



ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СТАРЕНИЯ МАТЕРИАЛА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ РАБОЧЕГО РЕСУРСА

Д.А. Иванов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

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

Резюме: ЦЕЛЬЮ статьи является обсуждение результатов исследований по изучению характеристик частичных разрядов на дефектах различного типа в высоковольтных изоляторах – на диэлектрическом стержне и контакте «стержень-оконцеватель». Анализ нетипичных характеристик частичных разрядов в высоковольтных изоляторах производился с использованием оригинального способа определения их состояния с помощью набора диагностических параметров. МЕТОДЫ. Экспериментальные результаты получены электромагнитным и акустическим методами бесконтактных измерений характеристик частичных разрядов. РЕЗУЛЬТАТОМ проведенных исследований являются полученные схемы электрофизических процессов в диэлектрических полостях дефектов на диэлектрическом стержне и контакте «стержень-оконцеватель» в течение одного периода приложения высокого напряжения. Схема электрофизических процессов учитывает изменения, индуцированного частичными разрядами поля в полости дефекта и на его диэлектрических поверхностях. ВЫВОД. Основным выводом является тот факт, что разработанная схема генерации обычных и мощных частичных разрядов нашла подтверждение в модели процесса генерации и последующего распространения первичного разряда в полости дефекта. В реальных условиях излучения частичного разряда в полимерных и фарфоровых высоковольтных изоляторах имеет более сложный характер, поэтому была сделана первая попытка объяснения генерации мощных частичных разрядов в реальных высоковольтных энергетических системах. Увеличение количества частичных разрядов и их интенсивности за фазовый интервал 20° и наличие мощных частичных разрядов являются основными признаками дефектности высоковольтных изоляторов.

Ключевые слова: дистанционная диагностика; частичные разряды электрофизические процессы; 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. Исследование электрофизических процессов и старения материала высоковольтных изоляторов для определения их рабочего ресурса // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 132-146. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-132-146.

STUDY OF ELECTROPHYSICAL PROCESSES AND AGING OF THE MATERIAL OF HIGH-VOLTAGE INSULATORS TO DETERMINE THEIR WORKING LIFE

DA. Ivanov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: The article is aimed to discuss the results of research on the characteristics of partial discharges on defects of different types in high-voltage insulators - on dielectric rod and contact «terminal rod». The atypical characteristics of partial discharges in high-voltage insulators were analysed using an original method of determining their condition using a set of diagnostic parameters. **METHODS.** Experimental results are obtained by electromagnetic and acoustic methods of non-contact measurements of partial discharge characteristics. **THE RESULTS** of conducted studies are obtained circuits of electrophysical processes in dielectric cavities of defects at dielectric rod and contact «terminal rod» during one period of high voltage application. The circuit of electrophysical processes takes into account changes of the field induced by partial discharges in the defect cavity and on its dielectric surfaces. **CONCLUSIONS.** The main conclusion is the fact that the developed scheme of generation of conventional and powerful partial discharges found confirmation in the model of the process of generation and subsequent distribution of primary discharge in the defect cavity. Under real conditions of partial discharge radiation in polymer and porcelain high-voltage insulators is more complex, so the first attempt to explain the generation of powerful partial discharges in real high-voltage power systems was made. The increase in the number of partial discharges and their intensity during the phase interval of 20° and the presence of powerful partial discharges are the main signs of defective high-voltage insulators.

Keywords: remote diagnostics; partial discharges; electrophysical processes; 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. Study of electrophysical processes and aging of the material of high-voltage insulators to determine their working life. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(2):132-146. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-132-146.

Введение

Высоковольтное электротехническое 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 неисправностей и отказов. Поэтому целью технического диагностирования является однозначное определение дефектов с прогнозированием их дальнейшего развития и остаточного ресурса высоковольтного оборудования. В последние десятилетия начался переход от системы планово-предупредительного ремонта высоковольтного оборудования к ремонту по техническому состоянию и в том числе с помощью неразрушающего контроля технического состояния оборудования. Главное отличие его 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 проблем, 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. Периодичность должна определяться скоростью возможного образования и развития дефекта в любом контролируемом элементе оборудования;

- отсутствие универсального набора измерительных комплексов и приборов для

дистанционной диагностики или мониторинга рабочего состояния высоковольтного оборудования; отсутствие набора программных комплексов, позволяющих проводить диагностику в автоматизированном режиме и выдавать решение о выводе оборудования из эксплуатации;

- отсутствие наиболее универсальных и надежных способов дистанционной бесконтактной диагностики энергетических систем.

В предложенной статье частично обобщен опыт сотрудников КГЭУ по разработке комплексного метода и соответствующей системы мониторинга из наиболее ответственных и наиболее уязвимых в процессе эксплуатации узлов – высоковольтных изоляторов (ВИ) подстанций и воздушных линий электропередачи. В настоящее время большинство энергетических систем перешло на использование полимерных изоляторов (ПИ) на рабочие напряжения до 500 кВ. Однако сохранились и более старые системы с использованием фарфоровых изоляторов (ФИ).

