



**МЕТОД И УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
ИЗОЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ**

Галиева¹ Т.Г., Иванов^{1,2} Д.А.,
Садыков^{1,2} М.Ф., Андреев¹ Н.К., Хамидуллин¹ И.Н.

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

²Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский
научный центр РАН, г. Казань, Россия
79534929817@ya.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка метода непрерывного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных изоляторов на основе регистрации среднего уровня мощности сигнала электромагнитного излучения с синхронной фильтрацией с привязкой к фазе приложенного напряжения, с учетом влажности и температуры окружающей среды. Аппаратная и программная реализация прибора на основе данной методики. Проведение экспериментальных исследований. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи применялись методы регистрации среднего уровня мощности электромагнитных сигналов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье описана актуальность темы, рассмотрены различные физические методы регистрации частичных разрядов (ЧР) и определение их местоположения. На лабораторном стенде проведены исследования среднего уровня мощности сигнала дефектного и бездефектного высоковольтных изоляторов, находящихся под напряжением. Проведен эксперимент по определению временного затухания локального сигнала от ЧР. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработан метод для диагностики состояния высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на основе непрерывного мониторинга уровня электромагнитного излучения с привязкой к фазе сетевого напряжения. Метод диагностики высоковольтных изоляторов дает возможность контролировать состояние изоляции удаленно и непрерывно.

Ключевые слова: *Разработка метода диагностики изоляторов; методика неразрушающего контроля изоляции; частичные разряды; высоковольтные диэлектрические элементы.*

Благодарности: *Научные исследования проводились в рамках выполнения госзадания ФИЦ КазНЦ РАН.*

Для цитирования: Галиева Т.Г., Иванов Д.А. Садыков М.Ф., Андреев Н.К., Хамидуллин И.Н. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 165-177. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177.

**METHODOLOGY AND DEVICE FOR DIAGNOSTICS OF HIGH-VOLTAGE
INSULATORS BASED ON CONTINUOUS RECORDING OF THE SPATIAL LEVEL
OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF PARTIAL DISCHARGES**

TG. Galieva¹, DA. Ivanov^{1,2}, MF. Sadykov^{1,2}, NK. Andreev¹, IN. Khamidullin¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Zavoisky Physical-Technical Institute FRC «Kazan Scientific Center of Russian Academy
of Sciences», Kazan, Russia
79534929817@ya.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Development of diagnostic methods for high-voltage insulators in operation based on continuous recording of electromagnetic radiation. Hardware and software implementation of the device based on this technique. Carrying out experimental researches. *METHODS.* Received signal strength indicator measuring method of electromagnetic signals and method of determining the attenuation of electromagnetic radiation in space were used. *RESULTS.* The article describes relevance of the topic, considers various physical methods for registering partial discharges (PD) and their localization. Studies of the average signal level of defective and non-defective high-voltage insulators on load operation (10-15 kV) were carried out using the laboratory stand. An experiment was carried out to determine the space attenuation of a local signal from the PD. *CONCLUSION.* A technique for diagnosing high-voltage insulators during operation has been developed. This technique is based on continuous monitoring of electromagnetic radiation from partial discharges. Method for diagnosing high-voltage insulators makes it possible to monitor the insulation condition remotely and continuously.

Keywords: *diagnostic method for insulators; non-destructive testing of insulation; partial discharges; high-voltage dielectric elements.*

Acknowledgments: *Research were performed with the financial support from the government assignment for FRC Kazan Scientific Center of RAS.*

For citation: Galieva TG, Ivanov DA., Sadykov MF, Andreev NK., Khamidullin IN. Methodology and device for diagnostics of high-voltage insulators based on continuous recording of the spatial level of electromagnetic radiation of partial discharges. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(4):165-177. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177.

Введение (Introduction)

Мониторинг состояния функционирующего изоляционного оборудования необходим для оценки срока службы и планирования его технического обслуживания в энергосистеме. В энергетике РФ имеется высокая доля изоляционного оборудования, исчерпавшего эксплуатационный ресурс, а также оборудования, находящегося в неудовлетворительном состоянии ($ИТС \leq 50$). Согласно Положению [1], перечисленное оборудование, при условии его эксплуатации без отклонения от номинальных параметров, ограничения дальнейшей эксплуатации могут быть сняты при условии некоторых параметров, в том числе: использования современных методов и средств технического диагностирования преимущественно под рабочим напряжением (виброакустический контроль, измерение частичных разрядов), в том числе при проведении учащенного контроля технического состояния.

Электрическая изоляция является важным элементом, требующим контроля, поскольку она подвержена выходу из строя при высоких электрических нагрузках. Наличие ЧР в течение длительного времени в изоляционном оборудовании может привести к катастрофическим сбоям в системах высокого напряжения, что, в свою очередь, может повлечь экономические, энергетические потери и даже вызвать человеческие жертвы. Таких сбоев и потерь можно избежать, постоянно контролируя техническое состояние высоковольтной изоляции по уровню ЧР [2]. Большое количество фактов показывает, что первоначальные причины большинства аварий электрооборудования связаны с дефектами их внутренней изоляции [3, 4].

На сегодняшний день существуют различные бесконтактные методы диагностики ВИ, направленные на периодичный контроль [5, 6]. Выявляемость дефектов изоляции при периодическом контроле существенно зависит от погоды во время проведения измерений, так как частичные разряды наибольшей амплитуды достигают в период высокой влажности окружающей среды (дождь, роса) или зимой при температуре таяния снега и изморозевых отложений на поверхности изоляторов.

