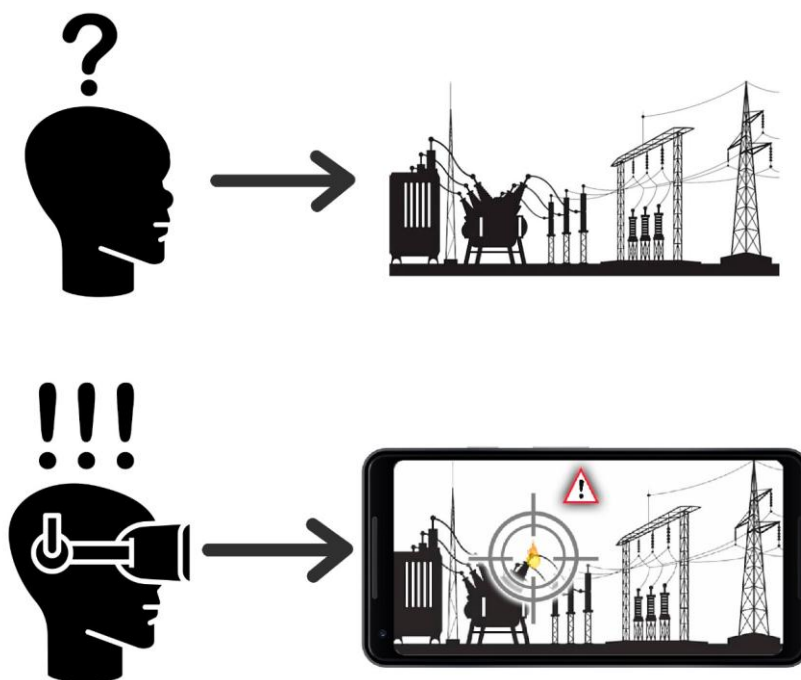


Рис. 2. Схема использования портативного устройства

Метод регистрации электрических полей высокой напряженности, основанный на электрооптическом эффекте, заключается в следующем. По изменению коэффициента отражения лазерного пучка от электрооптического датчика контроля напряженности электрического поля определяются локальные области с повышенной напряженностью этого поля (изменение коэффициента отражения пропорционально напряженности электрического поля). Также с помощью электрооптического датчика производится измерение градиентов электрического поля. Датчик предварительно градуируют в калиброванном переменном электрическом поле.

Блок-схема разработанного устройства бесконтактной дистанционной диагностики высоковольтных изоляторов показана на рис. 3. Устройство состоит из последовательно соединенных: лазерного излучателя 1, поляризационного дискриминатора 2, волоконного световода 3, фотоприемника 5, узкополосного усилителя и компаратора 6, персонального компьютера (или ноутбука) 7, а также электрооптического датчика 4, соединенного с волоконным световодом 3 и фотоприемником 5. Главный измерительный элемент устройства – электрооптический датчик 4 – имеет возможность размещения непосредственно в высоком переменном электрическом поле и выполнен без использования металлических элементов. Волоконный световод также защищен от воздействия электрического поля. Электрооптический датчик 4 представляет собой не что иное, как сегнетоэлектрический кристалл, на поверхности которого сформирована периодическая доменная структура (ПДС). Для повышения чувствительности и разрешающей способности при локации градиентов напряженности поля используются резонансные свойства ПДС для данной длины волны лазерного излучателя 1 [15]. В ходе экспериментальных измерений для всех диагностируемых высоковольтных изоляторов определяют средние значения напряженности переменных электрических полей, соответствующие рабочему высокому напряжению. Также определяют предельные границы градиентов напряженности электрических полей, при которых еще не происходит электрический пробой или перекрытие изоляторов.

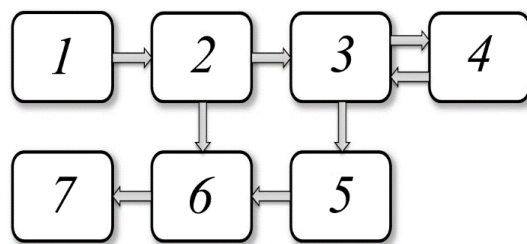


Рис. 3. Блок-схема устройства: 1 – лазерный излучатель; 2 – поляризационный дискриминатор; 3 – волоконный световод; 4 – электрооптический датчик; 5 – фотоприемник; 6 – узкополосный усилитель и компаратор; 7 – персональный компьютер

