

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.315.17

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163

ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИНГА СВЕРХБОЛЬШИХ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ

Д.А. Иванов

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1344-7453>, ivanov.da@kgeu.ru

Резюме: ЦЕЛЬЮ описанного исследования является изучение влияния частичных разрядов на физическое состояние обнаруженных ранее дефектов в высоковольтных изоляторах. В статье описаны результаты, полученные комплексом бесконтактных методов для проведения дистанционной диагностики высоковольтных изоляторов под рабочим напряжением в процессе эксплуатации с использованием двухканального устройства дистанционной диагностики. МЕТОД измерения основан на регистрации частичных разрядов электромагнитным и акустическим датчиками. С помощью электромагнитного и акустического датчиков бесконтактно были изучены характеристики частичных разрядов в высоковольтных полимерных и фарфоровых изоляторах в лабораторных и полевых условиях. Разработанная система мониторинга во многом основана на обнаруженном эффекте сверхбольших ЧР, создающих накопление индуцированных электрических зарядов на диэлектрических поверхностях дефектов, которые образуют электрические поля с напряженностью, превосходящей напряженность приложенных полей к высоковольтным изоляторам. РЕЗУЛЬТАТЫ проведенных исследований позволяют судить о возможности промышленной применимости предложенного способа бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов под рабочим напряжением. Использование акустической регистрации частичных разрядов при контроле дефектов позволяет более точно определять общее количество ЧР и их фазовое распределение. Электромагнитное детектирование частичных разрядов позволяет успешно оценивать интенсивность и количество сверхбольших ЧР, вид и размеры больших дефектов.

Ключевые слова: дистанционная диагностика; частичные разряды; неразрушающий контроль; высоковольтные изоляторы; дефекты изоляции; система мониторинга.

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания на выполнение НИР по теме «Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей» (соглашение №075-03-2022-151 от 14.01.2022).

Для цитирования: Иванов Д.А. Особенности мониторинга сверхбольших частичных разрядов в высоковольтных // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 151-163. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163.

FEATURES OF MONITORING EXTRA LARGE PARTIAL DISCHARGE IN HIGH VOLTAGE INSULATORS

DA. Ivanov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1344-7453>, ivanov.da@kgeu.ru

Abstract: *THE PURPOSE* of the described study is to study the effect of partial discharges on the physical state of previously detected defects in high-voltage insulators. The article describes the results obtained by a complex of non-contact methods for remote diagnostics of high-voltage insulators under operating voltage during operation using a two-channel remote diagnostic device. *METHOD* is based on the registration of partial discharges by electromagnetic and acoustic sensors. With the help of electromagnetic and acoustic sensors, the characteristics of partial discharges in high-voltage polymer and porcelain insulators were studied without contact in laboratory and field conditions. The developed monitoring system is largely based on the discovered effect of extra large PDs, which create an accumulation of induced electric charges on the dielectric surfaces of defects, which form electric fields with a strength exceeding the strength of the applied fields to high-voltage insulators. *THE RESULTS* of experimental studies confirm the possibility of industrial applicability of the proposed method for non-contact remote diagnostics of the state of high-voltage insulators under operating voltage. The use of acoustic registration of partial discharges in the control of defects makes it possible to more accurately determine the total number of PDs and their phase distribution.

Keywords: *remote diagnostics; partial discharges; non-destructive testing; high-voltage insulators; insulation defects; monitoring system.*

Acknowledgments: *The research work was carried out under the financial support of the Ministry of Science and Higher Education within the scope of the state Research and Development task no. 075-03-2022-151 of 14.01.2022 «Distributed automated systems of monitoring and diagnostics for technical condition of overhead power lines and substations based on broadband data transmission technology through power lines and the industrial Internet of Things».*

For citation: Ivanov DA. Features of monitoring extra large partial discharge in high voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(1):151-163. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163.

Введение

Высоковольтное энергетическое оборудование, вследствие его сложности, использовании разнообразных материалов, и работе в условиях воздействия сильных электрических, электромагнитных полей, электродинамических и тепловых воздействий, подвержено большому риску образования дефектов, последующих затем электрических пробоев и даже полного разрушения. Поэтому в наши дни целью технического диагностирования является однозначное определение дефектов с прогнозированием их дальнейшего развития и остаточного ресурса высоковольтного оборудования. В последние десятилетия начался переход от системы плано-предупредительного обследования и ремонта высоковольтного оборудования к периодическому обследованию по техническому состоянию, в том числе даже с помощью неразрушающего контроля технического состояния оборудования. Главное отличие последнего от ранее разработанных и используемых методов диагностики состоит в возможности обследовать оборудование без прекращения процесса передачи электроэнергии. Быстрому и успешному переходу к методу диагностики «под рабочим напряжением» мешает ряд насущных задач, требующих предварительного решения:

- отсутствие нормативных документов, включающих в себя предельные диагностические параметры, на основании которых можно принимать решение о техническом состоянии;

- отсутствие согласования параметров, получаемых с отключением оборудования, с диагностическими параметрами при использовании метода «под рабочим напряжением»;

- отсутствие методов многократного диагностирования с определенной периодичностью, т.е. мониторинга диагностических параметров. На наш взгляд периодичность должна определяться скоростью возможного образования и развития дефекта в любом контролируемом элементе оборудования;

- отсутствие оптимального набора измерительных комплексов и компьютерных программ для дистанционного мониторинга технического состояния высоковольтного оборудования в автоматизированном режиме. [1-11].

По нашим представлениям, основанным на ранее полученных результатах, современная система мониторинга должна быть способна оценивать текущее техническое состояние объекта, определять характеристики наиболее опасных дефектов, выделять наиболее быстро развивающиеся дефекты, определять периодичность процессов диагностики и прогнозировать остаточный ресурс.