В соответствии со Стратегией развития электросетевого комплекса Российской Федерации для оборудования электросетевых объектов, ЛЭП и сооружений должен реализовываться и осуществляться переход от системы планово-предупредительного вида организации ремонта на объектах электросетевого хозяйства к организации ремонта по фактическому техническому состоянию с учетом последствий отказа основного технологического оборудования (рисков). Для высоковольтной изоляции

такой переход возможен при внедрении мониторинга технического состояния с целью оценки её старения и остаточного ресурса [7].

В связи с этим, разработка непрерывного дистанционного «онлайн» мониторинга высоковольтных изоляторов, определяющего дефекты в изоляционном оборудовании и уровень технического состояния, является актуальной задачей на сегодняшний день.

Научная и практическая новизна исследования заключается в следующем:

- разработан метод непрерывного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных изоляторов на основе регистрации среднего уровня мощности сигнала электромагнитного излучения с синхронной фильтрацией с привязкой к фазе приложенного напряжения, с учетом влажности и температуры окружающей среды;
- разработана методика определения места расположения наиболее опасных дефектов в высоковольтных изоляторах, позволяющая прогнозировать процессы деградации диэлектрического материала;
- разработано устройство непрерывного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных изоляторов для определения дефектов в изоляторах и их развития;
- реализованы алгоритмы обработки данных системы непрерывного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных изоляторов;
- разработано программное обеспечение для устройств контроля, системы сбора и накопления данных, анализа и визуализации информации о техническом состоянии высоковольтной изоляции.

Литературный обзор (Literature Review)

Обнаружение ЧР является важным инструментом для диагностики состояния изоляции при техническом обслуживании оборудования. Что касается обнаружения ЧР, то для тестирования изоляции был разработан и применен ряд методов, включая электрический метод [8], основанный на ГОСТ Р 55191-2012¹, и другие нетрадиционные методы для достижения удовлетворительного уровня мониторинга. Нетрадиционные методы основаны на физических явлениях, сопровождающих ЧР, таких как электромагнитные волны [9], акустические волны [10, 11] (оба метода предлагаются в стандарте IEC TS 62478²), тепловизионный [12], ультрафиолетовый, оптический [7, 13, 14].

Многие методы имеют существенные недостатки, например, акустический сильно подвержен влиянию помех. Телевизионный и ультрафиолетовый являются дорогостоящими, так как одна лишь ультрафиолетовая камера стоит порядка 100 000 евро и создание прибора для непрерывной диагностики изоляторов на их основе экономически невыгодно. Электромагнитный метод по обнаружению ЧР характеризуется высокой стабильностью и возможностью выбора полосы частот измерений [17]. Кроме того, электромагнитные датчики имеют невысокую стоимость.

В настоящее время метод регистрации электромагнитного излучения на ультравысоких частотах (УВЧ, 300-3000 МГц) широко используется для обнаружения ЧР в энергетическом оборудовании [15, 16]. Благодаря быстрому развитию вычислительного оборудования и алгоритмов обработки данных интеллектуальный метод диагностики неисправностей ЧР, основанный на данных УВЧ, за последние два десятилетия добился значительного прогресса.

Сущность электромагнитного метода заключается в регистрации электромагнитных волн (ЭМ) ЧР антеннами датчиков, преобразовании сигналов в напряжение, аналого-цифровом преобразовании и передачи данных на сервер. Как правило, эти данные сохраняются в трех формах, а именно, в виде сигнала во временной области, частотных спектрограмм с синхронизацией по фазе сетевого напряжения и частотно-временной спектрограммы. В имеющихся системах обнаружения сигналы обрабатываются с помощью современных алгоритмов обработки, включая нейросетевые методы [18], и далее диспетчерские пункты уведомляют персонал о возникновении ЧР, их местоположении, типе и степени опасности дефекта. Эта информация имеет решающее значение для разработки соответствующими отделами разумных стратегий технического обслуживания.

Определение местоположения источника разрядов имеет важное значение в

¹ ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов

² IEC TS 62478 High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods

мониторинге изоляции. В методах, основанных на использовании УВЧ, для локализации источников ЧР в трехмерном пространстве датчики УВЧ должны быть размещены в разных положениях [4, 19]. Во время события возникновения ЧР импульсные (длительностью от 2 до 100 нс) сигналы УВЧ, излучаемые источниками, улавливаются датчиками УВЧ, расположенными в разных местах с известными координатами. Локализация источника ЧР на основе УВЧ может быть выполнена с использованием информации об уровне мощности сигнала (англ. *Received Signal Strength Indicator* - *RSSI*) [9, 16], угла прихода ЭМ волны от ЧР до приемников (англ. *angle of arrival* - *AOA*) [17], определения времени прибытия сигнала до приемников (англ. *time of arrival* - *TOA*), определения разницы во времени прибытия сигналов до приемников (*time-difference-of-arrival* - *TDOA*) [18, 19].

В твердой изоляции импульсные токи ЧР имеют длительность 10^{-9} - 10^{-6} с, а у токов поверхностных ЧР длительность составляет 10^{-7} с [20]. Поэтому существующие сегодня системы мониторинга изоляции, основанные на методах, измеряющих время распространения сигналов, являются сложными и дорогостоящими, поскольку они требуют синхронизации по времени высокочастотных аналоговых систем измерения и обработки, высокочастотных аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) и, как следствие, высоких вычислительных мощностей, что значительно усложняет и повышает стоимость системы.

Поэтому в ходе исследования были выбраны метод и алгоритм регистрации и локализации ЧР на основе среднего уровня мощности принимаемого сигнала (*RSSI*), пропорционального амплитуде разрядов в течение заданного времени измерения. Метод не требует сверхвысокой синхронизации по времени. Поскольку учитывается только средний уровень мощности принятого сигнала, основное преимущество метода *RSSI* по сравнению с методами *TDOA*, *TOA* и *AOA* заключается в том, что он не требует сложного и дорогостоящего оборудования для синхронного сбора данных, что значительно удешевляет систему мониторинга.