По нашим представлениям, основанных на ранее полученных результатах, эффективная система мониторинга должна быть способна устанавливать текущее техническое состояние объекта, определять характеристики наиболее опасных дефектов и самостоятельно выделять наиболее быстро развивающиеся дефекты и определять периодичность процессов диагностики.

Начиная со второй половины XX века основное внимание в научных статьях, международных и отечественных стандартах уделялось частичным разрядам (ЧР) как первичным электрофизическим процессам, определяющим рабочее состояние ВИ. Более того, в последнее десятилетие было установлено, что ЧР на дефекте способны создавать сверхбольшие градиенты электрических полей, значительно превышающих напряженность полей в высоковольтной электрической сети.

В ВИ различают три основных вида ЧР: микрозаряды в малых кавернах, существующих как на поверхностях электродов, так и в объеме диэлектриков; частичные заряды 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 и плоскопараллельных воздушных слоев внутри диэлектрика и на границе «диэлектрик – электрод» (дисковые каверны). Ранее уже сообщалось об обнаружении мощных ЧР (МЧР) и разработанном наборе диагностических параметров для их обнаружения [1, 2]. Однако не были разработаны физические принципы развития дефектов в полимерных материалах под действием МЧР и не были построены модели развивающихся дефектов и модели остаточного ресурса в зависимости от новых диагностических параметров.

Материалы и методы

К настоящему времени были разработаны только несколько физических моделей, описывающих распространение стримеров в газовых прослойках дефектов в виде сфер или трехмерных эллипсоидов [3]. В их основе лежит закон Пашена и предложенное положение о зависимости интенсивности q МЧР от общей поверхности полости дефекта [4, 5]

$$q = \pi \varepsilon_0 \varepsilon b^2 [1 + \varepsilon_r (K(a/b) - 1)] E_{\text{чр}}, \quad (1)$$

где ε_0 и ε_r - соответственно диэлектрические проницаемости газа и диэлектрика; a и b – продольный и поперечный размеры полости дефекта; значения K -фактора инверсной поляризации были эмпирически определены в работе [4]: $K \approx 1$ ($a/b \ll 1$), $K = 3$ ($a/b \sim 1$), $K \approx 4$ ($1 < a/b < 10$).

Это выражение было использовано в работах [6, 7] при изучении особенностей ЧР в модельных полимерных образцах. Однако, в этих работах, было недостаточно уделено внимание авторов таким одновременным процессам в газовом промежутке, как возрастание скорости распространения стримера, с увеличением длины разрядного промежутка, с соответствующим повышением наведенного предыдущими ЧР, на диэлектрических поверхностях дефекта напряженности поля, в полости E_i и одновременным уменьшением напряженности приложенного к полости поля fE_a , где E_a – напряженность поля, приложенного к электродам ВИ, а f – фактор изменения напряженности приложенного поля, зависящий от геометрии полости дефекта и соотношения диэлектрических проницаемостей газа и диэлектрического стержня. Хотя ранее было предположено [4], что этот эффект эмпирически можно представить в виде

$$U_d = B d^n, \quad (2)$$

где коэффициент B определяет зависимость напряжения пробоя от величины разрядного промежутка d и давления газа в полости дефекта (Закон Пашена). В таком приближении при малых $d \leq 1$ мм коэффициент n приближается к 1, а для больших $d > 1$ мм величина n уменьшается до 0,5-0,7. Качественно предложенная зависимость была обнаружена для образцов первой, частично второй групп и в модельных образцах [3]. Причем в обоих экспериментах значительное изменение в зависимости $q(d)$ наблюдалось вблизи $d \approx 1$ мм.

Значительно меньшее внимание ранее было обращено на особенности распространения ЧР на втором этапе вдоль диэлектрической поверхности дефекта, причем в отмеченных выше работах не рассматривалось распределение плотности зарядов на диэлектрической поверхности и их изменение в течение периода приложенного напряжения. Некоторое качественное обсуждение процессов распространения ЧР через полость в диэлектрике, ограниченной одной с одной стороной электродом, было выполнено в работах [8-9]. В этих работах было показано, что увеличение площади канала распространения импульса на поверхности диэлектрика приводит к задержке его затухания и изменению общей мощности. По-видимому, это обстоятельство и является главной причиной расхождения между результатами по количеству, интенсивности и фазовому распределению МЧР, полученных с помощью электромагнитных и акустических датчиков.

Еще одно расхождение в характере генерации МЧР для дефектов плоской формы, изученных в реальных ВИ, и дефектов сферической формы, изученных в ряде зарубежных исследований [3, 10], состоит в том, что в сферических дефектах релаксация ЧР осуществляется путем взаимодействия электронов и ионов от двух противоположных отрезков поверхностей сферы дефекта. Наибольшая интенсивность МЧР достигается в том случае, когда возрастает радиус сферы, и напряженность поля возрастает по сравнению с напряженностью приложенного напряжения в 8 раз, максимального заряда МЧР в 13 раз с одновременным уменьшением общего количества ЧР так же за период в 2,6 раза при увеличении радиуса сферы от 0,55 до 1,175 мм [11].

