© Голенищев-Кутузов В.А.., Голенищев-Кутузов А.В.., Семенников А.В.., Марданов Г.Д., Калимуллин Р.И., Иванов Д.А.

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 621.315.17 **DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-1-154-165**

ГЕНЕРАЦИЯ КРИТИЧЕСКИХ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ ПОСРЕДСТВОМ ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОЛЕЙ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Голенищев-Кутузов В.А[1]., Голенищев-Кутузов А.В[1]., Семенников А.В [1]., Марданов Г.Д[2]., КалимуллинР.И[1]., Иванов Д.А[1].

[1]Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
[2]Казанский юридический институт МВД РФ, г. Казань, Россия
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2763-0550, campoce6e@gmail.com

Резюме: *ЦЕЛЬЮ статьи является обсуждение проведенного уточненного обследования технического состояния фарфоровых высоковольтных изоляторов типа ИОС 110/400, имевших дефекты с интенсивностями частичных разрядов выше 4 нКл, на подстанциях Татэнерго. Эксперименты выполнены с одновременным использованием МЕТОДОВ электромагнитного и акустического исследования. В ходе анализа полученных РЕЗУЛЬТАТОВ установлено влияние полей предыдущих мощных частичных разрядов на техническое состояние высоковольтных изоляторов. Изучены физические особенности детектирования мощных частичных разрядов электромагнитным и акустическим способами. Проведенные исследования позволяют сделать следующие ВЫВОДЫ: предшествующие частичные разряды могут создавать на диэлектрических поверхностях дефектов дополнительные долгоживущие электрические поля, превышающие по напряженности поле приложенного рабочего напряжения; показана необходимость использования в обследовании находящихся в эксплуатации высоковольтных изоляторов одновременно обоих физических методов.*

Ключевые слова: *дистанционная диагностика; высоковольтные изоляторы; мощные частичные разряды; электромагнитный метод; акустический метод; долгоживущие электрические поля.*

Для цитирования: Голенищев-Кутузов В.А.., Голенищев-Кутузов А.В.., Семенников А.В.., Марданов Г.Д., Калимуллин Р.И., Иванов Д.А. Генерация критических акустических импульсов в высоковольтных изоляторах посредством индуцированных полей частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 154-165. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-154-165.

GENERATION OF CRITICAL ACOUSTIC PULSES IN HIGH-VOLTAGE INSULATORS DUE TO INDUCED FIELDS OF PARTIAL DISCHARGES

VA. Golenishchev-Kutuzov[1], AV. Golenishchev-Kutuzov[1], AV. Semenikov[1], GD. Mardanov[2], RI. Kalimullin[1], DA. Ivanov[1]

[1]Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
[2]Kazan Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Kazan, Russia

ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2763-0550, campoce6e@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE of the article is to discuss an updated survey of the technical condition of porcelain high-voltage insulators of the type IOS 110/400, which had defects with partial discharge intensities above 4 nC, at Tatenergo substations. The experiments were carried out with simultaneous use of electromagnetic and acoustic research methods. During the analysis of the RESULTS obtained, the influence of the fields of previous powerful partial discharges on the technical condition of high-voltage insulators was established. The physical features of detecting powerful partial discharges by electromagnetic and acoustic methods have been studied. The conducted studies allow us to draw the following CONCLUSIONS: the previous partial discharges can create additional long-lived electric fields on the dielectric surfaces of defects that exceed the field of the applied operating voltage in intensity; the necessity of using both physical methods simultaneously in the examination of high-voltage insulators in operation is shown.*

Keywords: *remote diagnostics; high-voltage insulators; powerful partial discharges; electromagnetic method; acoustic method; long-lived electric fields.*

For citation: Golenishchev-Kutuzov VA, Golenishchev-Kutuzov AV., Semenikov AV, Mardanov GD., Kalimullin RI., Ivanov DA. Generation of critical acoustic pulses in high-voltage insulators due to induced fields of partial discharges. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (1): 154-165. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-154-165.

Введение *(Introduction)*

Надежное функционирование высоковольтного энергетического оборудования, связанного с производством и преобразованием электрической энергии, во многом определяется степенью дефектности изоляционных элементов: изоляторов, трансформаторов, кабелей, линий передачи высоковольтной электрической энергии (ЛЭП). Одними из самых уязвимых элементов на подстанциях и ЛЭП являются высоковольтные изоляторы (ВИ), поскольку в своем составе они содержат различные диэлектрические материалы и подвергаются влиянию значительных по интенсивности электрических, механических и метеорологических воздействий. На основе многочисленных полувековых работ по изучению электрофизических и химических процессов, приводящих к ускоренному разрушению диэлектрических элементов, и разработке на этой основе методов диагностики было установлено, что наиболее подходящими для контроля работоспособности диэлектрических элементов являются методы, использующие частичные разряды (ЧР), представляющие собой локальные электрические разряды под действием электрических полей, превышающих электрическую прочность диэлектрических материалов. Информация о возможности использования ЧР для контроля рабочего состояния высоковольтного оборудования появилась еще в 30-х годах XX века, однако изучение влияния ЧР на ускорение процессов старения различных диэлектрических элементов высоковольтной энергетики, по-видимому, началось только в 80-90-е годы [1, 2]. Следует отметить ряд основополагающих работ, в которых были выполнены первые модельные эксперименты по изучению воздействия ЧР на дефекты в виде газовых полостей в диэлектрических материалах. На основе этих экспериментов были предложены первые модели механизмов ЧР и, в том числе, стримерно-таунсендовский [3, 4], а также началась разработка более совершенных дистанционных методов измерения характеристик ЧР [5]. Более того, в начале XXI века с повышением напряженности электрических полей, используемых в электроэнергетике на модельных дефектах, было обнаружено, что мощные ЧР с критическим зарядом (q) свыше 1,5-2 нКл сами являются одной из главных причин возникновения и дальнейшего увеличения дефектов в диэлектрических элементах. Эти ЧР в конечном итоге могут приводить к увеличению скорости развития дефектов и разрушению изоляции [5-7].