Материалы и методы (Materials and methods)

При периодическом диагностировании отследить тенденцию деградации изоляции практически невозможно. Уровень сигнала существенно зависит от погодных условий, ЧР наибольшей амплитуды достигают в период высокой влажности окружающей среды (дождь, роса) или зимой – при температуре таяния снега и образования изморозевых отложений на поверхности изоляторов. Поэтому непрерывный контроль состояния изоляции имеет преимущество по сравнению с методами, основанными на периодическом использовании приборов дистанционного диагностирования.

В работе предлагается алгоритм регистрации и локализации неисправного изолятора на основе приема среднего уровня мощности электромагнитного сигнала разряда, пропорционального амплитуде ЧР. В предлагаемом методе в заданном УВЧ диапазоне измеряется средний уровень мощности электромагнитного излучения с синхронной фильтрацией с привязкой к фазе приложенного напряжения, с учетом влажности и температуры окружающего воздуха. Синхронная фильтрация с привязкой к фазе приложенного напряжения представляет собой накопление и усреднение данных по уровню мощности излучения относительно периода фазы.

В предлагаемом методе по всей ширине спектра излучения ЧР с использованием нескольких каналов измеряется средний уровень мощности сигнала с синхронной фильтрацией с привязкой к фазе приложенного напряжения, с учетом влажности и температуры окружающего воздуха. Это дает возможность исключить случайные высокочастотные помехи, так как частичные разряды возникают при одном и том же напряжении при определенном угле фазы. Кроме того, полосы спектра частот, на которых уровень шума не позволяет выделить полезный сигнал, отбрасываются.

Такой подход позволяет отделить сигнал ЧР от других сигналов в радиоэфире, исключить сохранение осциллограмм сигналов и сложную математическую обработку. Так, например, помехи, излучаемые на подстанции, имеют частоту менее 400 МГц [20, 22].

Перед проведением лабораторных измерений нами просканирован спектр частот от 30 МГц до 2,75 ГГц, исключены из сканирования полосы частот, на которых имеются помехи, например, от сотовой связи 934 МГц и сигналы Wi-Fi на 2,4 ГГц. Сканирование проводилось с помощью портативного анализатора спектра *Signal Hound* USB-SA44B, работающий на частотах от 100 кГц до 12,4 ГГц, и трех видов антенн для различных частот (рамочная антенна на низких частотах, разработанная логопериодическая антенна на 800 МГц, штыревая широкополосная антенна на 868 МГц, штыревая широкополосная

антенна на 2,4 ГГц).

Частичный разряд широкополосный и поэтому для идентификации сигнала рассматривается широкий диапазон частот от 30 МГц до 2,7 ГГц с шагом до 5 МГц, но за исключением частот с высокочастотными помехами.

Пространственное определение дефектного изолятора производится с помощью измерения амплитуды мощности электромагнитного излучения одновременно на четырех устройствах контроля с приемными УВЧ антеннами, установленных в известных координатах. Рассмотрим на рисунке 1 модель электромагнитного поля, излучаемого ЧР [21].

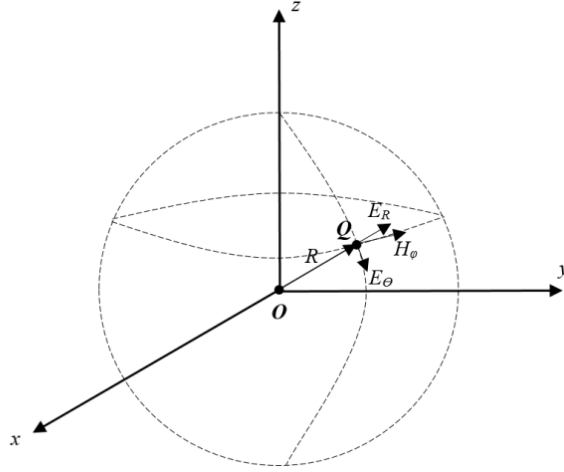


Рис.1. Модель электромагнитного поля излучения ЧР

Fig.1. Model of electromagnetic field of radiation of the CR

Предположим, что существует текущий элемент с током I и длиной l в точке O на рисунке 1. Согласно теории электромагнитных полей, для точки Q с расстоянием R до текущей ячейки O напряженность магнитного поля вдоль направления ϕ в точке Q может быть выражена как:

$$H_{\phi} = a_{\phi} \frac{Il}{4\pi} \sin \theta \left(\frac{jk}{R} + \frac{1}{R^2} \right) e^{-jkR} \quad (1)$$

Напряженность электрического поля в точке Q имеет направление E_R и направление E_{θ} , которые соответственно выражаются как:

$$E_R = a_R \frac{\eta_0 Il}{2\pi R^2} \cos \theta \left(1 + \frac{1}{jkR} \right) e^{-jkR} \quad (2)$$

$$E_{\theta} = a_{\theta} \frac{\eta_0 Il}{2\pi R^2} \sin \theta \left(1 + \frac{1}{jkR} - \frac{1}{k^2 R^2} \right) e^{-jkR} \quad (3)$$

где a_{θ} и a_R представляют единичные векторы трех направлений в системе координат, показанной на фиг. 1 соответственно; k – волновое число, которое можно обозначить как $k = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$, где ω , ϵ , μ – угловая частота тока, диэлектрическая и магнитная проницаемость соответственно, η_0 – собственный импеданс в вакууме, e^{-jkR} – разность фаз между точками Q и O . Поскольку ϵ и μ в воздухе равны 1, поэтому $k = \omega = 2\pi/\lambda$.