В реальных ВИ релаксация зарядов МЧР осуществляется путем их рассеяния на диэлектрических поверхностях дефектов. Поэтому увеличение или уменьшение заряда МЧР во многом будет зависеть от процесса распределения индуцированного заряда на поверхности, который сам зависит от ряда параметров – проводимостью поверхности, размерами. Эти параметры имеют противоречивое влияние на индуцированное на поверхности поле E_i . Увеличение проводимости приводит к возрастанию скорости перемещения зарядов вдоль поверхности и разрастанию площади зарядов на поверхности. Этот эффект, как показано в работе [12], создает повышение зарядов на поверхности и увеличение интенсивности МЧР. Он наиболее характерен для распространения стримеров, образованных положительными ионами, как было показано на модельных образцах [12, 13] и нами на реальных ВИ. Уширение формы импульсов положительных ЧР в спадающей части связано с расширением площади стримера на поверхности. При этом не наблюдалось подобного уширения отрицательных импульсов ЧР.

Следует подчеркнуть особенности различия фазовых интервалов генерации МЧР для дефектов на стержне и контакте «стержень-оконцеватель». В первом случае накопление индуцированных ЧР и МЧР возникает поочередно на обеих граничных поверхностях дефекта. Во втором случае – только на одной диэлектрической границе полости, поскольку второй границей является металлический электрод. Эта особенность отражается на фазовом распределении МЧР.

В определенном приближении и упрощении согласно приведенному выше выражению (2) для зависимости интенсивности ЧР от формы полости в виде эллипсоида первый тип дефекта можно отнести к виду $a > b$, а дефект «стержень-оконцеватель» к виду $a < b$. Это предположение уже нашло экспериментальное подтверждение [1]

$$\bar{E}_n = \bar{E}_a + \bar{E}_i \quad (3)$$

Выполненный анализ группы параметров характеристик МЧР показал, что возможный набор диагностических параметров технического состояния ВИ может быть основан на ряде фазозависимых характеристик мощных частичных разрядов, поскольку последние являются одними из главных источников ускоренного развития дефектов. Конкретно при первичном контроле дефектности ВИ такими диагностическими

параметрами могут быть значения коэффициентов отношения количества МЧР к общему количеству ЧР за определенный интервал измерений и коэффициент отношения количества ЧР в положительном и отрицательном полупериодах приложенного высокого напряжения.

Результаты

На основе полученных данных по фазовым характеристикам ЧР и напряженности электрических полей были построены более полные схемы электрофизических процессов (рис. 1), происходящих в полостях обоих видов дефектов в течение одного периода приложения высокого напряжения. На рисунке 1 представлены следующие обозначения полей: E_a – изменение поля в полости, E_i – индуцированное частичными разрядами поле на диэлектрических поверхностях полости, φ – фазовые интервалы генерации ЧР [14].

До начала излучения импульсов ЧР поле E_a в полости однородно (рис. 1). С ростом поля E_a , начиная с нулевой фазы, до достижения условия $E_a \geq E_n$ (0° - 50°), где E_n – поле электрического пробоя, начинается излучение малых ЧР. Оно сопровождается накоплением зарядов на диэлектрических поверхностях полости, которые образуют поле E_i , противоположное по знаку приложенному полю E_a . Поле E_i возрастает с каждым последующим ЧР, пока не превысит поле E_a , что приводит к прекращению излучения ЧР и дальнейшего роста поля E_i . Причем вследствие малой электропроводности диэлектрика, поле E_i сохраняется до следующего ЧР. После смены фазы приложенного напряжения при 180° поля E_a и E_i становятся одинаковыми по знаку, и их векторное сложение $(E_a + E_i) > E_n$ приводит к излучению МЧР (180° - 240°).

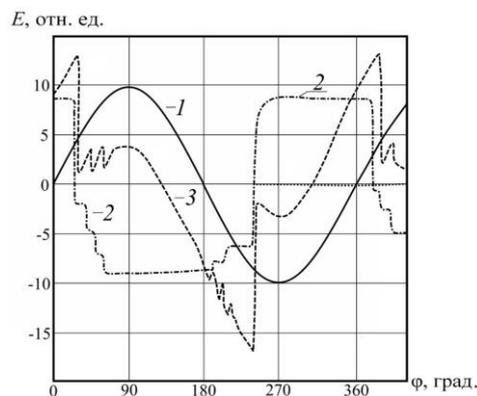


Рис. 1. Модель электрофизических процессов в полости дефекта за один период фазы приложенного электрического поля (E_a): 1 – приложение поля E_a в полости дефекта, 2 – поле индуцированных зарядов E_i на диэлектрических поверхностях полости, 3 – суммарное поле в полости $E_t = E_i \pm E_a$

Fig. 1. Diagram of the distribution of fields in the cavity of the defect depending on the phase of the applied electric field (E_a): 1 – application of the field E_a in the cavity of the defect, 2 – field of induced charges E_i on the dielectric surfaces of the cavity, 3 – total field in the cavity $E_t = E_i \pm E_a$