Начиная со второй половины XX века большое внимание в научных статьях, международных и отечественных стандартах стало уделяться частичным разрядам (ЧР) как первичным электрофизическим процессам, определяющим техническое состояние ВИ (высоковольтные изоляторы). Более того, в последнее десятилетие было сделано предположение, что сами ЧР на серьезном дефекте способны создавать сверхбольшие напряженности электрических полей, значительно превышающих напряженность полей в высоковольтной электрической сети [12-14].

В ВИ различают три основных вида ЧР: микрозаряды в малых кавернах, существующих как на поверхностях электродов, так и в объеме диэлектриков; частичные разряды вдоль границ раздела двух диэлектриков; частичные (незавершенные) пробои на границе «твердый диэлектрик – газ». Им соответствуют дефекты, чаще всего в виде воздушных полостей сферической формы внутри диэлектриков или плоскопараллельных воздушных слоев внутри диэлектрика и на границе «диэлектрик – электрод» (дисковые каверны).

Изучение физических процессов, сопровождающих ЧР, началось ещё в конце XX века [15, 16] с создания общих моделей разрядов через газовые полости между электродами [17-19]. Например, модели замкнутой полости [20] на основе использования закона Пашена, устанавливающего связь между напряжением зажигания заряда U_s , давлением газа p в промежутке между электродами и размером d промежутка

$$U_s = p \cdot d \quad (1)$$

Позднее общая модель разрядов в газах была уточнена именно для ЧР в объеме или на поверхности для диэлектрических материалов [20, 21]. В ходе расчетных экспериментов и модельных экспериментов были установлены виды разрядов в зависимости от значения U_s в формуле Пашена. Для малых значений $p \cdot d$ электронно-лавиная стадия пробоя может переходить в стримерную, а затем в искровую стадию с увеличением напряженности приложенного поля. Однако было предположено, что в определенных условиях может возникать переход от стримерного разряда к разряду Таунсенда [22], что подтверждается с большой степенью вероятности в модельных экспериментах на сформированных полостных дефектах в полимерах при относительно малой напряженности приложенных полей [23]. Однако с повышением и напряженности полей и размеров дефектов в подобных модельных экспериментах последних лет стали проявляться более сильные эффекты, связанные с возникновением и последующим накоплением большого количества зарядов от предыдущих ЧР, которые создают индуцированные напряженности полей, значительно превосходящих приложенное поле [24]. Поэтому в наиболее значительных публикациях последних пяти лет, имеющих обзорный характер [13, 25, 26], делается вывод о многопараметричности процессов и механизмов генерации, распространения и погасания ЧР в газовых полостях диэлектриков. Основное внимание обращено именно на изменение проводимости диэлектрических полостей дефекта, его размеров и давления газа в полости дефекта. Причем изменение проводимости во время ЧР может изменять (увеличивать) интенсивность ЧР на порядок, так же, как и изменение размеров полости или давления приводит к росту интенсивности ЧР.

В наших экспериментах практически невозможно следить за изменением параметров газа в полости дефекта в процессах ЧР. Более того, выполненное ранее изучение зависимости изменения заряда в ЧР действительно указало на зависимость $q_{чр}$ от параметров газовой смеси в полости дефекта [27]. Однако в более поздних подобных экспериментах была установлена более сильная зависимость $q_{чр}$ от параметров самого дефекта для мощных ЧР.

Таким образом, можно констатировать, что до настоящего времени даже в модельных экспериментах, выполненных в Англии, США, Японии, Китае, России (Новосибирск), не удалось, как утверждают сами авторы, получить непротиворечивую картину комплекса физических процессов во время частичного разряда. Следует подчеркнуть, что большинство предыдущих исследований физических процессов, сопровождающих ЧР, выполнялось на модельных образцах полимеров на одном из двух видов смоделированных дефектов.

Главной целью нашей работы была разработка методологии диагностирования рабочего состояния различных видов высоковольтных изоляторов, способной предупреждать возникновение больших дефектов, которые могли бы нарушить функционирование системы изоляторов подстанций и линий электропередачи. Разработанная система мониторинга во многом основана на обнаруженном эффекте сверхбольших ЧР, создающих накопление индуцированных электрических зарядов на диэлектрических поверхностях дефектов, которые образуют электрические поля с напряженностью, превосходящей напряженность приложенных полей к ВИ. Ранее этот эффект наблюдался и изучался только в модельных экспериментах. Следует подчеркнуть, что индуцированные предыдущими сверхбольшими ЧР напряженности полей на границах больших дефектов значительно превосходят, как это уже установлено модельными экспериментами и нашими результатами на реальных ВИ [28], возможные изменения напряженности полей первичных ЧР в том числе и при переходах потока заряженных частиц при ЧР от стримерного к Таунсендскому механизму в диэлектрических полостях [18, 20]. Поэтому его влиянием можно пренебречь при условии $E_a < E_U$, где E_a – напряженность приложенного поля, E_U – напряженность индуцированного предыдущими ЧР поля на дефекте. Здесь и далее под сверхбольшими частичными разрядами понимаются ЧР с интенсивностью $q > 2$ нКл.

К настоящему времени уже появились работы, в которых были предложены и рассмотрены несколько физических моделей формирования СБЧР и их влияния на деградацию диэлектрических элементов высоковольтного энергетического оборудования. Основное внимание было обращено на новое поколение полимерных диэлектриков, нашедших широкое применение в конденсаторах, трансформаторах, кабелях и других высоковольтных устройствах [4]. Гораздо меньше внимания было обращено на экспериментальное изучение возникновения СБЧР и их влияния на развитие дефектов в реальных высоковольтных диэлектрических элементах. В экспериментальных работах, судя по имеющимся результатам в доступных нам публикациях, основное внимание было обращено на дефекты в виде плоских полостей или заполненных газом сфер [29-35]. Практически отсутствуют работы по изучению СБЧР в современных высоковольтных изоляторах.