Для сканирования поверхности высоковольтных изоляторов электрооптический датчик 4 размещают на диэлектрической штанге и соединяют через поляризационный дискриминатор 2 и волоконный световод 3 с лазерным излучателем 1, а также с фотоприемником 5. Датчик приближают к изолятору и проводят сканирование поверхности. Оператор при этом находится на безопасном расстоянии от высоковольтного изолятора и касается только диэлектрической штанги. Полученные данные регистрируются с помощью специально разработанного программного обеспечения, которое записывает пространственное положение электрооптического датчика относительно поверхности изолятора и соответствующую данной точке напряженность электрического поля. Также компьютерная программа производит измерение нормальных и тангенциальных компонент градиентов напряженности электрического поля. Далее пространственное распределение повышенных, нормальных и тангенциальных к поверхности градиентов напряженности электрического поля сравнивается с ранее сохраненными эталонными значениями напряженности для полностью исправного высоковольтного изолятора. Общая схема измерений градиентов электрического поля показана на рис. 4.

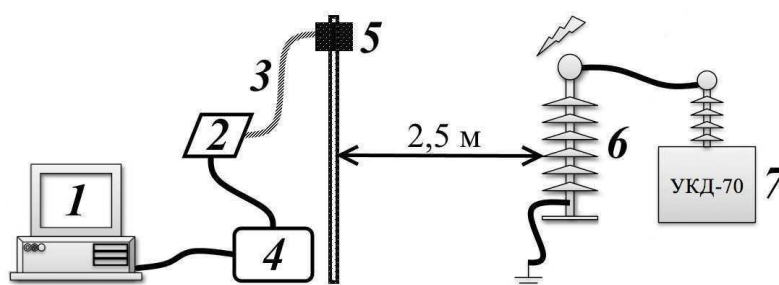


Рис. 4. Общая схема измерений градиентов электрического поля: 1 – персональный компьютер; 2 – лазерный излучатель и поляризационный дискриминатор; 3 – волоконный световод; 4 – блок управления, включающий фотоприемник и узкополосный усилитель с компаратором; 5 – электрооптический датчик, размещенный на диэлектрической штанге; 6 – высоковольтный изолятор; 7 – установка для испытания диэлектриков УКД-70

Основные результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим процесс регистрации ЧР электромагнитным и акустическим методом подробнее. На рис. 5 показана блок-схема измерительного устройства.

Измерительная ячейка установлена рядом с объектом исследования – высоковольтным изолятором (поз.1 на рис. 5). Данные диагностики с ИЯ (поз. 2 на рис. 5) передаются по радиоканалу на диспетчерский пункт. К ПК, установленному на диспетчерском пункте, по интерфейсу *USB* подключен модуль БСАП, который принимает поступающие по радиоканалу данные с измерительной ячейки (поз. 2 на рис. 5). Надёжная связь между соседними устройствами может осуществляться на расстоянии до 1000 метров при расположении соседних устройств в пределах прямой видимости, что может быть использовано в случае выхода из строя одного или нескольких устройств, так как есть возможность передавать информацию, минуя неисправные звенья.

Схема измерительной ячейки показана на рис.6. Измерительная ячейка оборудована электромагнитной и ультразвуковой антеннами с соответствующими приемниками. АЦП соединен с модулем БСАП по интерфейсам *I2C*, *SPI* или *UART/USART*. Модуль БСАП передает получаемые данные на диспетчерский пункт по

радиоканалу 2,4 ГГц.

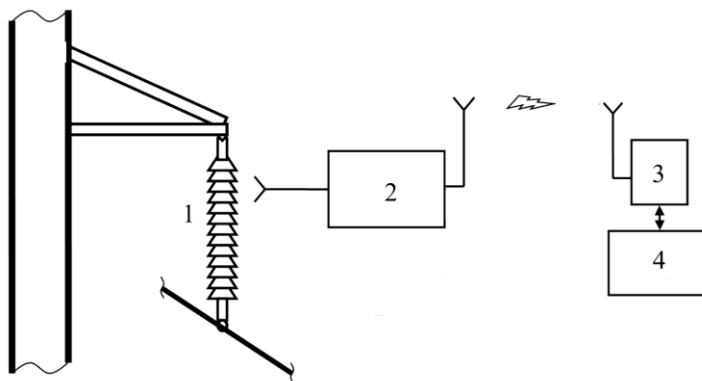


Рис. 5. Блок-схема измерительного устройства: 1 – высоковольтный изолятор; 2 – измерительная ячейка; 3 – модуль БСАП с интерфейсом *USB*; 4 – персональный компьютер

На ПК происходит сбор информации, ее запись и последующая обработка информации об амплитуде, частоте повторения и фазе сигналов с помощью разработанной программы способом бесконтактной диагностики высоковольтных полимерных изоляторов. Накопление сигналов по узким фазовым интервалам (порядка 20 град.) происходит в течение 18 с, вполне удовлетворяет стохастическому характеру возникновения ЧР.