Сверхбольшие разряды происходят в полости дефекта при высокой напряженности электрического поля. Такой мощный разряд возможен при большом размере поверхности полости, что и подтверждается в экспериментах. Одним из главных выводов по результатам измерений набора характеристик ЧР на фарфоровых и полимерных ВИ стало подтверждение ранее установленного на модельных дефектах факта, что возникновение мощных частичных разрядов на больших дефектах ($d \geq 1$ мм) связано с накоплением электрических зарядов и соответствующих им индуцированных электрических полей за счет зарядов предыдущих обычных ЧР на дефекте. Было установлено, что такое формирование индуцированных полей в полости дефекта характерно не только для полимерных, но и фарфоровых ВИ. Причем для малых дефектов ($d \leq 1$ мм) индуцированные ЧР поля малы по сравнению с приложенным нормированными электрическими полями. Однако с ростом размеров дефектов ($d \geq 1$ мм) и повышением интенсивности соответствующих им ЧР выше 2 нКл начинается изменение общего поля в полости ($E_a + E_i$). При повышении интенсивности МЧР до 4-6 нКл возникало значительное изменение формы, ширины и скорости распространения положительных МЧР, при неизменности тех же характеристик для отрицательных импульсов (рис. 2 и рис. 3).

На схеме (рис. 1) возникновение отрицательного МЧР соответствует резкому изменению поля E_t при $\varphi \approx 240^\circ$. Для дефекта с одной диэлектрической поверхностью (контакт стержень-оконцеватель) процесс излучения МЧР на этом фазовом цикле ($\varphi < 270^\circ$) заканчивается, а для дефекта с двумя диэлектрическими поверхностями при дальнейшем увеличении фазовых углов происходит накопление зарядов и образование поля E_t противоположного знака (фазовый интервал 240° - 360°). Этот процесс заканчивается возникновением положительного МЧР уже в фазовом интервале следующего цикла приложенного напряжения (0° - 50°).

В соответствии с предложенной схемой в каждом периоде E_a с началом малых ЧР увеличивается скорость генерации индуцированных электронов в процессе разряда, что приводит к более ранней фазе начала излучения ЧР и соответствующего поля зарядов на поверхности без изменения их полярности. МЧР возникают при смене поляризации максимального поля E_t внутри полости. С ростом размера полости дефекта увеличивается разрядный промежуток, количество и скорость индуцированных электронов, количество и интенсивность МЧР в каждом периоде приложенного напряжения.

Интерес к изучению характеристик ЧР в различных материалах, используемых в основном в качестве элементов изоляции, не прекращался, начиная со второй половины XX века, причем периодически возрастал с учетом применения новых материалов, как это было с возрастающим использованием полимеров, так и с повышением напряженности электрических полей. Уже в конце XX века появились первые экспериментальные работы по изучению влияния ЧР на развитие дефектов в основном сферической или цилиндрической формы [3]. В то же время появились и первые теоретические расчеты по взаимодействию электрических разрядов, генерируемых ЧР на диэлектрических поверхностях дефектов. На рисунках 2 и 3 представлены формы импульсов МЧР для обоих видов изученных дефектов.

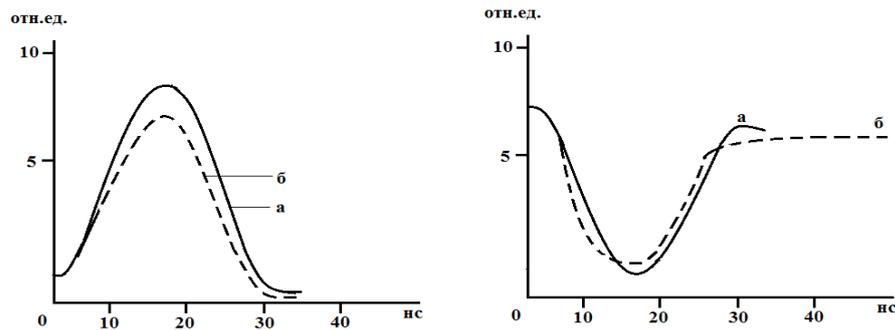


Рис. 2. Импульсы частичных разрядов на дефекте стержня ВИ [18]: а – теоретическая, б – экспериментальная. *Fig. 2. Shape of PD pulses on a dielectric rod defect: a – theoretical, b – experimental.*

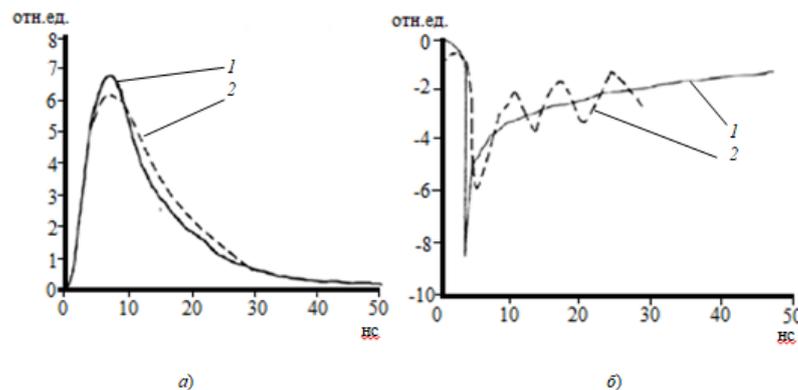


Рис. 3. Положительные (а) и отрицательные (б) импульсы частичных разрядов на дефекте «стержень – оконцеватель»: 1 – теоретическая, 2 – экспериментальная [18]. *Fig. 3. The shape of positive (a) and negative (b) PD pulses on the defect "dielectric rod-end fitting": 1 - theoretical, 2 - experimental.*

Форма импульсов частичных разрядов практически одинакова (положительные и

отрицательные импульсы на рис. 2) для дефекта на стержне ВИ. Для дефекта вида «стержень-оконцеватель» формы импульсов ЧР для положительных и отрицательных разрядов отличаются (рис. 3).