Эти обстоятельства стали главной причиной проведения нами уже во втором десятилетии этого века цикла экспериментальных исследований СБЧР на реальных ВИ в процессе эксплуатации. Главными задачами было изучение зависимостей параметров СБЧР от характеристик вызывающих их дефектов, а также разработка методик одновременного бесконтактного детектирования СБЧР электромагнитным [36-38], акустическим и другими методами. Особая сложность подобной разработки физических моделей процессов излучения СБЧР состояла в том факте, что в реальных ВИ дефекты в отличие от модельных образцов имеют более сложную конструкционную форму. Поэтому основное внимание было обращено на наиболее опасные при эксплуатации дефекты в виде протяженных треков или полостей в диэлектрическом стержне и плоских полостей на границе раздела «стержень-оконцеватель». Именно такие дефекты, как было установлено в процессе наших экспериментов [3, 36, 38], являются главными причинами возникновения СБЧР.

Первоначально для дистанционного исследования процессов взаимодействия приложенного поля E_k с дефектом были визуально отобраны полимерные ВИ ЛК 70/35, снятые с эксплуатации при плановом обследовании и имевшие дефекты вида «контакт стержень-оконцеватель» и «стержень». Для полевых исследований были выбраны фарфоровые ВИ ИОС 110/400, находящиеся под рабочим напряжением 110 кВ. Поскольку до настоящего времени на электрических подстанциях по-прежнему эксплуатируется большое количество фарфоровых изоляторов, то мы выполнили сравнительное изучение особенностей СБЧР в обоих видах ВИ [39, 40].

Материалы и методы

Для изучения характеристик ЧР от дефектов на стержне и дефектов «стержень-оконцеватель» впервые нами была разработана комплексная двухэтапная методика, включающая измерения характеристик ЧР контактно и дистанционно электромагнитным и акустическим датчиками.

С помощью электромагнитного и акустического датчиков бесконтактно были

изучены характеристики ЧР, в том числе СБЧР, на стенде кафедры ПЭС КГЭУ и на ряде подстанций ОАО «Сетевая компания» в полимерных (ЛК70/35) и фарфоровых (ИОС110/400) изоляторах, получены распределения сигналы ЧР, синхронизованные с фазой высокого напряжения, накапливаются с привязкой к узким фазовым интервалам их возникновения в блоке памяти персонального компьютера. Это фазовое распределение количества импульсов и интенсивности сравнивается с ранее записанным распределением аналогичных сигналов для эталонных изоляторов. Выделяются по специально разработанной программе сигналы, превышающие безопасный для нормального функционирования ВИ уровень, и по ним выявляют изоляторы различной степени дефектности и определяют возможность их дальнейшего функционирования.

На основе измерений было установлено, что необычные свойства ЧР начинают проявляться уже начиная с интенсивностей $q \geq 1,5-2$ нКл, а их максимальная интенсивность может достигать 5-7 нКл. Причем до интенсивностей ЧР $q \leq 3$ нКл большинство параметров характеристик ЧР, измеренных электромагнитным и акустическим датчиками, совпадают с точностью до 70-90 %, за исключением абсолютных значений интенсивности q и количества N .

С учетом приведенных выше обсуждений мы разделили наборы параметров ЧР в исследованных образцах на три группы (табл. 1), различающиеся по интенсивности 1,5 нКл, 1,5 – 2,5 нКл и выше 3 нКл. Подобное разделение вполне очевидно, поскольку только начиная со второй группы возникает влияние индуцированных зарядов предыдущих ЧР на формирование СБЧР и начинается проявление различий в детектируемых сигналах ЧР электромагнитным и акустическим датчиками.

К наиболее существенным различиям наборов параметров ЧР и СБЧР, приведенных в таблице 1, которые могли бы на наш взгляд служить основой для разработки системы диагностических параметров для оценки технического состояния ВИ в процессе эксплуатации, относятся следующие:

- Возникновение СБЧР вблизи нулевых значений приложенного высокого напряжения U_a (то есть при фазах $0^\circ-180^\circ-360^\circ$), рисунок 1.
- Увеличение количества СБЧР в отрицательных полупериодах U_a по отношению к положительным полупериодам (рис.2). Если для первых двух групп образцов это соотношение N_-/N_+ близко к единице, то для третьей группы $N_-/N_+ > 1$, и оно возрастает с увеличением дефектности.
- Увеличение суммарного заряда СБЧР с возрастанием количества СБЧР (рис.3).
- Увеличение интенсивности СБЧР с ростом размеров дефектов (рис.4).

Таблица 1

Параметры ЧР, детектируемые электромагнитным и акустическим датчиками

Группы	1) $q \leq 1,5$ нКл		2) $1,5 \leq q \leq 2,5$ нКл		3) $q \geq 2,5$ нКл		
Виды дефектов	Малые		Средние		Большие		
Датчики	Эл.магн.	Акуст.	Эл.магн.	Акуст.	Эл.магн.	Акуст.	
q , пКл	+	10-20	10-20	20-50	50-200	200	1000
	-	10-20	10-20	50-500	100-500	500	2000
N	+	15-25	15-25	10-30	50-100	100-150	100-200
	-	15-25	15-25	30-50	500-100	500	3000-5000
$\Delta\phi$	+	$60^\circ-100^\circ$	$60^\circ-100^\circ$	$40^\circ-100^\circ$	$210^\circ-320^\circ$	$20^\circ-100^\circ$	$200^\circ-340^\circ$
	-	$240^\circ-280^\circ$	$240^\circ-280^\circ$	$200^\circ-300^\circ$	$200^\circ-320^\circ$	$20^\circ-120^\circ$	$200^\circ-340^\circ$
$\phi_{нач}$	+	$60^\circ-40^\circ$	$60^\circ-40^\circ$	$40^\circ-30^\circ$	$40^\circ-30^\circ$	$30^\circ-20^\circ$	$30^\circ-20^\circ$
	-	$240^\circ-220^\circ$	$240^\circ-220^\circ$	$220^\circ-210^\circ$	$220^\circ-210^\circ$	$200^\circ-190^\circ$	$200^\circ-100^\circ$
$N_{общ}$	$1,9 \cdot 10^4 - 10^4$		$10^4 - 5 \cdot 10^3$		$4 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^3$		
N_{max}					30-150		
$N_{max} / N_{общ}$					$0,8 \cdot 10^{-2}$		
					$3,36 \cdot 10^{-2}$		

$\Delta\phi$ – фазовые интервалы излучения ЧР; ϕ – фаза начала излучения ЧР для положительных и отрицательных полупериодов; q – заряд; $N_{общ}$ – количество ЧР за период измерений; N_{max} – количество ЧР с $q > 1,8$ нКл за период измерений в 18 с.