Материалы и методы *(Materials and methods)*

Как уже отмечалось в многочисленных исследованиях, ЧР сопровождаются излучением в окружающее пространство электромагнитных (от радиочастотного до оптического диапазонов), упругих (акустических) волн в виде коротких (от микро- до наносекундных интервалов) импульсов, а также локальным нагревом ВИ [6, 7]. На основе этих физических явлений были разработаны и продолжают совершенствоваться методы обнаружения и регистрации сигналов ЧР. На первом этапе диагностики главной задачей была разработка методов измерения набора характеристик ЧР для надежного определения технического состояния ВИ, однако практически до настоящего времени измерения ряда

характеристик ЧР осуществлялись с помощью одного из приведенных выше физических методов и только в начале 10х годов XXI века появились работы, содержащие результаты измерения ЧР, полученные с использованием одновременно двух методов [8-11].

Как показали наши эксперименты, наиболее удачным оказался метод измерения фазоразрешенных ЧР с помощью электромагнитного (EM) (500-800 МГц) и акустического (PS) (40-100 кГц) датчиков с последующей совместной компьютерной обработкой полученных от датчиков сигналов ЧР. Поскольку скорости электромагнитных и акустических волн различаются на несколько порядков, это приводит к значительному временному расхождению фазовых интервалов характеристик ЧР. Учет этого обстоятельства позволил более точно определять дефектные изоляторы на подстанциях [12].

На основе изучения основных причин преждевременного старения и электрического разрушения ВИ был разработан комплексный метод контактного и дистанционного (бесконтактного) мониторинга диэлектрических элементов высоковольтного оборудования. Экспериментально полученный набор диагностических параметров дефектов, основанный на использовании трех физических методов (акустического, электромагнитного и электрооптического), позволяет регистрировать зарождение, развитие дефектов, а также определять техническое состояние ВИ с достаточной степенью достоверности.

Разработанный нами аппаратно-программный комплекс (АПК) (рис. 1) способен выполнять свои функции в двух режимах: стендовом (электрическом контактном и дистанционном) и полевом (дистанционном) с использованием в обоих случаях набора датчиков (поз. *3-6* на рис. 1) – акустического, электромагнитного и электрооптического. В стендовом варианте при контактном измерении согласно ГОСТ Р 55191-2012 вместо сети используется регулируемый источник высокого напряжения (*1*). Общим для обоих вариантов является использование цифровой системы записи, обработки и вывода информации (*8, 9*). В полевом варианте измерительный комплекс устанавливается вблизи обследуемых ВИ.

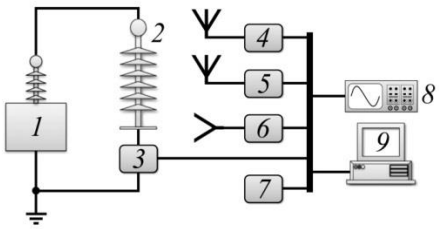

Рис. 1. Схема испытательного стенда: *1* – регулируемый источник высокого напряжения, *2* – испытуемый объект (ВИ), *3* – электрический контактный датчик, *4* – электромагнитный бесконтактный датчик, *5* – акустический датчик, *6* – электрооптический датчик, *7* – датчик фазы высокого напряжения, *8* – цифровой осциллограф, *9* – персональный компьютер с АЦП

Fig. 1. Test bench diagram: 1 – adjustable high voltage source, 2 – test object (HVI), 3 – electrical contact sensor, 4 – electromagnetic contactless sensor, 5 – acoustic sensor, 6 – electro–optical sensor, 7 – high voltage phase sensor, 8 – digital oscilloscope, 9 – personal computer with ADC

Изученные особенности кинетики временного изменения характеристик ВИ позволили разработать методику определения ускоренного роста дефектов под воздействием мощных частичных разрядов (МЧР).

Для апробации и наиболее полного обоснования разработанного способа были выполнены измерения набора соответствующих характеристик ЧР на сериях полимерных и фарфоровых ВИ, содержащих различные виды наиболее опасных дефектов, отличающихся расположением и размерами. Измерения характеристик выполнялись на стенде и на подстанциях с помощью измерительного комплекса с акустическим, электромагнитным и электрооптическим приемниками.

На основе наших измерений, процесс возникновения ЧР на дефекте, расположенном на поверхности или в объеме диэлектрика, условно можно разделить на два периода. В первом происходит ионизация воздуха или иного газа, заполняющего полость дефекта. Под действием приложенного поля возникают свободные электроны, положительные и отрицательные ионы, которые в зависимости от заряда распространяются в полости и бомбардируют диэлектрические поверхности дефекта. Ранее в основном изучались

процессы возникновения малых ЧР с $q \leq 2$ нКл в виде коротких электрических импульсов с длительностью от 10^{-7} с до 10^{-11}-10^{-12} с в основном в полости дефекта. Изучалось и влияние ЧР на электрическую прочность диэлектрика. В последние годы внимание исследователей и практиков переключилось на изучение процессов образования ЧР с повышенной интенсивностью (мощных ЧР с $q \geq 3$ нКл) за счет накопления электрических зарядов от предыдущих ЧР на поверхностях дефектов. Второй этап распространения ионов, образующих поверхностные заряды на диэлектрических поверхностях дефекта, имеет более длительный характер вследствие более малой скорости ионов (на два порядка) по сравнению со свободными электронами и заканчивается перераспределением зарядов на поверхностях дефекта и их дальнейшей рекомбинацией или пробоем.