Поскольку время фронта волны импульсного тока ЧР обычно составляет наносекунды, длина волны электромагнитных волн, генерируемых ЧР, составляет около нескольких десятков сантиметров. Однако расположение устройств непрерывного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных изоляторов для определения дефектов в изоляторах, как правило, находится далеко от источника ЧР, что означает $R \gg \lambda/2\pi$. Следовательно, мы можем опустить $1/R^2$ и $1/R^3$ в (1)-(3), тогда:

$$H_{\phi} = a_{\phi} j \frac{Il}{2\lambda R} \sin \theta e^{-jkR} \quad (4)$$

$$E_{\theta} = a_{\theta} j \frac{\eta_0 \Pi}{2\lambda R} \sin \theta e^{-jkR} \quad (5)$$

Тогда:

$$|E_{\theta}| = \frac{\eta_0 \Pi}{2\lambda R} \sin \theta = M_1 \frac{\sin \theta}{R} \quad (6)$$

где M_1 является константой и относится только к текущей ячейке О.

В процессе генерации электрического разряда возбуждается электромагнитная волна, которая волновым фронтом облучает приемную антенну УВЧ с напряженностью падающей волны электрического поля E и напряженностью магнитного поля H , тогда плотность мощности S в этой точке может быть выражена как:

$$S = \frac{|E \cdot H^*|}{2} \quad (7)$$

Из (4), (5) и (7) мы имеем:

$$S = \frac{|E_{\theta}|^2}{2\eta_0} \quad (8)$$

Эффективная площадь антенны, обозначенная как A , выражается как:

$$A = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (9)$$

где G - коэффициент усиления антенны.

Из (8) и (9) принимаемая мощность антенны может быть записана как:

$$P = SA = \frac{G\lambda^2 |E_{\theta}|^2}{8\pi\eta_0} \quad (10)$$

Пусть сопротивление входной цепи антенны Z и амплитуда напряжения на выходе антенны, то есть амплитуда сигнала U , тогда мы имеем:

$$P = \frac{U^2}{Z} \quad (11)$$

Из (10) и (11) мы имеем:

$$U = M_2 |E_{\theta}| \quad (12)$$

где M_2 - постоянная величина, относящаяся только к используемой антенне.

Из уравнений (6) и (12) мы имеем:

$$U = M_1 M_2 \frac{\sin \theta}{R} \quad (13)$$

Уравнение (13) является основным выводом о связи между расстоянием до источника ЧР и амплитудной принимаемого сигнала. Следует отметить, что местоположение ЧР (θ и R) связано только со значением амплитуды (U).

Чтобы вывести уравнение локализации источника ЧР на основе значения амплитуды УВЧ, как показано на рисунке 2, мы предполагаем, что в точке О имеется источник ЧР, а в точке Q_i - антенна УВЧ.

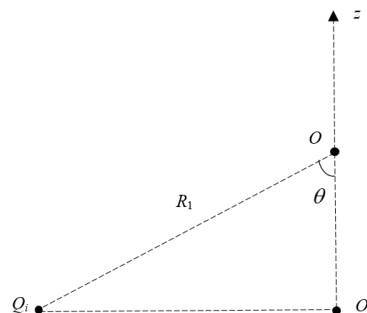


Рис. 2. Геометрическая схема между источником ЧР и УВЧ-антенной, где точка О - источник ЧР, точка Q_i - антенна УВЧ, R_1 - расстояние от источника до антенны

Fig. 2. Geometric diagram between CR source and UHF antenna, where O point is the source of CR, Q_i point is the UHF antenna, R_1 is the distance from source to antenna

Тогда

$$\sin \theta_i = \frac{Q_i O'}{O Q_i} = \frac{Q_i O'}{R_i} \quad (14)$$

Пусть координата точки О равна (x, y, z) , а координата точки Q_i равна (x_i, y_i, z_i) , тогда

$$\frac{\sin \theta_i}{R_i} = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \quad (15)$$

Следовательно, если используются четыре устройства непрерывного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных изоляторов для определения дефектов в изоляторах, т.е. $i = 1, 2, 3, 4$, из (13) мы получаем

$$\begin{aligned} \frac{\sin \theta_2}{R_2} &= \frac{U_2}{U_1} \frac{\sin \theta_1}{R_1} \\ \frac{\sin \theta_3}{R_3} &= \frac{U_3}{U_1} \frac{\sin \theta_1}{R_1} \\ \frac{\sin \theta_4}{R_4} &= \frac{U_4}{U_1} \frac{\sin \theta_1}{R_1} \end{aligned} \quad (16)$$

Координата источника ЧР может быть получена путем решения (15) и (16).

2. Метод определения источника разряда по модели затухания электромагнитного излучения.

Разработка устройства (device development)

На основе описанного в предыдущей главе метода было разработано устройство для диагностики ВИ [23]. Устройство представляет собой диагностическую часть, состоящую из электромагнитного датчика, датчиков фазы, температуры и влажности, микропроцессорную часть с памятью, передающую часть, системы автономного питания (рис.3.)