Положительные и отрицательные импульсы частичных разрядов в диэлектрической полости развиваются следующим образом. Индуцированное предыдущими частичными разрядами поле и внешнее приложенное поле совместно порождают дрейф индуцированных зарядов к поверхности диэлектрика. Высокая дрейфовая скорость электронов стимулирует развитие отрицательных ЧР стримерного типа. Задняя часть отрицательных и положительных импульсов ЧР медленно затухает из-за перемещения индуцированных зарядов вдоль поверхности диэлектрика.

Процесс распространения МЧР через полость дефекта сопровождался расширением площади канала стримера в несколько раз для отрицательных импульсов. Было установлено, что при каждом расширении так же значительно возростала амплитуда заряда МЧР, что вполне соответствовало форме импульсов на рисунке 3. Этот экспериментальный результат вполне соответствует ранее разработанной модели распространения импульсов через дефекты в диэлектриках эллипсоидальной формы [4]. В этой модели предполагалась квадратичная пропорциональность заряда q стримера диаметру b электромагнитного импульса

$$q(a) b_i \epsilon_2 \approx \pi \epsilon_2 b^2 E_c \quad (4)$$

Разработанная схема генерации МЧР нашла подтверждение в феноменологической модели процесса генерации и последующего распространения первичного разряда в полости дефекта. Как оказалось, в реальных условиях излучения ЧР в высоковольтных изоляторах, как полимерных, так и фарфоровых, имеет более сложный характер и до сих пор серьезно практически не изучался [3]. По существу, была сделана первая попытка объяснения генерации МЧР в реальных высоковольтных энергетических системах.

На рисунке 4 представлена разработанная схема фазового распределения приложенного поля E_a , индуцированного предыдущими частичными разрядами поля E_i и суммарного поля E_t в пределах одного периода.

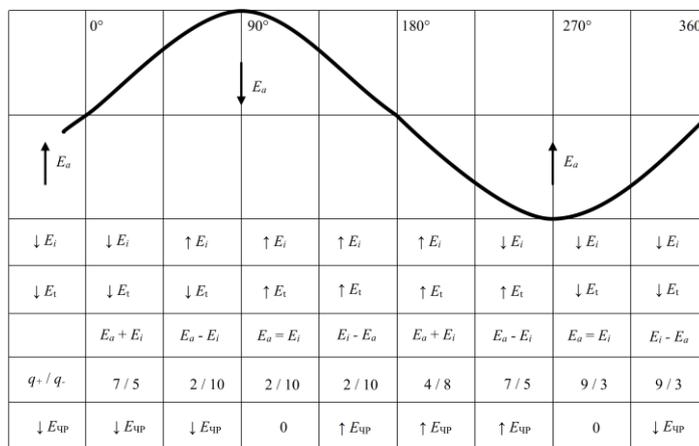


Рис.4. Схема фазового распределения напряженности приложенного поля E_a

Fig.4. Scheme of the phase distribution of the applied field strength E_a

В первой четверти первого полупериода ($0^\circ \leq E_a(\varphi) \leq 45^\circ$) возникновение положительных частичных разрядов обусловлено полем отрицательных зарядов E_i на поверхности диэлектрика, сохранившихся после предыдущего ЧР, если суммарное поле $E_t = (E_a + E_i)$ превышает поле пробоя E_b . На диэлектрических поверхностях полости будут накапливаться положительные заряды из-за поляризации воздушного промежутка. Они частично компенсируют поле E_t и уменьшают количество ЧР с ростом фазы более 20° . При увеличении фазы более 90° поля E_a и E_i уменьшаются, удерживая количество положительных ЧР на низком уровне.

Начиная с фазы $\varphi = 120^\circ$ поле накопленных положительных зарядов на поверхности диэлектрика начинает превосходить не только поле E_a , но и поле пробоя E_b ($E_t = E_i - E_a > E_b$). Начинается генерация отрицательных ЧР до достижения E_a значений,