Процессы ЧР стримерного типа к настоящему времени достаточно изучены. Поэтому в последнее десятилетие особое внимание было обращено на влияние заряженных поверхностей дефектов на параметры последующих ЧР. До сих пор такое изучение выполнялось в основном на модельных образцах полимерных диэлектриков, содержащих дефекты в виде сферических полостей. Мы впервые изучили особенности влияния предыдущих ЧР на развитие дефекта в полимерных и фарфоровых ВИ. В частности, было установлено возникновение мощных ЧР на дефектах на стержне и контакте «стержень-оконцеватель» практически в одинаковых условиях. Отличия начинаются только на втором этапе – при распространении поверхностных зарядов на диэлектрических поверхностях дефектов.

Позднее подобный комплексный метод стал находить более широкое применение при контроле диэлектрических элементов высоковольтного энергетического оборудования, что было поддержано международным стандартом 2016 года.

В отличие от ранних отечественных и международных стандартов, где в качестве основного измерительного метода использовался электрический способ, в ходе наших измерений комплексным дистанционным методом был разработан дополнительный набор диагностических параметров дефектов, позволяющий более точно оценивать текущее рабочее состояние ВИ и их остаточный ресурс [12-14]. Разработанного набора диагностических параметров ЧР было достаточно для диагностики полимерных и фарфоровых ВИ в сетях до 35 кВ, для которых характерны дефекты с зарядами не выше 1,5 нКл. Однако в начале второго десятилетия на модельных образцах полимеров [15], а затем и в реальных фарфоровых и полимерных ВИ [16], были обнаружены новые эффекты в интенсивности и фазовом распределении ЧР. Такие ЧР в основном были расположены в отрицательных фазах приложенного напряжения и достигали значений выше 1,5 нКл. Была обнаружена зависимость характеристик ЧР от размеров дефектов. В последующих работах основное внимание было сосредоточено на двух видах дефектов: в виде сферических полостей внутри диэлектрических прямоугольных образцов, ограниченных электродами, и в виде дефекта между диэлектрической поверхностью прямоугольного образца и электродом [17, 18]. В большинстве работ полость заполнялась воздухом при атмосферном давлении.

В своей работе по уточненному обследованию набора характеристик ЧР мы также начали изучать дефекты между одним из оконцевателей и диэлектрическим стержнем ВИ, как наиболее опасный вид дефектов для фарфоровых и полимерных изоляторов (рис. 2).

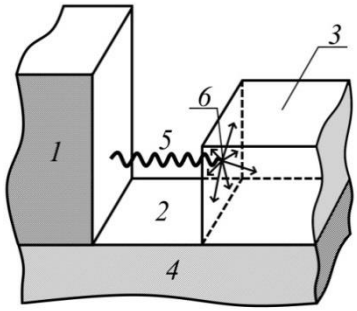

Рис. 2. Конфигурация дефекта между фланцем и оболочкой ВИ: 1 – металлический фланец, 2 – полость дефекта, 3 – защитная диэлектрическая оболочка, 4 – стеклопластиковая труба, 5 – стример, 6 – распространение ЧР по диэлектрической поверхности дефекта

Fig. 2. Defect configuration between the flange and the HVI shell: 1 – metal flange, 2 – defect cavity, 3 – protective dielectric shell, 4 – fiberglass pipe, 5 – streamer, 6 – propagation of the PDs along the dielectric surface of the defect

В последние годы (начиная с 2017 г.) нами более подробно была обследована часть

фарфоровых ВИ ИОС 110/400, находившихся в эксплуатации на подстанции Татэнерго и содержавших большие дефекты с интенсивностью ЧР в интервале $4 \le q \le 6$ нКл. В таких ВИ с помощью одновременно использованных EM и PS датчиков и рекомендованных методик последнего международного стандарта 2016 года и патента 26797759 [12] были обнаружены дополнительные особенности характеристик ЧР по сравнению с ВИ, имеющими предельные значения q (ЧР) ниже 3 нКл. Примеры характеристик для образцов с различными значениями q (ЧР) приведены на рисунке 3 в виде обычно используемых $q - \varphi - N$ диаграмм (q – заряд ЧР, φ – фазовый интервал излучения, N – количество ЧР за период измерений), учитывающих стохастичность характеристик ЧР. В образцах с относительно малыми дефектами ($q < 3$ нКл) интенсивность (q) и количество (N) ЧР мало отличаются друг от друга в обоих фазовых полупериодах приложенного напряжения, а их относительные изменения с ростом дефектов одинаковы при измерении EM и PS датчиками, что впоследствии было подтверждено в работе [19].