Следует отметить, что приведенные выше особенности характеристик ЧР и СБЧР в той же или иной форме также были обнаружены и обсуждены при изучении дефектов в виде сфер или вытянутых трехмерных эллипсоидов в образцах полимерных материалов в Великобритании [41], Китае [13] и США [9]. Ниже будет приведено сравнение результатов нашего изучения ряда параметров СБЧР [28, 42] с параметрами дефектов в реальных ВИ с результатами, полученными на модельных образцах.

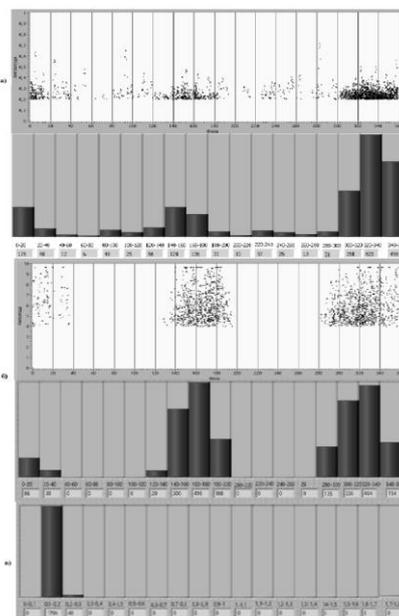


Рис. 1. Пример нетипичных амплитудно-фазовых и количественно-фазовых характеристик, полученных электромагнитным (а) и акустическим (б) способами для полимерного высоковольтного изолятора №9 (дефект «стержень - оконцеватель»), в – количество ЧР в зависимости от интенсивности

Fig. 1. An example of atypical amplitude-phase and quantitative-phase characteristics obtained by electromagnetic (a) and acoustic (b) methods for polymer high-voltage insulator No. 9 ("rod-end defect), c - the number of CR depending on the intensity

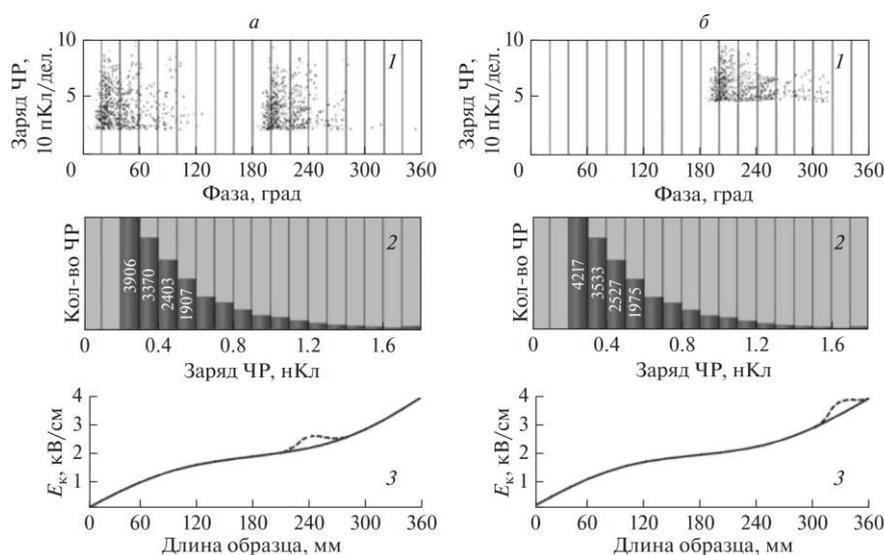


Рис. 2. Параметры ЧР, измеренные электромагнитным способом (I), для образцов ВИ с большими дефектами: а – дефект на стержне, б – дефект «стержень-оконцеватель», 2 – распределение количества ЧР в зависимости от интенсивности, 3 – пространственное распределение индуцированной напряженности поля (для дефектного изолятора показано пунктиром)

Fig. 2. Parameters of the CR measured by the electromagnetic method (I) for VI samples with large defects: a - defect on the rod, b - defect "rod-end", 2 - distribution of the number of CR depending on the intensity, 3 - spatial distribution of the induced field strength (for a defective insulator shown by dotted line)

Было обнаружено, что для малых дефектов ($d \leq 300$ мкм) в ВИ интенсивность ЧР не превышает 100 пКл (табл. 1) и мало зависит от величины d . Однако с ростом размеров дефектов выше 0,4-0,6 мм начинается резкий подъем интенсивности возникающих СБЧР. Количество СБЧР ($q \geq 2$ нКл) значительно возрастало с ростом размера дефекта (табл. 2,

рис. 3), а затем при $d \leq 2$ мм рост количества СБЧР практически прекращается (рис. 4).

Такое резкое изменение интенсивности и количества СБЧР наиболее характерно для дефектов типа «стержень-оконцеватель». Оно вполне соответствует приведенной в работах [9, 41] зависимости интенсивности СБЧР от радиуса сферической полости в диэлектрике [9]. Однако там представлены только некоторые физические процессы, относящиеся к зависимости $q(d)$ для дефектов сферической формы.