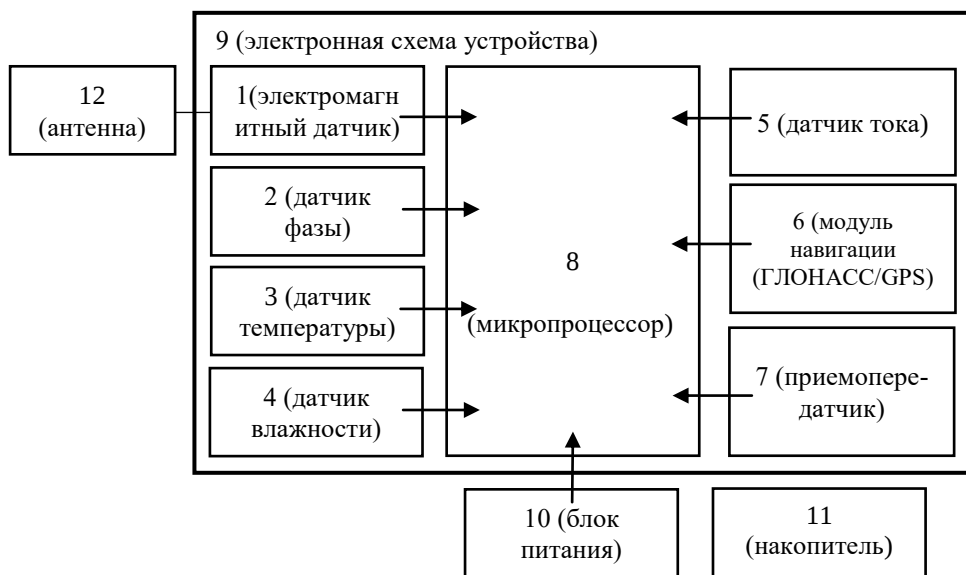


Рис.3. Структурная блок-схема

Fig.3. Structural flowchart

Устройства устанавливаются на фазные провода и формируются в группу для каждой опоры. Электромагнитный приемник 1 с помощью антенны непрерывно сканирует широкий диапазон частот узкими полосами по 5 МГц с усреднением, а полосы на которых уровень шума не позволяют выделить полезный сигнал – отбрасываются программным способом.

Все полученные данные синхронизируются в микропроцессорном модуле 8 с температурой и влажностью окружающего воздуха, полученные с помощью соответствующих датчиков 3, 4. Уровень влажности и температуры позволяет более точно определять наличие разрядов и дефектов в изоляторах от ЧР.

Далее данные с микропроцессора 8 передаются с помощью приемопередатчика 7 на диспетчерский пункт, где в специально разработанной программе (рис. 4) идет обработка данных с устройств и выявление дефектной гирлянды изоляторов.

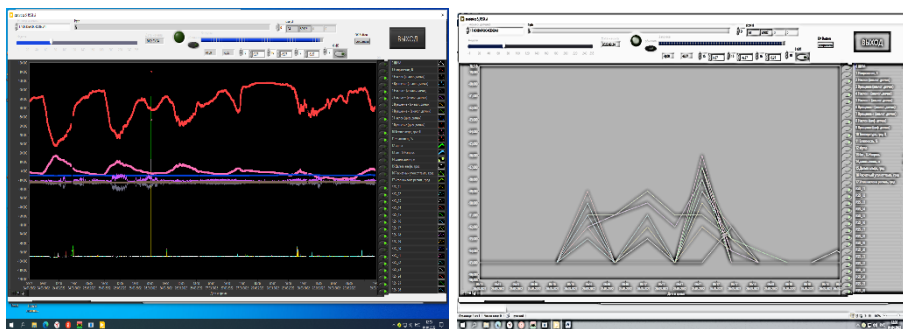


Рис. 4. Программное обеспечение обработки данных Fig. 4. Data processing software

На данный момент проводится опытная эксплуатация устройств мониторинга, установленных в ПАО «Татнефть» на ЛЭП 35 кВ.

Обсуждение результатов (Discussion of the results)

С целью проведения исследования разработанного метода и устройства мониторинга для регистрации ЧР в изоляторах в научно-исследовательской лаборатории ФГБОУ ВО «КГЭУ» «Мониторинг технического состояния и повышение надежности объектов энергетики» разработан лабораторный стенд [24], который состоит из следующих элементов: источник высокого напряжения АИД-70М, имеющего достаточно низкий уровень фоновых шумов с тем, чтобы иметь возможность измерять нормированную амплитуду частичного разряда при нормированном испытательном напряжении; дефектный и бездефектный стеклянный изолятор ПС70Е; защитное сопротивление, чтобы уменьшить фоновый шум от источника питания; и измерительная система, состоящая из электромагнитных датчиков, датчика фазы напряжения, соединительного кабеля, цифрового осциллографа и АЦП с ПК.

На лабораторном стенде проведен эксперимент с дефектным и бездефектным стеклянными изоляторами, находящимися под напряжением до 8,5 кВ. В ходе эксперимента замерялся средний уровень мощности электромагнитного сигнала с помощью высокочастотной антенны и электромагнитного модуля E70-868T14S. Уровень мощности накапливался и усреднялся в пределах одного периода сетевого напряжения. На рисунке 5 представлена схема проведения эксперимента.

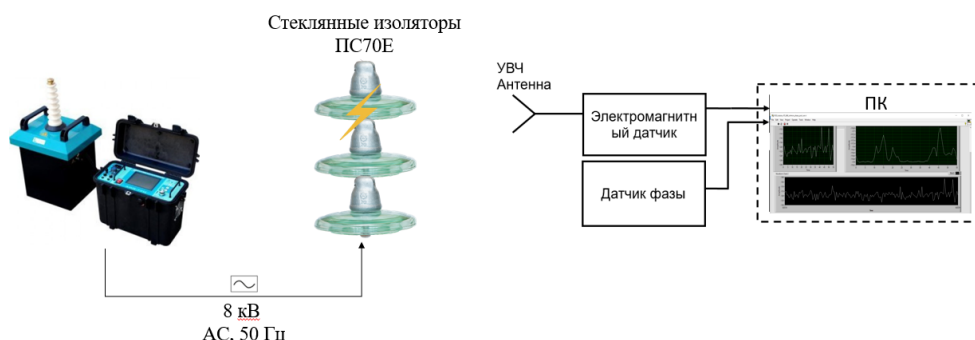


Рис.5. Схема проведения эксперимента

Fig. 5. Scheme of the experiment

На рисунке 6 представлена синхронная фильтрация среднего уровня мощности электромагнитного излучения относительно фазы приложенного напряжения. Данные накапливались и усреднялись в течение 15 минут (45000 периодов напряжения). Результаты измерения среднего уровня мощности электромагнитного излучения при подаче напряжения на бездефектный изолятор представлены на графике линией №1. Так как частичных разрядов в изоляции в этом случае не имеется, то результат показывает высокочастотный шум. Линией №2 показан результат измерения электромагнитным датчиков среднего уровня мощности при подаче напряжения на бездефектный изолятор.