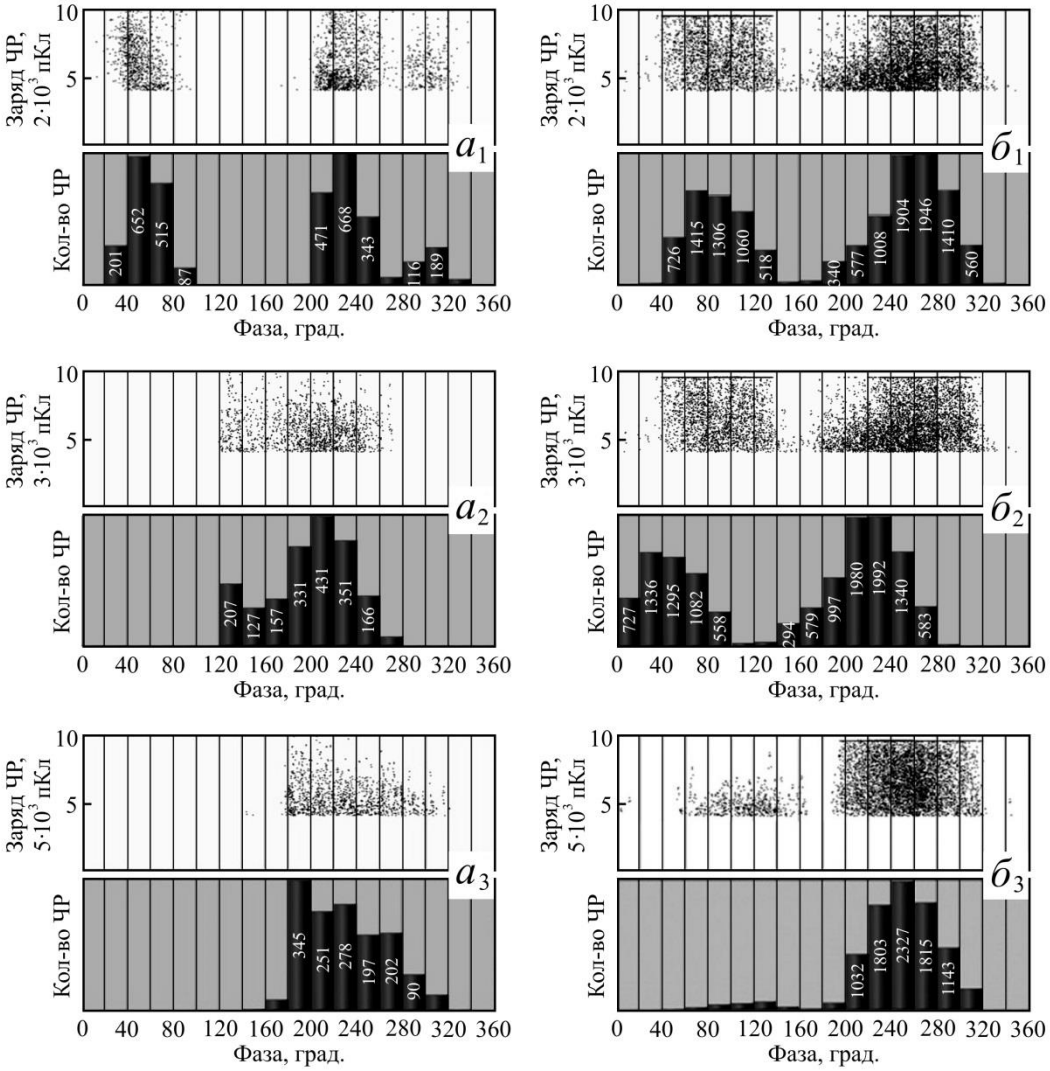

Рис. 3. Амплитудно-фазовые и количество-фазовые характеристики ЧР, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками в зависимости от интенсивности ЧР: q ≤ 3 нКл (1), 4 ≤ q ≤ 5 нКл (2), q ≥ 5 нКл (3)

Fig. 3. Amplitude-phase and quantity-phase characteristics of the PDs detected by electromagnetic (a) and acoustic (b) sensors depending on the intensity of the PDs: $q \le 3$ nC (1), $4 \le q \le 5$ nC (2), $q \ge 5$ nC (3)

***Результаты и обсуждение** (Results)*

К наиболее существенным изменениям в характеристиках ЧР, возникающим с увеличением дефектов ($q \ge 3$ нКл), можно отнести:

- значительное возрастание интенсивности (q) и количества (N) ЧР в отрицательных полупериодах приложенного напряжения (U_a) с одновременным уменьшением значений q и N в положительных полупериодах U_a, измеренных PS датчиком;

- увеличение электропроводности поверхности дефекта за счет ЧР;

- значительное уменьшение тех же параметров ЧР, измеренных ЕМ датчиком, в тех же образцах (рис. 3);

- при возрастании дефектов различия в параметрах ЧР q и N, измеренные ЕМ и PS датчиками, возрастали, причем с ростом дефектов значения q интенсивности ЧР, измеренные PS датчиком, приближались к критическим ($q \leq 10$ нКл) и возникала необходимость в замене дефектных изоляторов, также наблюдалось смещение фазовых интервалов излучения ЧР;

- значительное изменение формы и ширины одиночных ЧР, измеренных осциллографическим методом (рис. 4).

На основе сопоставления полученных нами результатов на дефектных образцах с зарядом ЧР $q > 3$ нКл с результатами ряда работ по модельным дефектам того же типа [17, 18], было разработано дополнение к уже существующим моделям ЧР [7, 17] и его влияния на критическое состояние ВИ, а также обоснованы наиболее эффективные методы измерения ЧР [19]. Причем основное внимание обращено на влияние предшествующего ЧР на характеристики последующих ЧР. Подобное влияние сейчас получило название «эффект памяти» (*memory effect*) и условно делится на две группы. Первая ассоциируется с процессом естественного старения изоляционных материалов, изменяющим их структуру и физико-химические характеристики [7]. Вторая представляет временные эффекты старения от воздействия предшествующих МЧР.

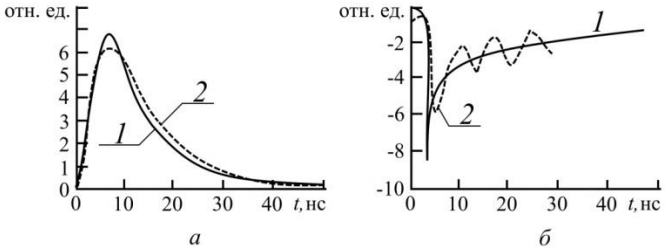

Рис. 4. Форма положительного (а) и отрицательного (б) импульсов ЧР на дефекте «стержень-оконцеватель»: теоретическая (1) и экспериментальная (2)

Fig. 4. The shape of positive (a) and negative (b) impulses of the PDs on the "dielectric rod-end fitting" defect: theoretical (1) and experimental (2)

По результатам обследования контактным и дистанционным методами серии полимерных (ЛК 35/70) и фарфоровых (ИОС 110/400) изоляторов были установлены наиболее важные диагностические параметры, в значительной степени дополняющие подобные параметры, рекомендованные ГОСТ Р 55191-2012. К таким диагностическим параметрам относятся: наличие мощных ЧР ($q \geq 2$ нКл), их фазовое распределение, смещение по фазе и увеличение количества и кажущегося заряда с течением времени. Наличие наиболее опасных дефектов определяется по возникновению мощных ЧР, предельные значения определяются материалом и типом ВИ.