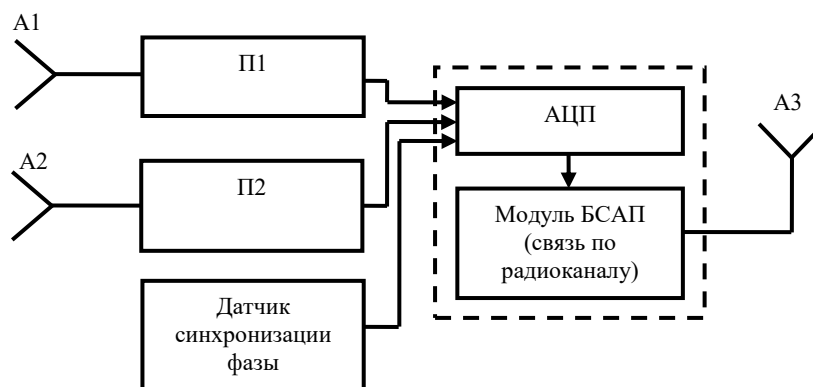


Рис. 6. Схема измерительной ячейки: А1 – антенна для приема ультразвуковых импульсов; А2 – антенна для приема электромагнитных импульсов; А3 – антенна для передачи измерительной информации по радиоканалу; П1 – приемник ультразвука; П2 – приемник электромагнитного излучения; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Процесс обработки сигналов ЧР заканчивается построением следующих характеристик: амплитуд и числа импульсов в каждом фазовом интервале и распределения числа импульсов по амплитудам.

Полученное фазовое распределение параметров импульсов сравнивается с ранее записанным распределением параметров импульсных сигналов для (бездефектного) ВИ того же типа. Поскольку скорости распространения электромагнитных и акустических импульсов отличаются на несколько порядков, то для их синхронизации с каждым конкретным фазовым интервалом используется блок фазовой синхронизации, учитывающий расстояние между дефектом и датчиками.

Метод регистрации электрических полей высокой напряженности основан на электрооптическом эффекте. Физический принцип работы электрооптического датчика основан на эффекте изменения показателя преломления лазерного пучка, проходящего через периодическую доменную структуру, находящуюся в электрическом поле с напряженностью E . Этот эффект носит название «линейный электрооптический эффект» или «эффект Погкельса». Условие максимального отражения (или прохождения) лазерной волны с длиной λ_0 от ПДС выполняется при равенстве:

$$\lambda_0 = 2nD \text{ (отраж.)}, \quad (1)$$

$$\lambda = (2n + 1)D \text{ (прелом.)}, \quad (2)$$

где n – показатель преломления; D – период ПДС.

Сдвиг резонансной частоты ПДС соответствует изменению резонансной длины волны:

$$\lambda_m = (\lambda_0 - \lambda_E) = n^3 r D E, \quad (3)$$

где r – электрооптический коэффициент; λ_E – длина волны в приложенном электрическом поле.

Таким образом, максимальный коэффициент отражения R лазерной волны от ПДС убывает с увеличением резонансной длины волны.

Изменение коэффициента отражения R можно представить в виде

$$\Delta R = (dR/dE)E. \quad (4)$$

Из этого выражения следует:

$$E = \lambda m (n^3 r D) - 1, \quad (5)$$

а значит

$$dR/dE = (dR/d\lambda m) n^3 r D. \quad (6)$$

Для наглядности на рис. 7 показан график зависимости значения коэффициента отражения R от изменения резонансной длины волны. Если длину волны лазерного излучения λ_m настроить на середину склона спектральной кривой отражения, соответствующей значению $R_{\max}/2$, то переменное электрическое поле будет создавать соответствующее изменение коэффициента отражения (ΔR). Использование практически линейного отрезка $dR/d\lambda_m$ позволяет в линейном масштабе определять значения поля E .

Используя предложенный метод дистанционного бесконтактного измерения напряженности электрического поля, нами была выполнена диагностика состояния группы реальных высоковольтных полимерных изоляторов ЛК70/35. Эксперименты проводились на стенде кафедры «Промышленная электроника и светотехника» Казанского государственного энергетического университета. Состояние изоляторов проверялось путем сканирования электрооптическим датчиком вдоль стержня изолятора на расстоянии 2,5 м.