соответствующей фазовым углам $\varphi = 220^\circ$. В фазовом интервале $180^\circ - 220^\circ$ интенсивность и количество отрицательных ЧР будет значительно превосходить подобные значения для других фазовых интервалов приложенного напряжения, что и наблюдалось в наших измерениях. Ближе к фазовым интервалам $270^\circ - 300^\circ$ начинает снижаться поле E_t и уменьшается количество отрицательных ЧР вследствие накопления свободных электронов и отрицательных ионов на поверхности полостей. Затем при $\varphi \geq 320^\circ$ возникает новый ЧР, создаваемый уменьшением E_a и возрастанием поля отрицательных зарядов, накопленных на поверхности ранее. Общее поле $E_t = (E_i - E_a)$ начинает превосходить поле пробоя E_b и возникают положительные ЧР, продолжающиеся и в начале следующего периода приложенного напряжения. Следовательно, основной причиной генерации ЧР и расположение их в указанных фазовых интервалах для дефекта типа «стержень-оконцеватель» является индуцированное разрядами на поверхности полости диэлектрика поле. Тем более важно, что напряженность E_i может превосходить напряженность приложенного поля E_a . Величину индуцированного разрядами на поверхности полости поля можно оценить по интенсивности ЧР, возникающих в близких к 0° и 180° фазовых интервалах приложенного поля. Были выявлены такие особенности обследованных образцов, как совпадение измеренных с помощью электромагнитного и акустического методов характеристик ЧР, отсутствие ЧР большой интенсивности и наличие узкой полосы мощностных интервалов ЧР. Это говорит о том, что дефекты имеют малые размеры, различия отрицательных и положительных импульсов и сдвиг фаз генерации ЧР (рис.4).

На рис. 5 приведены амплитудно-фазовые характеристики ЧР (АФХ) фарфорового высоковольтного изолятора. Характерной особенностью этого образца является отличие АФХ, полученных электромагнитным и акустическим датчиками, т.к. электромагнитный датчик детектировал незначительное количество положительных ЧР, что может быть связано с меньшим полем положительно заряженных зарядов на поверхности полости, образующей дефект. Малые размеры дефекта, характеризуемые узкой мощностной полосой генерации ЧР ответственны за малую интенсивность отрицательных ЧР в фазовом интервале $100^\circ - 160^\circ$, поскольку для этого интервала генерация отрицательных ЧР создается за счет зарядового поля на поверхности диэлектрика.

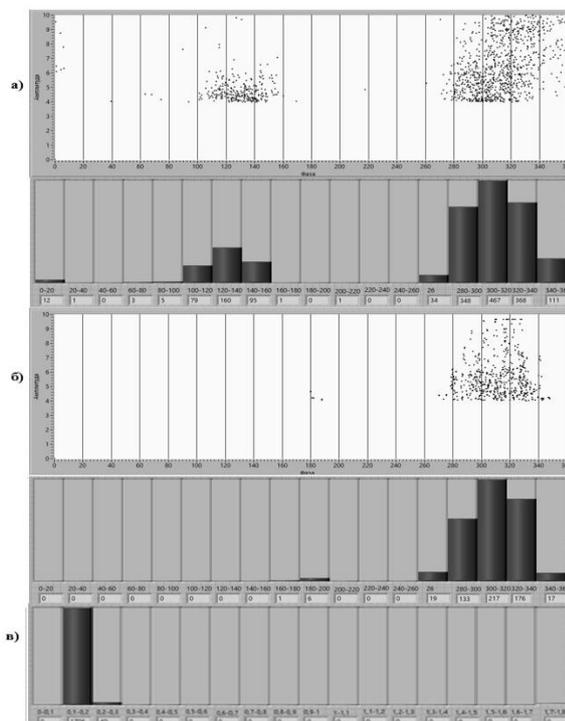


Рис. 5. Амплитудно-фазовая и количественно-фазовая характеристики ЧР, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; в – распределение количества ЧР в зависимости от интенсивности ЧР.

Fig. 5. Amplitude-phase and quantitative-phase characteristics of the PD detected by (a) electromagnetic and (b) acoustic sensors; (c) distribution of the number of PDs depending on the intensity of PDs in porcelain high voltage insulator (sample no. 7).

Для этого образца наблюдаются отличия регистрируемых ЧР и их амплитудно-

фазовых и количественно-фазовых характеристик, получаемых электромагнитным и акустическим методами. Для фазовых интервалов 100° - 140° интенсивности ЧР ниже, чем для интервала 280° - 360° , значит, положительные ЧР акустическим датчиком не регистрируются. Интенсивные положительные импульсы ЧР, создающиеся суммой полей E_a и E_i , обладают частотным спектром вблизи частоты электромагнитного датчика, но выше частоты акустического датчика, поэтому не регистрируются акустически в фазовом интервале 0° - 90° .

Был разработан способ [19] определения технического состояния высоковольтных изоляторов по характеристикам ЧР. Для его обоснования были проведены измерения набора характеристик частичных разрядов на сериях полимерных и фарфоровых высоковольтных изоляторов, содержащих различные виды дефектов, отличающихся расположением и размерами. Измерения характеристик выполнялись на испытательном стенде и на подстанциях с помощью электромагнитного приемника. На рис. 6 представлены амплитудно-фазовые характеристики ЧР для изоляторов, содержащих дефекты на стержне (диаграммы a_1 , a_2 , a_3) и дефекты на контакте «стержень-оконцеватель» (диаграммы b_1 , b_2 , b_3). Диаграммы a_1 и b_1 соответствуют начальному развитию дефектов, не представляющих опасность для эксплуатации ВИ. Диаграммы a_2 и b_2 измерены для ВИ с более развитыми дефектами и содержат МЧР с зарядом $q > 2$ нКл [19]. Для дефектов на стержне они расположены симметрично на положительном и отрицательном фазовых полупериодах высокого напряжения. Для дефектов «стержень-оконцеватель» такие разряды характерны только для отрицательного полупериода. На диаграммах a_3 и b_3 приведены распределения ЧР для образцов с большими дефектами, представляющими опасность для дальнейшей эксплуатации. Для них характерно значительное увеличение количества и заряда МЧР, а также расширение фазовых интервалов их генерации.