Вид и место расположения наиболее опасных дефектов определяются по фазовому распределению мощных ЧР. Симметричное их расположение в положительных и отрицательных полупериодах приложенного напряжения характеризует дефекты на оболочке стержня изолятора, а наличие мощных ЧР только при отрицательном полупериоде соответствует дефекту на контакте «стержень-оконцеватель».

Скорость развития наиболее опасных дефектов устанавливается по изменению таких диагностических параметров, как смещение мощных ЧР в фазовые интервалы с приближением к началу полупериодов (0º и 180º), а также увеличение кажущегося заряда во временном интервале между двумя последовательными измерениями диагностических параметров. По скорости развития наиболее опасных дефектов может выполняться прогнозирование остаточного ресурса рабочего состояния изоляторов.

В данной статье особое внимание обращено на процессы распространения индуцированных ЧР потоков электронов, отрицательных и положительных ионов вдоль одной или двух диэлектрических поверхностей дефекта. Если для малых дефектов ($q \leq 1{,}5$-2 нКл) поток зарядов, распространяющийся вдоль газового промежутка дефекта, имеет стримерный характер [6] и затухает на диэлектрической поверхности, то для больших дефектов ($q \geq 3$ нКл) поток заряженных частиц, переходя на диэлектрическую поверхность, начинает накапливаться, начиная от первого и последующих ЧР (рис. 2). При этом процессе часть ионов поглощается расположенными на поверхности ионными ловушками, а

остальная их часть диффундирует от центра стримерного канала к периферии дефекта, создавая индуцированное поле E_s (ЧР). В первый момент после ЧР поле E_s, образованное электронами, имеет, как это было экспериментально обнаружено на модельных дефектах [20], громадный градиент плотности зарядов вдоль поверхности, инициирующий два эффекта. Во-первых, может возникать поверхностный (скользящий вдоль поверхности) наносекундной длительности электрический разряд [21]. Во-вторых, вследствие электронно-деформационного эффекта [22], может возникать импульс акустических волн, интенсивность которого определяется концентрацией неравновесных носителей заряда. На наш взгляд оба эти эффекта присутствуют в случае генерации ЧР.

Таким образом, на диэлектрической поверхности дефекта после излучения МЧР возникает взаимодействие двух электрических полей – фазозависимого приложенного поля E_a и поля индуцированных зарядов E_s. Их полярности совпадают в фазовом интервале 180°-240° и находятся в интервале 0°-90° [16], что и регистрируется обоими датчиками для дефектов с $q < 3$ нКл. Однако в образцах с дефектами ($q \geq 4$ нКл) значительное увеличение q при детектировании PS датчиком вызвано, в основном, процессом генерации акустических волн на поверхности дефекта, а уменьшение сигналов ЧР при детектировании ЕМ датчиком (рис. 4) происходит за счет стримерного распространения электронов в полости дефекта с увеличением разности полей E_a - E_s. Нами предположено, что увеличение ширины и изменение формы мощных импульсов ЧР также вызвано описанным выше процессом генерации акустических импульсов на поверхности дефекта. Причем узкие импульсы ЧР (рис. 4, *б*) относятся к их распространению только в полости дефекта, а широкие – к движению зарядов вдоль поверхности дефекта (рис. 4, *а*) [23].

Таким образом, на наш взгляд, процесс генерации критических для работы высоковольтных изоляторов акустических импульсов можно представить следующим образом. На первом этапе работы ВИ вследствие роста дефектов возникают ЧР, которые создаются излучением свободных электронов из металлических электродов. Затем эти электроны распространяются вдоль газовой полости дефекта в виде стримеров, при этом они поглощаются ионами газа в полости. Вследствие резкого возрастания давления и температуры в узком токовом канале возникают импульсы давления, которые воздействуют на стенки полости, создавая акустические волны. Акустические волны в диапазоне частот 20-200 кГц излучаются поверхностью ВИ в окружающее пространство. В таком процессе характеристики ЧР с относительно малой интенсивностью ($q \leq 1{,}5$-2 нКл) в основном определяются напряженностью приложенного поля и параметрами дефекта. Поэтому такие характеристики ЧР, как интенсивность, количество за определенный промежуток измерений, фазовые интервалы генерации близки при измерениях одновременно электромагнитным и акустическим методами.

При возрастании размеров дефектов ($q > 3$ нКл) процесс генерации ЧР не ограничивается рассеянием индуцированных зарядов на границе полости дефекта, а индуцированные электроны с положительными и отрицательными ионами могут частично переходить на одну или две диэлектрические поверхности дефекта. Далее для простоты будем рассматривать наиболее опасный дефект в ВИ в виде нарушения контакта «электрод-полость дефекта-поверхность стержня ВИ». Попавшие на поверхность диэлектрика в виде пятна (по укоренившейся терминологии) в сечении стримера электроны и ионы будут накапливаться (эффект памяти) в интервале последовательности генерации ЧР и диффундировать вдоль всего сечения диэлектрической поверхности. Процессы диффузии зарядов на поверхности описываются лавинным механизмом Таунсенда. Однако вследствие накопления зарядов на поверхности напряженность поля в области сечения стримера может превысить напряженность поля в сечении распространения импульса в полости, что может приводить к поверхностному (скользящему) разряду и пробою наносекундной длительности. Скорость развития разряда резко возрастает и становится соизмеримой со временем протекания элементарных процессов в плазме, что приводит к отклонению от лавинного (таунсендовского) или стримерного механизмов [21, 22]. Однако столь короткие (10^{-9} с) разрядные электрические импульсы обычно трудно детектировать электронной аппаратурой, по крайней мере в наших экспериментах.