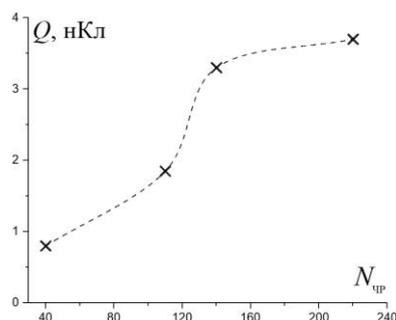


Рис.3. Зависимость суммарного заряда Q от количества СБЧР *Fig.3. The dependence of the total charge Q on the amount of SBHR*

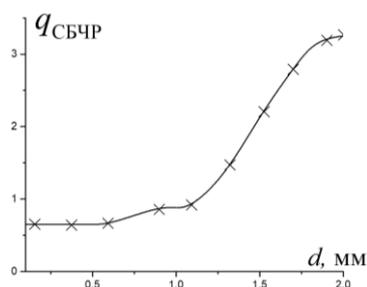


Рис.4. Зависимость усредненного заряда $q_{СБЧР}$ от размера дефекта «стержень-оконцеватель» *Fig.4. Dependence of the averaged charge $q_{СБЧР}$ on the size of the defect "rod-end"*

Таблица 2

Параметры СБЧР в образцах с ростом дефектов за период измерения в 18 сек

	№3	№4	№5	№6
ΔN_{\max}	36	82	205	109
N_{\max}	4380	4300	4300	3000
$\Delta N / N_{\max}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
$N_{\text{общ}}$	1400	620	1400	200
N_-	1300	940	2900	2300
N_+ / N_-	1,05	0,65	0,48	0,09

Результаты и обсуждение

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

Анализ полученных электромагнитным и акустическим датчиками характеристик сверхбольших ЧР позволяет сделать вывод, что развитые и опасные для рабочего состояния дефекты ВИ точнее детектируются с помощью акустических измерений. Это связано с физическими особенностями прохождения стримером газового промежутка дефекта и возникновением в связи с этим ударных волн.

В образцах с относительно малыми дефектами влияние индуцированных предыдущими ЧР полей E_i на диэлектрических поверхностях на общее поле в дефекте незначительно и фазовое распределение интенсивности и количества ЧР определяется напряженностью приложенного поля в области дефекта fE_a . Поэтому полученные с помощью электромагнитных и акустических измерений характеристики ЧР в таких образцах (рис. 1 и 2) близки по своим параметрам.

При увеличении размеров дефекта (третья группа образцов) возрастает влияние индуцированных полей E_i , наведенных предыдущими ЧР на диэлектрических поверхностях дефекта, а суммарное поле E_d внутри полости дефекта представляется в виде геометрической суммы напряженностей полей

$$E_d = fE_a + E_i, \quad (2)$$

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

Этот эффект наиболее сильно сказывается на дефекте между стержнем и оконцевателем изолятора. При ЧР вначале возникает разряд с распространением стримера в полости параллельно приложенному полю, а затем он сменяется разрядом вдоль диэлектрической поверхности, перпендикулярной E_a . В последнем случае нормальная компонента E_a прижимает дрейфующие заряды к поверхности диэлектрика, что приводит к повышению температуры и проводимости канала поверхностного разряда. При этом будет возрастать или уменьшаться на определенных фазах приложенного напряжения интенсивность СБЧР, а также ширина и количество импульсов СБЧР.

Заключение

Таким образом, можно было предположить, что использование акустического детектирования ЧР при контроле дефектов позволяет более точно определять общее количество ЧР, включая СБЧР, и их фазовое распределение, а электромагнитное детектирование успешно оценивать интенсивность и количество СБЧР, а, следовательно, вид и размеры больших дефектов. Эти обстоятельства свидетельствуют о необходимости использования обоих способов детектирования ЧР для более полного обследования работоспособности ВИ в процессе эксплуатации путем выполнения измерений и аналитического сравнения различных наборов характеристик ЧР.

Установлено, что параметры характеристик ЧР позволяют получать более обширную информацию о текущем техническом состоянии ВИ и прогнозировании его дальнейшего остаточного срока службы, в том числе о процессах зарождения и развития дефектов. Справедливость подобного подхода основана на том обстоятельстве, что большинство отказов высоковольтного оборудования вызвано дефектами, параметры которых наиболее точно регистрируются с помощью характеристик ЧР.

На временном интервале эксплуатации ВИ мониторинг на наш взгляд логично разделить на три этапа. На первом следует выполнить измерения диагностических параметров информационного типа, которые необходимы при постановке ВИ в эксплуатацию и дополнения характеристик ЧР от завода-изготовителя. В соответствии с ГОСТ Р 55191-2012 необходимо выполнить измерение интенсивности и количества ЧР в зависимости от фазы высокого напряжения контактным способом с использованием регулируемого источника напряжения. На первом этапе необходимо получить диагностические параметры информационного типа для конкретного типа изолятора, если они не были ранее получены от завода-изготовителя или после планово-профилактического ремонта. Наиболее сложным на первом этапе является получение нормированных значений такого набора характеристик ЧР, который позволил бы определять техническое состояние ВИ в изменяющихся эксплуатационных условиях. Наши предварительные исследования ВИ из полимерного и керамического (фарфор) материалов с рабочим напряжением до 110 кВ позволили сделать заключение, что для оценки их технического состояния возможно использование одного набора диагностических параметров ЧР, но с различными нормированными значениями. Однако при измерении параметров характеристик сверхбольших ЧР в ВИ на 110 кВ и выше нужно учитывать, что параметры СБЧР, измеренные электромагнитным и акустическим датчиками, начинают различаться пропорционально значениям заряда в них выше 3 - 4 нКл.