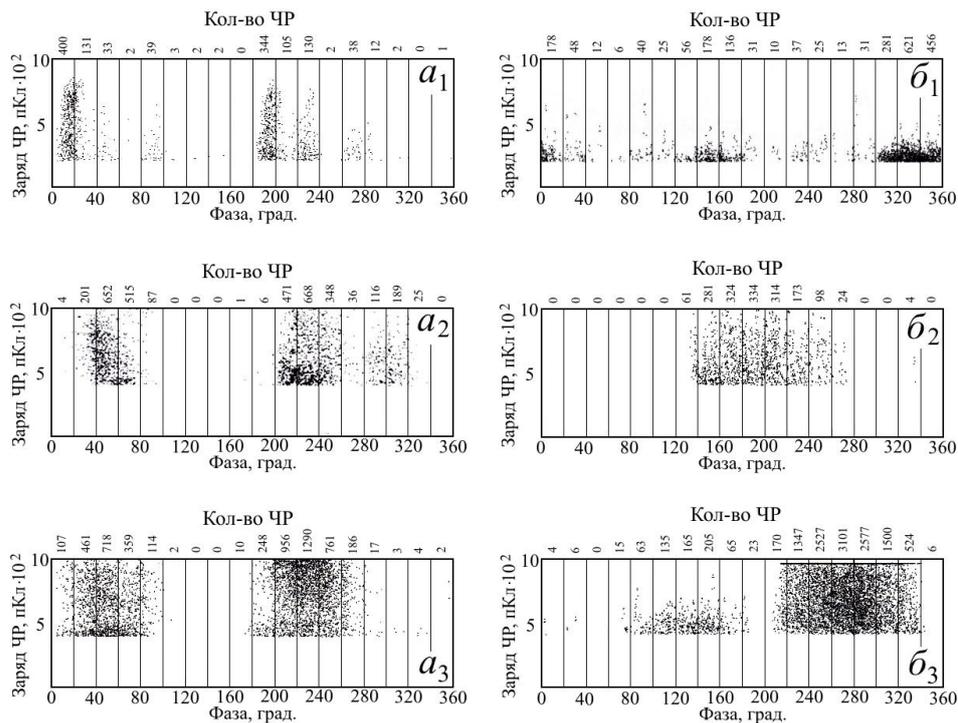


Рис.6. АФХ распределения отдельных частичных разрядов для изоляторов, содержащих дефекты на стержне (а) и дефекты на контакте «стержень-оконцеватель» (б): 1 – начальное развитие дефектов, 2 – более развитые дефекты, содержащие мощные ЧР, 3 – большие дефекты, представляющие опасность для дальнейшей эксплуатации [19].

Fig.6. Amplitude-phase characteristic of the distribution of individual partial discharges for insulators containing defects on the dielectric rod (a) and defects on the contact "dielectric rod-end fitting" (b): 1 - initial development of defects, 2 - more developed defects containing extra-large PDs, 3 - large defects that pose a danger to further operation

Проведенные измерения развития дефектов ВИ позволили обнаружить сдвиги фазовых углов начала возникновения ЧР при обследовании их с интервалом в три месяца (рис. 7). В результате было установлено возрастание заряда и увеличение

количества ЧР за один фазовый интервал. Это позволяет сделать вывод об увеличении размеров дефектов, на которых возникают мощные ЧР, что не противоречит разработанной электрофизической модели.

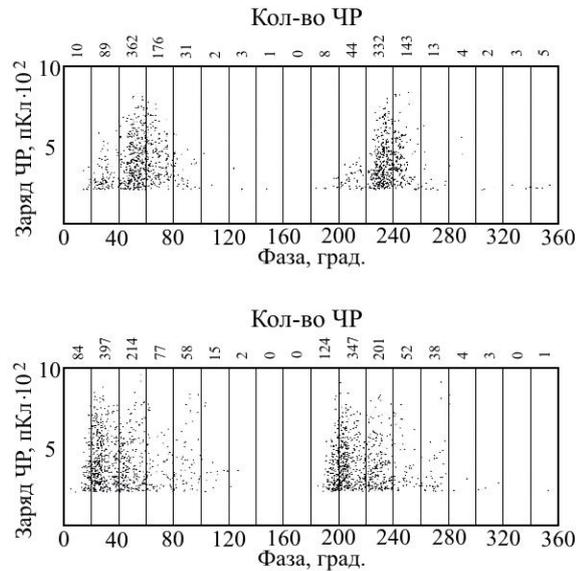


Рис.7. Фазовый сдвиг интервала генерации мощных ЧР в сторону меньших углов.