Поскольку скорость движения электронов на порядок превышает скорость ионов, то стримеры состоят в основном из электронов. На втором этапе поток заряженных частиц ЧР переходит на диэлектрическую поверхность дефекта и может значительно расшириться в пределах всей поверхности дефекта. На этом этапе возникают остаточные заряды, образованные положительными и отрицательными ионами. За счет повышения интенсивности ЧР на поверхности возникает дополнительное оптическое излучение в ультрафиолетовой области до момента рекомбинации положительных и отрицательных

ионов на диэлектрической поверхности.

Значительное возрастание интенсивности ЧР в отрицательной части каждого периода приложенного напряжения вызвано, на наш взгляд, несколькими факторами: возрастанием площади самого ЧР на диэлектрической поверхности, накоплением зарядов от предыдущих ЧР, а также возрастанием поверхностной проводимости. Именно их совокупность создает стохастичность в параметрах последовательности ЧР. Особенно важным в таком процессе является возникновение мощных ЧР ($q \geq$ 5-10 нКл) при сложении в фазовом интервале (180º-240º) напряженностей приложенного и индуцированного поля предыдущих ЧР.

Увеличение интенсивности и количества ЧР, детектируемых акустическим датчиком, с одновременным уменьшением тех же параметров ЧР, детектируемых электромагнитным датчиком, вызвано, на наш взгляд, изменением процесса генерации акустических волн в рассмотренных выше условиях. Во втором случае при распространении подобного электромагнитного импульса вдоль поверхности диэлектрика вследствие акустоэлектронного взаимодействия возникают акустические волны с интенсивностью, пропорциональной дрейфовой скорости носителей заряда V_d. При таком процессе коэффициент электронного усиления ультразвука γ_e пропорционален соотношению скоростей

$$\gamma_e = \alpha_e(V_d/V_s - 1),$$

где α_e – коэффициент электронного акустического поглощения в отсутствие дрейфа носителей заряда, V_s – скорость звука.

Поскольку в данном случае скорость V_d значительно превышает V_s, то могут создаваться различные интенсивности акустических волн.

Как установлено в работе [24] акустические импульсы имеют узкий передний фронт с длительностью 0,5 мкс и широкий задний фронт 6-100 мкс, причем передний фронт прорезан узкими отрицательными импульсами (~10^{-2} мкс), которые могли формироваться скользящими разрядами.

Постепенное возрастание таких мощных ЧР, по-видимому, является главной причиной ускоренного старения изоляции высоковольтных энергетических систем. Поскольку такие мощные ЧР возникают не более одного за период приложенного высокого напряжения, то их обнаружение было практически невозможным при использовании усредненных методов регистрации вследствие стохастичности их характеристик.

Следует отметить непрерывное углубление и даже расширение предлагаемых механизмов ЧР за прошедшие десятилетия, начиная с простейшей модели, основанной на известном законе Пашена, сформулированном еще в конце XIX века для разрядов в газе между металлическими электродами, затем уже в конце XX века была разработана модель стримерного ЧР, которая достаточно полно объясняла механизм ЧР в газовых полостях диэлектриков при относительно небольших напряженностях приложенного поля. Однако в последние годы эта модель была дополнена предположением о переходе от стримерного разряда к диффузному механизму (механизму Таунсенда). В последние годы к ним добавились механизмы образования на диэлектрических поверхностях дефекта в газовой полости плазменных образований, а также воздействия полей от предшествующих ЧР [23]. Разнообразие предложенных моделей механизмов ЧР, во-первых, предполагает многопараметричность физических процессов и, во-вторых, расширение немногочисленных экспериментальных методов изучения механизмов ЧР при больших напряженностях приложенных полей [17]. Поэтому в данной работе представлены результаты пока качественного рассмотрения механизмов ЧР на реальных ВИ в полевых условиях без прекращения работы обследуемых подстанций, дающие возможность повышения качества оценок технического состояния и, тем самым, повышения надежности работы самих энергетических систем.

Более того, опираясь на немногочисленные эксперименты на модельных дефектах того же вида: электрод-дефект-полость, диэлектрик-электрод [17, 20, 23], мы постарались связать предложенную нами эмпирическую модель влияния предшествующих ЧР на ускорение процессов старения высоковольтных изоляторов и способы дистанционного обнаружения критического состояния ВИ на подстанциях с полученными в ряде работ результатами. К общим для результатов на реальных изоляторах и модельных дефектах можно отнести: смещение фазовых интервалов генерации ЧР с ростом дефектов к близким к нулевым фазам положительных и отрицательных полупериодов приложенного высокого напряжения, увеличение плотности электронных зарядов на диэлектрической поверхности дефекта при накоплении количества предшествующих ЧР, повышение электропроводности и градиента поля на поверхности дефекта, уменьшение плотности электронного заряда в стримерном пучке в полости дефекта.

Как уже отмечалось выше, индуцированные ЧР на поверхности и образованные ими поля E_s в зависимости от фазы приложенного поля E_a имеют различное происхождение и полярность: в первом фазовом интервале E_a (0º-90º) E_s образовано переходом на поверхность электронов из стримерного потока в полости, а в интервале (180º-270º) – потоком индуцированных ионов. Электроны на поверхности быстро перемещаются вдоль плоскости от центра, образованного потоком стримера, к радиальной поверхности дефекта, а ионы перемещаются в том же направлении более медленно (рис. 5). Причем накопление зарядов на поверхности от предшествующих ЧР приводит к уменьшению плотности электронов в стримерном канале, что и наблюдалось при проведении экспериментов.