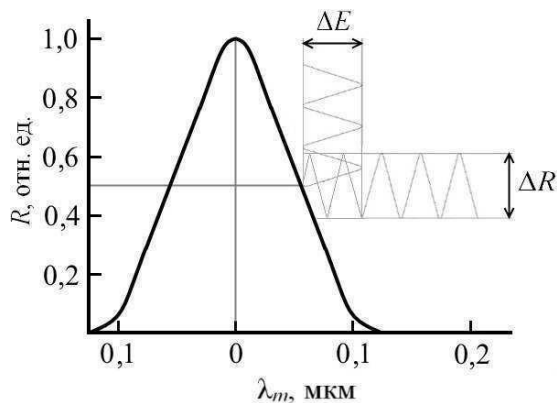


Рис. 7. Зависимость значения коэффициента отражения R от изменения резонансной длины волны

В ходе экспериментов были выявлены несколько дефектных изоляторов с поврежденным контактом стержень–электрод, а также ряд изоляторов, находящихся в преддефектном состоянии. На рис. 8 показано распределение напряженности электрического поля вдоль образца для дефектного (a) и бездефектного (b) полимерных изоляторов типа ЛК70/35. Небольшое увеличение E вблизи оконцевателей обоих образцов можно объяснить отсутствием специальных экранов для выравнивания поля по всей длине.

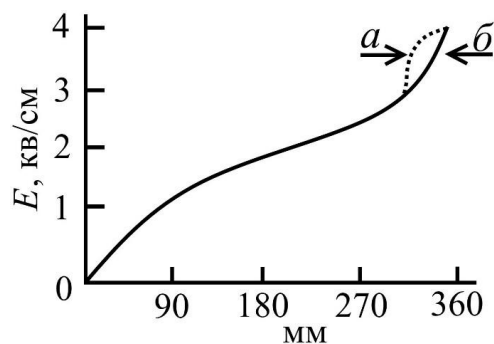


Рис. 8. Распределение напряженности поля между оконцевателями дефектного (а) и бездефектного (б) изоляторов. Изменение поля на дефекте изображено пунктиром

Выводы

Разработан комплекс методов дистанционной диагностики рабочего состояния высоковольтных изоляторов. Он основан на регистрации, передаче и последующей компьютерной обработке сигналов частичных разрядов, детектированных электромагнитным, акустическим и электрооптическим датчиками. В дополнение к ним используется визуальный контроль и поиск неисправностей высоковольтного оборудования на объектах энергетики. Таким образом, можно утверждать, что представленный комплекс, включающий бесконтактную дистанционную диагностику состояния высоковольтных изоляторов с использованием фотонного кристалла в качестве электрооптического датчика, позволяет определять момент возникновения преддефектного состояния изоляторов за счет выявления областей с повышенной напряженностью электрического поля. Измерение градиентов напряженности электрического поля в этих областях позволяет определять возможное место образования дефектов в процессе эксплуатации. Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты подтверждают возможность промышленной применимости предложенного способа бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов, находящихся под рабочим напряжением.

Литература

1. Yi Hu, Kai Liu Inspection and Monitoring Technologies of Transmission Lines with Remote Sensing // Academic Press. 2017. pp. 281-508.
2. R. Bartnikas Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018; V. 9, № 5, pp. 763-808.
3. Славинский А.З., Устинов В.Н. Обзор по направлению «Материалы и разработка новых методов испытаний и средств диагностики» // Энергия единой сети. 2016. №4. С. 6–11.
4. Rodrigo Mor, L.C. Castro Heredia, D.A. Harmsen, F.A. Muñoz, A new design of a test platform for testing multiple partial discharge sources, International Journal of Electrical Power & Energy Systems. V. 94. pp. 374-384, 2018.
5. Симановский И.В. Индикатор пробоя полимерного изолятора // Электротехника. 2013. №6. С. 21–24.
6. Хохлов А.В., Воркунов О.В., Афанасьева Т.И. Анализ современных методов и средств диагностики изоляторов воздушной линии электропередачи // Вестник современных исследований. 2018. Т. 20, № 5-3. С. 545–547.
7. Гимадиев Р.А., Ившин И.В., Мухортов И.С., Биалов Ф.Ф., Валиуллин Р.Р., Мифтахова Н.К. Эффективность методики оценки результатов контроля технического состояния кабельных линий среднего напряжения // Энергетика Татарстана. 2016. №2. С. 68–71.
8. Runde D., Brunken S., Ruter C., Kip D. Integrated optical electric field sensor based on a Bragg grating in lithium niobate // Appl. Phys. B. 2007. V. 86. N.1. pp. 91-95.
9. Воротницкий В.Э., Дмитриев И.Н., Млоток А.В., Демин А.Н. Диагностика механического состояния опорно-стержневой фарфоровой изоляции высоковольтных разъединителей в условиях эксплуатации // Энергия единой сети. 2014. №2. С. 2–14.
10. Свистунов Н.А. Анализ методов диагностики технического состояния электротехнических устройств, основанных на обнаружении и измерении уровня частичных разрядов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. №12. С. 100–102.
11. 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 // ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V.13. N. 6. pp. 2358-2362.