Второй этап мониторинга обеспечивает многократные измерения разработанного на первом этапе набора диагностических параметров ЧР, позволяя проводить их сравнение с нормированными значениями, в том числе определение вида и места расположения и степени опасности новых возникших в ходе эксплуатации дефектов. Одной из главных сложностей диагностического контроля ВИ является их многочисленность на воздушных линиях электропередачи и кучность расположения на подстанциях. Эти обстоятельства ограничивают общий объем информации о параметрах ЧР от диагностируемого объекта, поскольку от состояния каждого ВИ зависит работоспособность всей ПС или ВЛ. Поэтому количество диагностических параметров,

измеряемых при мониторинге, вначале следует свести к минимуму. Так в нашем случае при измерении параметров ВИ до 110 кВ в качестве главного критического диагностического параметра следует выделить ВИ, имеющие определенное относительное количество ЧР с зарядом выше 1,8-2 нКл (более 10% от общего количества ЧР за период разового диагностирования). Затем другие параметры ЧР в этих ВИ должны подвергнуться разбору с выделением ЧР, имеющих интенсивность выше 3,5-4 нКл, поскольку именно такие ЧР могут создавать дополнительную деградацию полимеров в области дефектов и способствовать их дальнейшему развитию. Конечно, в этом процессе следует также учитывать относительное количество ВИ, содержащих СБЧР. Поскольку определение таких диагностических параметров, как количество и интенсивность ЧР не обладает высокой точностью, то следует использовать в этих случаях дополнительные параметры – различное распределение числа ЧР по интенсивности для положительного и отрицательного полупериодов высокого напряжения и расширение фазовых интервалов излучения ЧР. Наличие ЧР при нулевых фазах приложенного напряжения, определение вида, места расположения и их изменения при многократном диагностировании позволяет устанавливать периодичность регистрации диагностических параметров.

Процесс мониторинга технического состояния ВИ уже в настоящее время возможно осуществлять посредством автоматизированного измерения основной части текущих диагностических параметров под рабочим напряжением современными техническими средствами с помощью современных компьютерных программ. Однако пока не полностью решенной является задача установления реального остаточного ресурса, поскольку он во многом определяется совокупностью физических процессов, определяющих старение не только полимерных и керамических материалов, но и конструкции всего ВИ в целом. В отсутствие серьезных научных исследований в этом направлении, эмпирическому решению этой задачи может помочь выполнение диагностического контроля и анализа ВИ после окончания его эксплуатации, что составляет третий заключительный этап мониторинга.

Литература

1. Ситников В.Ф., Скопинцев В.А. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации // *Электричество*. 2007. № 11. С. 9-16.
2. Свидетельство П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат. 1992. 239 с.
3. 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. Т. 20. № 3-4. С. 99-107.
4. Гайворонский А.С. Повреждения полимерных изоляторов и их диагностика в эксплуатации // *Главный энергетик*. 2010. №2. С. 15.
5. Kupershtokh A.L., Karpov D.I. Simulation of waves of partial discharges in a chain of gas inclusions located in condensed dielectrics // *Journal of physics: Conference Series*. 2016. V. 754. 102006.
6. Villa A., Barbieri L., Gondola M., et al. A PDE-based partial discharge simulator // *Journal of Computational Physics*. 345. 2017. p. 687-705. 10.1016/j.jcp.2017.05.045.
7. Khalid K., Rohani M., Ismail B., et al. Influence of PD source and AE sensor distance towards arrival time of propagation wave in power transformer // *Journal of Physics: Conference Series*. V. 1432, 2020, 012006.
8. Gao F., Wang Q., Dai D., et al. Numerical study on partial discharge in a dry air cavity with a two-dimensional fluid model considering practical reactions // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020. V. 53, N. 34, 345202.
9. Borghei M., Ghassemi M., Rodríguez-Serna J. M., et al. Finite Element Analysis and an Improved Induced Charge Concept for Partial Discharge Modeling // *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021. V. 36. no. 4. pp. 2570-2581.
10. Ganjovi A.A., Gupta N., and Raju G.R.G. A kinetic model of a PD pulse within voids of sub-millimeter dimensions // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* V. 16. no. 6. pp. 1743-1754, Dec. 2009.
11. Johnatan M. Rodríguez-Serna, Ricardo Albarracín-Sánchez, "A Study on the Life Estimation and Cavity Surface Degradation Due to Partial Discharges in Spherical Cavities within Solid Polymeric Dielectrics Using a Simulation Based Approach", *Polymers*, vol. 1.
12. Pan C., Wu K., Du Y., et al. Simulation of cavity PD sequences at DC voltage by

considering surface charge decay // *J. Phys. D: Appl. Phys.* V. 50. no. 20. 205202. Jul. 2017.

13. Pan C., Chen G., Tang J, et al. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* V. 26. no. 3. 2019. pp. 981-1000. doi: 10.1109/TDEI.2019.007945.

14. Villa A., Barbieri L., Malgesini R., Leon-Garzon A.R. Ignition of discharges in macroscopic isolated voids and first electron availability // *Journal of Applied Physics* 125, 043302 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5052313>.

15. Niemeyer L. A generalized approach to partial discharge modeling // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* V. 2. no. 4. pp. 510-528. Aug. 1995, doi: 10.1109/94.407017.

16. Crichton G.C., Karlsson P.W. and Pedersen A. Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids // *IEEE Transactions on Electrical Insulation,* 1989. V. 24. no. 2. pp. 335-342. doi: 10.1109/14.90292.

17. Ховатсон А.М. Введение в теорию газового разряда. Пер. с англ. И.И. Иванчика. М. : Атомиздат, 1980. 182с.

18. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание / Райзер Ю.П. 3-е изд. перераб. и доп. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. 736 с.

19. Месяц Г.А. Законы подобия в импульсных газовых разрядах. УФН. Обзоры актуальных проблем. 2006. Т.176, №10. с.1069-1091.