Разница в принятой мощности сигналов на 2 дБм в каждом полупериоде сетевого напряжения позволяют выделить полезный сигнал и отделить частичные разряды, возникающие в дефекте.



Рис.6. Синхронная фильтрация среднего уровня мощности электромагнитного излучения в течение 15 минут (45000 периодов напряжения) относительно фазы приложенного напряжения у бездефектного и дефектного изоляторов. 1 – бездефектный изолятор, 2 – дефектный изолятор, 3 – фаза сетевого напряжения.

Fig. 6. Synchronous filtration of the average level of electromagnetic radiation power for 15 minutes (45,000 stress periods) relative to the phase of applied voltage at the defective and defective insulators. 1 - defective insulator, 2 - defective insulator, 3 - phase of the network voltage.

Пространственное определение дефектного изолятора производится с помощью измерения амплитуды мощности электромагнитного излучения одновременно на четырех датчиках. Для проверки теории и с целью соотношения расстояния от источника ЧР до одного из устройств контроля был проведен эксперимент по регистрации затухания электромагнитного (ЭМ) сигнала от ЧР (рис. 4), в котором один ЭМ датчик отдаляли от источника разряда на расстояния от 1 до 40 метров с шагом 1 метр и фиксировали в каждой точке значение мощности электромагнитного излучения. Схема эксперимента представлена на рисунке 7.



Рис. 7. Схема эксперимента по определению зависимости затухания ЭМ сигнала от расстояния

Fig. 7. Experiment scheme for determination of depreciation of EV signal from distance

В ходе эксперимента получена зависимость уровня мощности от расстояния до источника, представленная на рисунке 8, где черной линией (квадратные маркеры) указан полученный экспериментально график зависимости, а красной линией (круглые маркеры) – аппроксимация на основе алгоритма по уравнению [16, с. 5]

$$P_1 = P_0 - 10\alpha \lg \frac{d_1}{d_0}, \quad (17)$$

где P_1 – измеренный принимающим узлом уровень мощности сигнала в дБм, P_0 – уровень мощности сигнала в опорной точке, α – показатель потерь на пути, равный 1,4, d_1 – расстояние от источника разряда до точки измерения, d_0 – расстояние между опорной точкой и источником разряда.

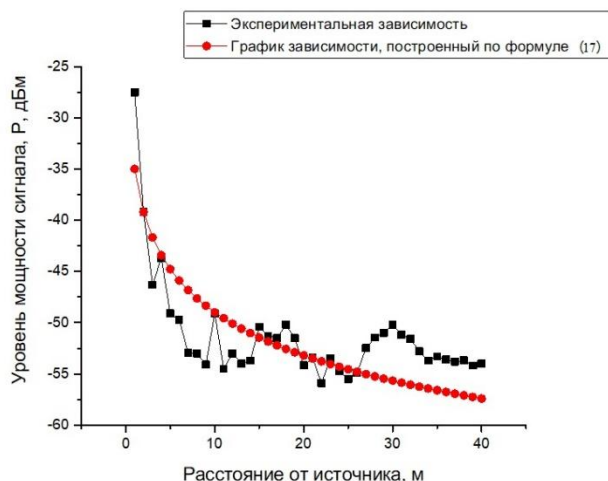


Рис.8. График зависимости уровня мощности сигнала от расстояния

Коэффициент корреляции Пирсона между экспериментальными и модельными данными составил 0,78. Значение P (p -value) составляет $3,8 \cdot 10^{-9}$. Полученная зависимость уровня мощности ЭМ сигнала подтверждает возможность использования предложенного метода.

Таким образом, имея одно приемное устройство, по уровню мощности электромагнитного излучения мы можем определить расстояние до источника разряда, но не его пространственное положение. Для того чтобы определить последнее, нам необходимо еще 3 таких же устройства и, применить систему уравнений (16).

Заключение (Conclusions)

Разработан метод регистрации и локализации неисправного изолятора на основе приема среднего уровня мощности электромагнитного сигнала разряда, пропорционального амплитуде ЧР. В предлагаемом методе в заданном УВЧ диапазоне измеряется средний уровень мощности электромагнитного излучения с синхронной фильтрацией с привязкой к фазе приложенного напряжения, с учетом влажности и температуры окружающего воздуха.

Используемый подход позволяет отделить сигнал ЧР от других сигналов в радиоэфире, исключить сохранение осциллограмм сигналов и сложную математическую обработку.

На разработанном лабораторном стенде проведен предварительный эксперимент с дефектным и бездефектным стеклянными изоляторами ПС70Е, находящимися под напряжением. Результаты измерения среднего уровня мощности электромагнитного излучения при подаче напряжения на дефектный изолятор на 2 дБм выше в каждом полупериоде сетевого напряжения, что позволяет выделить полезный сигнал и отделить частичные разряды, возникающие в дефекте. Планируется проведение экспериментов с различными видами изоляторов и с различными дефектами.

Пространственное определение дефектного изолятора производится с помощью измерения амплитуды мощности электромагнитного излучения одновременно на четырех датчиках, установленных в известных координатах.