12. Yaroslavsky D.A., Sadykov M.F., Konov A.B., Ivanov D.A. Goryachev M.P. Methodology of ice coating monitoring on overhead transmission lines considering misalignment using wireless communication channel sensors // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. V. 12. N. 22. pp. 6479-6482.

13. Балобанов Р.Н., Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А., Маргулис С.М. Устройство оптической индикации дефекта высоковольтной изолирующей конструкции // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2017. №3-4. С. 119–125.

14. Степанов В.М., Судаев А.С. Дефекты в изоляции электротехнических устройств, приводящие к появлению частичных разрядов // *Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки*. 2018. №6. С. 386–391.

15. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Kalimullin R.I., Mardanov G.D., Potapov A.A. Ultrasonic tunable transducer on domain structures // *Ferroelectrics*. 2012. V.441. N.1. pp. 25-29.

Авторы публикации

Голенищев-Кутузов Александр Вадимович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: alex.kutuzov@mail.ru.

Иванов Дмитрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Потапов Андрей Александрович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Кротов Владимир Иванович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Yi Hu, Kai Liu Inspection and Monitoring Technologies of Transmission Lines with Remote Sensing *Academic Press*. 2017; 281-508. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812644-8.00005-9>.

2. Bartnikas R. Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018; 9(5):763-808. doi: 10.1109/TDEI.2002.1038663.

3. Slavinsky AZ., Ustinov V.N. Review in "Materials and development of new test methods and diagnostic tools» *Unified Energy Network*. 2016;4:6-11.

4. Rodrigo Mor, L.C. Castro Heredia, D.A. Harmsen, F.A. Muñoz, A new design of a test platform for testing multiple partial discharge sources. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018;94:374-384.

5. Simanovski IV. Polymer insulator breakdown Indicator *Electrical Equipment*. 2013;6:21-24

6. Hohlov AV., Vorkunov OV., Afanasyeva TI. Analysis of modern methods and tools for the diagnosis of overhead transmission line insulator. *Bulletin of modern research*. 2018; 20(5-3):545-547.

7. Gimadiev RA., Ivshin IV., Muhortov IS., Bilalov FF., Valiullin RR., Miftahova N. The effectiveness of methodology for assessing the results of the medium-voltage cable lines technical state monitoring. *Energy Tatarstan*. 2016; 2: 68-71.

8. Runde D., Brunken S., Ruter C., Kip D. Integrated optical electric field sensor based on a Bragg grating in lithium niobate *Applied Physics*. 2007;86 (1):91-95.

9. Vorotnitsky VE., Dmitriev IN., Mlotok AV., Demin AN. Diagnostics of mechanical condition of the locomotive-Rod high voltage isolation porcelain disconnectors in operation. *Unified Energy Network*. 2014;2:2-14.

10. Svistunov NA. Analysis of diagnostics methods of technical condition of electrotechnical devices, based on detection and measurement of the level of partial discharges. *Izvestiya TulGU Technical science*. 2018;12:100-102.

11. Ivanov DA., Golenishchev-Kutuzov AV., Yaroslavsky DA., Sadykov MF. Portable complex for remote control of high-voltage insulators using wireless data collection and transmission module. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(6):2358-2362.

12. Yaroslavsky DA., Konov MF., Ivanov AB., Goryachev DA. Methodology of ice coating

monitoring on overhead transmission lines considering misalignment using wireless communication channel sensors. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017;12(22): 6479-6482.

13. Balaban RN., Zaripov DK., Nasibullin RA., Margulies SM. Optical indication of the defect of high voltage insulation design. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017; 3-4:119-125.

14. Stepanov VM., Sudavnyj AS. Defects in the insulation of electrical devices, leading to the appearance of partial discharges. *Proceedings of Tula State University. Technical science*. 2018;6:386-391.

15. Golenishchev-Kutuzov AV., Golenishchev-Kutuzov VA., Kalimullin RI., Mardanov GD., Potapov AA. Ultrasonic tunable transducer on domain structures. *Ferroelectrics*. 2012; 441(1):25-29.

Authors of the publication

Alexandr V. Golenishchev-Kutuzov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Dmtriy A. Ivanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Andrey A. Potapov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vladimir I. Krotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

27 мая 2019 г.