20. Лагарьков А.Н., Руткевич И.М. Волны электрического пробоя в ограниченной плазме. Академия наук СССР (АН СССР), Институт высоких температур (ИВТ); под ред. А. Н. Старостина. М.: Наука, 1989. 206 с.

21. Karpov D.I. and Kupershtokh A.L. Models of streamers growth with physical time and fractal characteristics of streamer structures. Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.98CH36239), 1998, pp. 60.

22. Morshuis P.H.F. and Kreuger F.H. Transition from streamer to Townsend mechanisms in dielectric voids // *J. Phys. D: Appl. Phys.* V. 23. no. 12. pp. 1562-1568, Dec. 1990.

23. Hikita M, Yamada K, Nakamuza A. Measurement of partial discharge by computer and analysis partial discharges distribution by the Monte Carlo method // *IEEE Transactions of Electric Insulation.* 1990. V. 25. P. 453-468.

24. Pan C., Tang J., and Wu K. The effect of PD process on the accumulation of surface charges // *IEEE Trans. Plasma Sci.* V. 44. no. 11. pp. 2545-2552, Nov. 2016.

25. Illias H.A., Chen G., and Lewin P.L. Comparison between three-capacitance, analytical-based and finite element analysis partial discharge models in condition monitoring // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* V. 24. no. 1. pp. 99-109, Feb. 2017.

26. Pan C., et al. Understanding Partial Discharge Behavior from the Memory Effect Induced by Residual Charges: A Review. in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* V. 27, no. 6, pp. 1951-1965, December 2020, doi: 10.1109/TDEI.2020.008.

27. Wu K., Suzuoki Y., Dissado L.A. The contribution of discharge patterns in disc-voids. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2004.V.37. P. 1815.

28. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., et al. Integrated Noncontact Diagnostics of the Operable Condition of High-Voltage Insulators // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2019. V. 55.No 8. Pp. 596-602.

29. Callender G, Golosnoy I, Rapisarda P, Lewin P. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids // *Journal of Physics D: Appl. Phys.* 2018. V. 51. №12.

30. Chen H. A novel extension neural network based partial discharge pattern recognition method // *Expert systems with Application.* 2012. №32. P. 3423.

31. Illias H.A., Tunio M.A., Mokhlis H., et al. Determination of partial discharge time lag in void using physical model approach // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* V. 22. no. 1. pp. 463-471, Feb. 2015.

32. C. Pan, K. Wu, Y. Du, Y. P. Meng, Y. H. Cheng, and J. Tang. The effect of surface charge decay on the variation of partial discharge location // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 4, pp. 2241-2249, Aug. 2016.

33. Adili S., Herrmann L.G., and Franck C.M. Investigating the Inception Mechanism of Pulsed X-ray Triggered Partial Discharges by Time Resolved Measurements // *IEEE Trans. Electr. Insul.* V. 20. no. 5. pp. 1780-1788, Oct. 2013.

34. Pan C., Wu K., Meng Y., et al. The effect of discharge area variation on stochastic characters of PD magnitude // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* V. 24. no. 1. pp. 217-226, Feb. 2017.

35. Jeon. S.I., Nam S.H., Shin D.S., et al. The correlation between partial discharge

characteristics and space charge accumulation under ac voltage // IEEE Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielect. Phenom.(CEIDP), 2000, pp. 653-656.

36. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Д.А. Иванов. Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6.

37. Зарипов Д.К., Лопухова Т.В. Метод дистанционной диагностики высоковольтной изолирующей конструкции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. №3-4. С. 57-61.

38. 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.

39. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., et al. Monitoring System of High Voltage Dielectric Equipment // E3S Web Conf., 288 (2021). p. 01088. .

40. Golenishchev-Kutuzov A.V., Ivanov D.A., Kalimullin R.I., et al. Remotely Measured Diagnostic Parameters for Estimating the Residual Life of High Voltage Insulators // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2020. V. 84.

41. 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. V. 44. No. 24. P. 245202.

42. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., et al. Non-contact methods for high-voltage insulation equipment diagnosis during operation // Energies. 2021. V. 14. No 18.

43. Ramirez-Nino J., Pascacio A. Acoustic measuring of partial discharge in power transformers // Meas. Sci. Technol. 2009. V. 20. P. 115108.

Авторы публикации

Иванов Дмитрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Sitnikov VF, Skopintsev VA Probabilistic-statistical approach to assessing the resources of electric grid equipment during operation. *Electricity*. 2007;11:9-16.

2. Swee PM. *Methods and means of diagnostics of high voltage equipment*. M.: Energoatomizdat.1992. 239 p.

3. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. Remote control of the technical condition of porcelain high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(3-4):99-107.

4. Gaivoronsky AS. Damage to polymer insulators and their diagnostics in operation. *Chief Power Engineer*. 2010;2:15.

5. Kupershtokh AL, Karpov DI. Simulation of waves of partial discharges in a chain of gas inclusions located in condensed dielectrics. *Journal of physics: Conference Series*. 2016;754:102006.

6. Villa A, Barbieri L, Gondola M, et al. A PDE-based partial discharge simulator. *Journal of Computational Physics*. 2017;345:687-705. 10.1016/j.jcp.2017.05.045.

7. Khalid K, Rohani M, Ismail B, et al. Influence of PD source and AE sensor distance towards arrival time of propagation wave in power transformer. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1432:012006.

8. Gao F, Wang Q, Dai D, et al. Numerical study on partial discharge in a dry air cavity with a two-dimensional fluid model considering practical reactions. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020;53(34):345202.

9. Borghesi M, Ghassemi M, Rodríguez-Serna J. M.A Finite Element Analysis and an Improved Induced Charge Concept for Partial Discharge Modeling // IEEE Transactions on Power Delivery, 2021;36(4):2570-2581.

10. Ganjovi AA, Gupta N, and Raju G.R.G. A kinetic model of a PD pulse within voids of sub-millimeter dimensions. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. V.16. no. 6.qw pp. 1743-1754, Dec. 2009.