Подобный эффект ранее не наблюдался, поскольку одновременное измерение характеристик ЧР ЕМ и PS датчиками [11] выполнялось на модельных образцах с интенсивностью ЧР не выше 0,5-1,0 нКл. Полученные при этом характеристики ЧР вполне соответствуют характеристикам, представленным на рисунке 3.

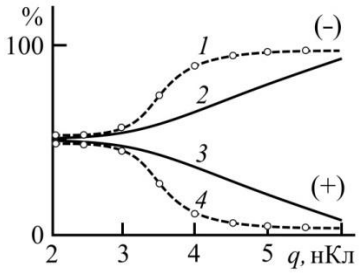

Рис. 5. Соотношение (в процентах) количества импульсов ЧР (N), измеренных электромагнитным и акустическим датчиками, для положительных (+) и отрицательных (-) полупериодов приложенного напряжения в зависимости от интенсивности ЧР: 1 и 4 – изменения количества N ЧР, детектированных электромагнитным датчиком, для положительных и отрицательных полупериодов; 2 и 3 – те же значения N для акустических измерений

Fig. 5. The ratio (as a percentage) of the number of PDs impulses (N) measured by electromagnetic and acoustic sensors for positive (+) and negative (-) half-periods of the applied voltage depending on the intensity of the PDs: 1 and 4 – changes in the number of PDs (N) detected by the electromagnetic sensor for positive and negative half-periods; 2 and 3 are the same N values for acoustic measurements

***Заключение** (Conclusions)*

В результате более полного обследования технического состояния дефектов ВИ в процессе эксплуатации с зарядами ЧР выше 4 нКл с помощью ЕМ и PS методов было получено более полное доказательство предложенного ранее механизма значительного влияния остаточных от предыдущих ЧР электрических полей на диэлектрических поверхностях дефектов на процессы и механизмы последующих ЧР. Было установлено, что для дефектов с зарядами ЧР выше 4 нКл более точную информацию представляют характеристики ЧР, измеренные одновременно акустическим и электромагнитным датчиками.

Литература

1. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с.

2. Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: Издательство УрО РАН, 2000. 260 с.

3. Hikita M., Yamada K., Nakamura A., et. al. Measurements of partial discharges by computer and analysis of partial discharge distribution by the Monte Carlo method // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1990. Vol. 25, N3. pp. 453–468.

4. Morshuis P.H.F., Kreuger F.H. Transition from streamer to Townsend mechanisms in dielectric voids // Journal of Physics D: Applied Physics. 1990. Vol. 23, N12. pp. 1562–1568.

5. Аввакумов М.В., Голенищев-Кутузов А.В. Исследование частичных разрядов при электрическом пробое модельных изоляторов из электротехнического фарфора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2003. № 9-10. С. 134–140.

6. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного

оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.

7. Коробейников С.М., Овчинников А.Г. Физические механизмы частичных разрядов. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2022. 266 с.

8. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Марданов Г.Д., и др. Комплексная дистанционная диагностика состояния высоковольтных изоляторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2013. № 9-10. С. 69–72.

9. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., и др. Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016. Т. 18. № 5-6. С. 87–93.

10. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Хуснутдинов Р.А., и др. Комплексный дистанционный контроль высоковольтных изоляторов в условиях эксплуатации // Электротехника. 2017. № 2. С. 71–73.

11. Ilknechi H.D., Samimi M.H., Yousefvand R. Generation of acoustic phase-resolved partial discharge patterns by utilizing UHF signals // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 113. pp. 906–915.

12. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., и др. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов. Патент РФ на изобретение №2679759. 12.02.2019. Бюл. №5.

13. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., и др. Комплексная диагностика работоспособности высоковольтных изоляторов // Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 34–40. doi: 10.1134/S0130308219080049

14. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., et al. Effect of partial discharges on the operating condition of high voltage insulators // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 124. Art. N03001. pp. 1–4.

15. Illias H.A., Chen G., Lewin P.L. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. Vol. 44, N24. Art. N245202. pp. 1–28.

16. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., и др. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах в процессе эксплуатации // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 10–14. doi: 10.1134/S0130308218100020

17. Pan Ch., Wu K., Chen G., et. al. Understanding partial discharge behavior from the memory effect induced by residual charges: a review // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2020. Vol. 27, N6. pp. 1951–1965.

18. Borghei M., Ghassemi M., Rodriguez-Serna J.M., Albarracin-Sanchez R. A finite element analysis and an improved induced charge concept for partial discharge modeling // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 36, N4. pp. 2570–2581.

19. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Семенников А.В., и др. Лазерно-электрический метод контроля дефектности высоковольтных диэлектрических элементов // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 11. С. 1660–1663. doi: 10.31857/S0367676522110151

20. Nikonov V., Bartnicas R., Wertheimer M.R. The influence of dielectric surface charge distribution upon the partial discharge behavior in short air gaps // IEEE Transactions on Plasma Science. 2001. Vol. 29, N6. pp. 866–874.

21. Кузьмин Г.Н. Скользящий разряд / Физическая энциклопедия. В 5-ти томах. Под общей редакцией А.М. Прохорова. М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. Т. 4. С. 544.

22. Рашба Э.И. Деформационный потенциал / Физическая энциклопедия. В 5-ти томах. Под общей редакцией А.М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия, 1988. Т. 1. С. 598.

23. Florkowski M. Influence of harmonics on partial discharge measurements and interpretation of phase-resolved patterns // Measurement. 2022. Vol. 196. Art. N111198. pp. 1–6.

24. Ramirez-Nino J., Pascacio A. Acoustic measuring of partial discharge in power transformers // Measurement Science and Technology. 2009. Vol. 20, N11. Art. N115108. pp. 1–9.