Проведены предварительные эксперименты с одним электромагнитным приемником с УВЧ антенной и получена зависимость уровня мощности от расстояния до источника. Для того чтобы определить пространственное положение необходимо еще 3 таких же устройств. Планируется проведение дополнительных исследований.

Для практической реализации разработанного метода разработано устройство диагностики ВИ. Устройства устанавливаются на фазные провода и передают данные между собой и на блок приема-передачи по протоколу Zigbee. Предлагаемый метод диагностики высоковольтных изоляторов позволяет удаленно и непрерывно производить контроль технического состояния ВЛЭП без вывода ее из эксплуатации.

Литература

1. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». Утверждено решением Совета директоров ПАО «Россети» от 31.03.2021. (протокол от 02.04.2021 № 450)

2. Зарипов Д.К., Лопухова Т.В. Метод дистанционной диагностики высоковольтной изолирующей конструкции. // Известия высших учебных заведений.

Проблемы энергетики. 2006. № 3-4. С. 56-60.

3. Бирюлин В. И., Куделина Д. В., Горлов А. Н. Определение напряженности электрического поля высоковольтных воздушных линий при коронном разряде // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 4(48). С. 85-93.

4. 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, vol. 4, no. 3, pp. 167–172, Sep. 2019.

5. Базанов В. П., Базанов В. П., Спирин М. В. и др. Ультразвуковой метод контроля фарфоровой изоляции воздушных линий электропередачи 35 -220 кВ // Энергетик. 2000. № 4. С. 16-17.

6. Голенищев-Кутузов А. В., Ахметвалеева Л. В., Еникеева Г. Р. и др. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 2. С. 117-127.

7. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., et al. Non-contact methods for high-voltage insulation equipment diagnosis during operation // Energies 2021, 14, 5670. <https://doi.org/10.3390/en14185670>.

8. Хазиева Р. Т., А. В. Мухаметшин. Разработка и исследование схемы измерения тока утечки при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 4. С. 145-155.

9. Zheng Q., Luo L., Song H., et al. Intelligent learning approach for UHF partial discharge localisation in air-insulated substations. // High Voltage. 2020. V. 5, no. 5, pp. 583–590.

10. Калинин Ю.А., Второва Л.В., Калинин Ф.А. Устройство ультразвукового контроля высоковольтных изоляторов под напряжением. Патент на полезную модель № RU(11) 59 258(13) U1. Заявка 2006129500/22, 14.08.2006, опубл. 10.12.2006 Бюл. 34.

11. Голенищев-Кутузов, А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., и др. Дистанционный контроль технического состояния фарфоровых высоковольтных изоляторов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018; 20 (3-4); с. 99-107.

12. Зарипова А. Д., Зарипов Д. К., Усачев А. Е. Критерии выявления дефектов оборудования для тепловизионной системы контроля электрической подстанции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 5-6.

13. Biswas S., Koley C., Chatterjee B., Chakravorti S. A methodology for identification and localization of partial discharge sources using optical sensors. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012, 19, pp. 18–28.

14. Голенищев-Кутузов А. В., Голенищев-Кутузов В. А., Синюгин И. Е. [и др.]. Дистанционная диагностика высоковольтных полимерных изоляторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 7-8. С. 77-82.

15. Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Потапов А.А., и др. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21 (4). С. 123-133.

16. Khan U., Lazaridis P., Mohamed H., et al. An efficient algorithm for partial discharge localization in high-voltage systems using received signal strength // Sensors. 2018. Vol. 18, 4000; doi:10.3390/s18114000.

17. Portugues I.E., Moore, P.J., Glover I.A. et al. RF-based partial discharge early warning system for air-insulated substations // IEEE Trans. Power Deliv. 2009. 24 (1), pp. 20–29.

18. Iorkyase T., Tachtatzis Ch., Lazaridis P., et al. Low-complexity wireless sensor system for partial discharge localization // IET Wireless Sensor Systems, V. 9, Is. 3. June 2019, pp. 158-165.

19. PD-Map – система оперативного поиска и локализации дефектов оборудования открытых высоковольтных подстанций. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://dimrus.ru/pdmap.html>.

20. Вдовиков В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007.

21. Jia T., Zheng N., Sun A., et al. Partial Discharge Localization through a UHF Signal Amplitude Strength Attenuation Approach // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 486, 2019 4th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE 2019) 28–31 March 2019, Hangzhou, China.

22. Zhou N., Luo L., Sheng G. and Jiang X. High Accuracy Insulation Fault Diagnosis Method of Power Equipment Based on Power Maximum Likelihood Estimation // in IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. V. 34 (4), pp. 1291-1299. doi:

10.1109/TPWRD.2018.2882230.

23. Иванов Д.А., Горячев М.П., Садыков М.Ф., и др. Устройство оперативного онлайн-мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи. Патент на полезную модель RU211126U1, 23.05.2022. Заявка № 2020124117 от 21.07.2020.

24. Галиева Т. Г., Иванов Д. А., Садыков М. Ф., и др. Лабораторный стенд для разработки метода и системы непрерывного бесконтактного неразрушающего контроля технического состояния изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 80-87.

Авторы публикации

Галиева Татьяна Геннадьевна – аспирант, Казанского государственного энергетического университета.

Иванов Дмитрий Алексеевич – канд-т техн. наук, доцент, н.с. лаборатории физического приборостроения Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского (ФИЦ КазНЦ РАН); доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника», Казанского государственного энергетического университета.

Садыков Марат Фердинантович – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией физического приборостроения ФИЦ КазНЦ РАН; заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники», Казанского государственного энергетического университета.

Андреев Николай Кузьмич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанского государственного энергетического университета.