11. Johnatan M. Rodríguez-Serna, Ricardo Albarracín-Sánchez. A Study on the Life Estimation and Cavity Surface Degradation Due to Partial Discharges in Spherical Cavities

within Solid Polymeric Dielectrics Using a Simulation Based Approach, *Polymers*, vol. 1.

12. Pan C, Wu K, Du Y, et al. Simulation of cavity PD sequences at DC voltage by considering surface charge decay. *J. Phys. D: Appl. Phys.* V. 50. no. 20. 205202. Jul. 2017.

13. Pan C, Chen G, Tang J., et al. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019;26(3):981-1000. doi: 10.1109/TDEI.2019.007945.

14. Villa A, Barbieri L, Malgesini R, Leon-Garzon A.R. Ignition of discharges in macroscopic isolated voids and first electron availability. *Journal of Applied Physics*. 125, 043302 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5052313>.

15. Niemeyer L. A generalized approach to partial discharge modeling. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1995;2(4):510-528. Aug. 1995, doi: 10.1109/94.407017.

16. Crichton GC, Karlsson PW and A. Pedersen. Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1989;24(2):335-342. doi: 10.1109/14.90292.

17. Khovatson A.M. *Introduction to the theory of gas discharge*. Per. from English. I. I. Ivanchik. M.: Atomizdat, 1980. 182 p.

18. Raiser YuP. *Physics of the gas discharge*. Scientific publication. 3rd ed. revised. and additional. Dolgoprudny: Intellect Publishing House, 2009. 736 p.

19. Mesyats GA Similarity laws in pulsed gas discharges. *UFN. Reviews of topical issues* 2006;176(10):1069-1091.

20. Lagarkov AN, Rutkevich IM. Electric breakdown waves in a limited plasma. USSR Academy of Sciences, *Institute for High Temperatures*; ed. A. N. Starostina. M.: Nauka, 1989. 206 p.

21. Karpov DI. and Kupershtokh AL. *Models of streamers growth with «physical» time and fractal characteristics of streamer structures*. Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.98CH36239). 1998. pp. 60.

22. Morshuis P.H.F. and Kreuger F.H. Transition from streamer to Townsend mechanisms in dielectric voids. *J. Phys. D: Appl. Phys.*1990;23(12):1562-1568, Dec. 1990.

23. Hikita M, Yamada K, Nakamuza A. Measurement of partial discharge by computer and analysis partial discharges distribution by the Monte Carlo method. *IEEE Transactions of Electric Insulation*. 1990;25:453-468.

24. Pan C, Tang J, and Wu K. The effect of PD process on the accumulation of surface charges. *IEEE Trans. Plasma Sci.*2016;44(11):2545-2552.

25. Illias HA, Chen G, and Lewin P.L. Comparison between three-capacitance, analytical-based and finite element analysis partial discharge models in condition monitoring. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*2017;4(1):99-109.

26. Pan C. 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. December 2020, doi: 10.1109/TDEI.2020.008.

27. Wu K, Suzuoki Y, Dissado LA. The contribution of discharge patterns in disc-voids. *J. Phys. D. Appl. Phys.*2004;37:1815.

28. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A. Integrated Noncontact Diagnostics of the Operable Condition of High-Voltage Insulators. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019;55(8):596-602.

29. Callender G, Golosnoy I, Rapisarda P, Lewin P. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids. *Journal of Physics D. Appl. Phys.* 2018;5:12.

30. Chen H. A novel extension neural network based partial discharge pattern recognition method. *Expert systems with Application*. 2012;32:3423.

31. Illias HA, Tunio MA, Mokhlis H, et al. Determination of partial discharge time lag in void using physical model approach. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2015;22(1), pp. 463-471, Feb. 2015.

32. Pan C, Wu K, Du Y, et al. The effect of surface charge decay on the variation of partial discharge location. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2016;23(4):2241-2249, Aug. 2016.

33. Adili S, Herrmann LG, and Franck CM. Investigating the Inception Mechanism of Pulsed X-ray Triggered Partial Discharges by Time Resolved Measurements. *IEEE Trans. Electr. Insul.*2013;20(5):1780-1788, Oct. 2013.

34. Pan C, Wu K, Meng Y, et al. The effect of discharge area variation on stochastic characters of PD magnitude. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2017;24(1):217-226, Feb. 2017.

35. Jeon SI, Nam SH, Shin DS. The correlation between partial discharge characteristics and space charge accumulation under ac voltage. *IEEE Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielect. Phenom.(CEIDP)*.2000. pp. 653-656.
36. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA. Complex method of remote monitoring of the state of high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;5-6:87-93.
37. Zaripov DK, Lopukhova TV. Method for remote diagnostics of high-voltage insulating structure. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2006;3-4:57-61.
38. Golenishchev-Kutuzov AV, Akhmetvaleeva LV, Enikeeva GR. Remote diagnostics of defects in high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):117-127.
39. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A. *Monitoring System of High Voltage Dielectric Equipment*. E3S Web Conf., 288 (2021). C. 01088.
40. Golenishchev-Kutuzov AV, Ivanov DA, Kalimullin RI. Remotely Measured Diagnostic Parameters for Estimating *the Residual Life of High Voltage Insulators*. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*.2020. V. 84.
41. 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.
42. Ivanov DA, Sadykov MF, Yaroslavsky DA. Non-contact methods for high-voltage insulation equipment diagnosis during operation. *Energies*. 2021;14(18). doi 10.3390/en14185670.
43. Ramirez-Nino J, Pascacio A. Acoustic measuring of partial discharge in power transformers. *Meas. Sci. Technol*. 2009;20:115108

Authors of the publication

Dmitry A. Ivanov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено	01.04.2022г.
Отредактировано	20.04.2022г.
Принято	25.04.2022г.