Авторы публикации

Голенищев-Кутузов Вадим Алексеевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» (ПЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

© Голенищев-Кутузов В.А.., Голенищев-Кутузов А.В.., Семенников А.В.., Марданов Г.Д., Калимуллин Р.И., Иванов Д.А.

Голенищев-Кутузов Александр Вадимович – д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой «Промышленная электроника» (ПЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Семенников Антон Владимирович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» (ПЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Марданов Георгий Дамирович – канд. техн. наук, преподаватель кафедры «Экономика, финансовое право и информационные технологии в деятельности органов внутренних дел» Казанского юридического института МВД РФ (КЮИ).
Калимуллин Рустем Ирекович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» (ПЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

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

References

1. Kuchinskii GS. *Chastichnye razryady v vysokovol'tnykh konstruktsiyakh*. Leningrad: Ehnergiya; 1979.

2. Vershinin YuN. *Elektronno-teplovye i detonacionnye processy pri elektricheskom proboe tverdyh dielektrikov.* Ekaterinburg: Izdatel'stvo UrO RAN, 2000.

3. Hikita M, Yamada K, Nakamura A, et. al. Measurements of partial discharges by computer and analysis of partial discharge distribution by the Monte Carlo method. *IEEE Transactions on Electrical Insulation.* 1990; 25(3):453–468. doi: 10.1109/14.55716

4. Morshuis PHF, Kreuger FH. Transition from streamer to Townsend mechanisms in dielectric voids. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 1990; 23(12):1562–1568. doi: 10.1088/0022-3727/23/12/012

5. Avvakumov MV, Golenishchev-Kutuzov AV. Research of partial discharges at electric breakdown of pattern from electrotechnical porcelain. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2003; 9-10:134–140.

6. Vdoviko VP. *Chastichnye razryady v diagnostirovanii vysokovol'tnogo oborudovaniya.* Novosibirsk: Nauka; 2007. (In Russ).

7. Korobeinikov SM, Ovchinnikov AG. *Fizicheskie mekhanizmy chastichnykh razryadov.* Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU; 2022. (In Russ).

8. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Mardanov GD, et. al. Integrated remote diagnostics of high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2013; 9-10:69–72.

9. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et. al. A comprehensive method for remote monitoring of the high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2016; 18(5-6):87–93.

10. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Khusnutdinov RA, et. al. Kompleksnyi distantsionnyi kontrol' vysokovol'tnykh izolyatorov v usloviyakh ehkspluatatsii. *Russian Electrical Engineering*. 2017; 2:71–73. (In Russ).

11. Ilknechi HD, Samimi MH, Yousefvand R. Generation of acoustic phase-resolved partial discharge patterns by utilizing UHF signals. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* 2019; 113:906–915. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.06.018

12. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et. al. *Sposob beskontaktnoi distantsionnoi diagnostiki sostoyaniya vysokovol'tnykh izolyatorov.* Patent RUS №2679759. 12.02.2019. Byul. №5. (In Russ).

13. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et. al. Integrated noncontact diagnostics of the operable condition of high-voltage insulators. *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2019; 55(8):596–602. doi: 10.1134/S1061830919080060

14. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. Effect of partial discharges on the operating condition of high voltage insulators. *E3S Web of Conferences.* 2019: 124:03001. doi: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912403001

15. Illias HA, Chen G, Lewin PL. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2011; 44(24):245202. doi: 10.1088/0022-3727/44/24/245202

16. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et. al. Remote

testing for defects in in-service high-voltage insulators. *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2018; 54(10):682–686. doi: 10.1134/S1061830918100054

17. Pan Ch, Wu K, Chen G, et. al. Understanding partial discharge behavior from the memory effect induced by residual charges: a review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* 2020; 27(6):1951–1965. doi: 10.1109/TDEI.2020.008960

18. Borghei M, Ghassemi M, Rodriguez-Serna JM, Albarracin-Sanchez R. A finite element analysis and an improved induced charge concept for partial discharge modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020; 36(4):2570–2581. doi: 10.1109/TPWRD.2020.2991589

19. Golenishchev-Kutuzov VA, Golenishchev-Kutuzov AV, Semennikov AV, et al. Laser-electric way of controlling defects in high voltage dielectric elements. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2022; 86(11):1376–1378. doi: 10.3103/S1062873822110156

20. Nikonov V, Bartnicas R, Wertheimer MR. The influence of dielectric surface charge distribution upon the partial discharge behavior in short air gaps. *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2001; 29(6):866–874. doi: 10.1109/27.974972

21. Kuz'min GN, editors. Skol'zyashchii razryad. Fizicheskaya ehntsiklopediya. V 5-ti tomakh. Moscow: Bol'shaya Rossiiskaya ehntsiklopediya; 1994. Vol. 4. P. 544. (In Russ).

22. Rashba EhI, editors. Deformatsionnyi potentsial. Fizicheskaya ehntsiklopediya. V 5-ti tomakh. Moscow: Sovetskaya ehntsiklopediya; 1988. Vol. 1. P. 598. (In Russ).

23. Florkowski M. Influence of harmonics on partial discharge measurements and interpretation of phase-resolved patterns. *Measurement.* 2022; 196:111198. doi: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111198

24. Ramirez-Nino J, Pascacio A. Acoustic measuring of partial discharge in power transformers. *Measurement Science and Technology*. 2009; 20(11):115108. doi: 10.1088/0957-0233/20/11/115108

Authors of the publication

Vadim A. Golenishchev-Kutuzov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

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

Anton V. Semennikov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Georgij D. Mardanov – Kazan Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Kazan, Russia.

Rustem I. Kalimullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

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

Получено ***24.01.2023г.***

Отредактировано ***06.02.2023г.***

Принято ***13.02.2023г.***