Хамидуллин Ильдар Ниязович – студент, Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Polozhenie PAO «Rosseti» «O edinoi tekhnicheskoi politike v elektrosetevom komplekse». Utverzhdeno resheniem Soveta direktorov PAO «Rosseti» ot 31.03.2021. (protokol ot 02.04.2021 № 450).

2. Zaripov DK, Lopukhova TV. Metod dstantsionnoi diagnostiki vysokovol'tnoi izoliruyushchei konstruksii. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2006; № 3-4:56-60.

3. Biryulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Opredelenie napryazhennosti elektricheskogo polya vysokovol'tnykh vozdushnykh linii pri koronnom razryade // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2020; 12(4(48)): 85-93.

4. 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;4(3):167–172.

5. Bazanov VP, Bazanov VP, Spirin MV. Et al. Ul'trazvukovoi metod kontrolya farforovoi izolyatsii vozdushnykh linii elektroperechachi 35 -220 kV. *Energetik*. 2000; 4; 16-17.

6. Golenishchev-Kutuzov AV, Akhmetvaleeva LV, Enikeeva GR, et al. Dstantsionnaya diagnostika defektov v vysokovol'tnykh izolyatorakh. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020; T. 22 (2):117-127.

7. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., et al. Non-contact methods for high-voltage insulation equipment diagnosis during operation. *Energies* 2021,14,5670. <https://doi.org/10.3390/en14185670>

8. Khazieva RT, Mukhametshin AV. Razrabotka i issledovanie skhemy izmereniya toka utechki pri ispytanii izolyatsii povyshennym vypryamlenym napryazheniem // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2021; 23(4): 145-155.

9. Zheng Q., Luo L., Song H., et al. Intelligent learning approach for UHF partial discharge localisation in air-insulated substations. *High Voltage*. 2020;5(5):583–590.

10. Kalinchuk YuA, Vtorova LV, Kalinchuk FA. Ustroistvo ul'trazvukovogo kontrolya vysokovol'tnykh izolyatorov pod napryazheniem. Patent na poleznuyu model' № RU(11) 59 258(13) U1. Zayavka 2006129500/22, 14.08.2006, opubl. 10.12.2006 Byul. 34.

11. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. Dstantsionnyi kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya farforovykh vysokovol'tnykh izolyatorov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2018;20 (3-4): 99-107.

12. Zaripova AD, Zaripov DK, Usachev A. E. Kriterii vyyavleniya defektov oborudovaniya dlya teplovizionnoi sistemy kontrolya elektricheskoi podstantsii. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2017; 19 (5-6).
13. Biswas S., Koley C., Chatterjee B., Chakravorti S. A methodology for identification and localization of partial discharge sources using optical sensors. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2012, 19:18–28.
14. Katkov VI, Evdokimov YuK, Sagdiev RK, Okhotkin GP. Sposob i ustroystvo beskontaktnogo distantsionnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnykh lineinykh izolyatorov vozdukhnykh linii elektropredach / Patent № RU2753811 C1, 23.08.2021 Byul.№24. Zayavka 2020126832, 29.04.2020.
15. Golenishchev-Kutuzov AV, Ivanov DA, Potapov AA, et al. Ispol'zovanie beskontaktnykh metodov diagnostiki vysokikh elektricheskikh polei. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2019; 21 (4):123-133.
16. Khan U., Lazaridis P., Mohamed H., et al. An efficient algorithm for partial discharge localization in high-voltage systems using received signal strength. *Sensors*. 2018;18, 4000; doi:10.3390/s18114000.
17. Portugues I.E., Moore, P.J., Glover I.A. et al. RF-based partial discharge early warning system for air-insulated substations. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2009;24 (1):20–29.
18. Iorkyase T., Tachtatzis Ch., Lazaridis P., et al. Low-complexity wireless sensor system for partial discharge localization. *IET Wireless Sensor Systems*, 2019;9(3):158-165.
19. PD-Map – sistema operativnogo poiska i lokatsii defektov oborudovaniya otkrytykh vysokovol'tnykh podstantsii. [Elektronnyi resurs]: Rezhim dostupa: <https://dimrus.ru/pdmap.html>
20. Vdoviko V.P. Chastichnye razryady v diagnostirovanii vysokovol'tnogo oborudovaniya. Novosibirsk: Nauka, 2007.
21. Jia T., Zheng N., Sun A., et al. Partial Discharge Localization through a UHF Signal Amplitude Strength Attenuation Approach. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 486, 2019 4th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE 2019) 28–31 March 2019, Hangzhou, China.
22. Zhou N., Luo L., Sheng G. and Jiang X. High Accuracy Insulation Fault Diagnosis Method of Power Equipment Based on Power Maximum Likelihood Estimation. in *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019;34(4):1291-1299. doi: 10.1109/TPWRD.2018.2882230.
23. Ivanov DA, Goryachev MP, Sadykov MF et al. Ustroystvo operativnogo onlain-monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnykh linii elektropredachi. Patent na poleznuyu model' RU211126U1, 23.05.2022. Zayavka № 2020124117 ot 21.07.2020.
24. Galieva TG, Ivanov DA, Sadykov MF, et al. Laboratornyi stend dlya razrabotki metoda i sistemy nepreryvnogo beskontaktnogo nerazrushayushchego kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya izolyatsionnogo oborudovaniya. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2021; 5 (179): 80-87.

Authors of the publication

Tatyana G. Galieva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Dmitry A. Ivanov – Kazan State Power Engineering University, Zavoisky Physical-Technical Institute FRC «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», Kazan, Russia.

Marat F. Sadykov – Kazan State Power Engineering University, Zavoisky Physical-Technical Institute FRC «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», Kazan, Russia.

Nikolai K. Andreev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ildar N. Khamidullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 06.06.2022 г.

Отредактировано 11.07.2022 г.

Принято 14.07.2022 г.