Fig.7. Phase shift of the generation interval of extra-large PDs towards smaller angles

Обсуждение

Как уже рассматривалось выше, измерениями был установлен ряд ранее неизвестных особенностей совместного использования электромагнитных и акустических датчиков. Так, при регистрации ЧР с интенсивностями не выше 1,0-1,5 нКл их фазовые интервалы совпадали на 90% и выше, а другие отличия касались только интенсивности и количества ЧР, что было вызвано различной чувствительностью датчиков. Однако при детектировании мощных ЧР ($q > 2$ нКл) наблюдались различия в фазовых интервалах МЧР, которые увеличивались с ростом дефектов, ответственных за генерацию ЧР. Примеры таких приведены на рисунке 5.

Причиной тому может быть различия в процессах передачи информации от импульсов ЧР к измерительным датчикам. Первичным процессом при возникновении ЧР является генерация импульсов электромагнитного поля стримерного типа и их распространение в полости дефекта. При этом параметры излучения акустических волн управляются характеристиками механической системы. При представлении дефекта в виде сферы малого радиуса r как простейшего случая при условии $r \ll \lambda_a$, где λ_a – длина акустической волны, полная акустическая мощность W_a равна

$$W_a \approx \frac{\rho_c r^2 V_a}{2\pi}, \quad (5)$$

где ρ_c – волновое сопротивление, V_a – амплитуда колебательной скорости.

Поэтому изменение размеров дефекта в процессе эксплуатации может существенно влиять на мощность акустического излучения. Вторым не менее важным фактором является изменение электрического поля внутри полости за счет накопления зарядов предыдущих ЧР. При этом также будет изменяться плотность индуцированных зарядов в полости дефекта. Таким образом, предложенный эмпирический метод прогнозирования дальнейшего срока службы предполагает использование двух типов датчиков – высокочастотного электромагнитного и акустического датчиков.

Важным элементом в определении диагностических параметров является периодичность их регистрации, которая в основном определяется скоростью развития дефектов. Поскольку сама скорость развития возрастает пропорционально размерам дефектов и приложенным напряжениям, то возникает необходимость в создании физической модели развития дефектов для каждого типа диэлектрических элементов. Сложность решения данной задачи возрастает с использованием для регистрации

характеристик ЧР одновременно нескольких датчиков, например, электромагнитного и акустического. Как указывается в ряде работ [4, 6, 7] наиболее быстроразвивающимися являются именно ЧР, причем периодичность регистрации диагностических параметров высоковольтной изоляции с большими дефектами может ускоряться до 2-х часов.

В результате изучения двух видов ВИ с различными рабочими напряжениями было установлено, что скорость развития дефектов определяется двумя параметрами: значением приложенного к дефектам напряжения и их размерами. Как уже отмечалось выше, оба параметра характеризуются интенсивностью ЧР, количеством за определенные фазовые интервалы регистрации измерений. Об увеличении скорости развития дефекта, как указано в [20], при неизменности рабочего напряжения в сети говорит увеличение размеров дефекта и снижение напряженности поля в области дефекта. До настоящего времени попытка установить такие интервалы дефектов, были сделаны только для сферической формы дефектов в модельных полимерных материалах, но они пока не позволили получить реальные результаты [21]. Поэтому предложен эмпирический метод измерения скорости развития дефектов, основанный на измерении ряда характеристик только для МЧР, как главных источников ускорения процессов старения ВИ.

Выводы

Было установлено, что мощные разряды возникают за счет накопления зарядов на диэлектрических поверхностях больших дефектов предыдущими обычными частичными разрядами. Наведенные разряды образуют индуцированные поля (E_i), которые могут значительно превышать приложенные высоковольтные поля (E_a). Мощные разряды возникают при сложении одинаково направленных полей E_i и E_a , что происходит в фазовых интервалах положительного ($0-50^\circ$) и отрицательного ($180^\circ-240^\circ$) полупериодов поля E_a . Количество и интенсивность мощных разрядов возрастают с увеличением размера дефекта и могут составлять 2-6 разрядов за период каждого цикла высокого напряжения с интенсивностью 2-6 нКл [22].

Именно такие мощные разряды вызывают деградацию диэлектрических поверхностей, ускоряя развитие дефектов и уменьшая срок эксплуатации изоляторов. Поэтому периодический контроль над характеристиками мощных разрядов является одним из наиболее важных при дистанционном мониторинге состояния высоковольтных изоляторов.

В отличие от контактного стендового метода испытания изоляции высоким напряжением измерение интенсивности ЧР, частоты их повторения и фазовый момент возникновения за определенный интервал времени при бесконтактном дистанционном методе связано с большими погрешностями, зависящими от расстояния между датчиком и ВИ, влияния климатических и внешних помех. Эксперименты на реальных ВИ показали, что наиболее важными и достоверными характеристиками ЧР при дистанционном контроле технического состояния полимерных ВИ являются изменения фазовых интервалов, соответствующих наиболее мощным ЧР, интенсивности и частоты повторения, по сравнению с бездефектными ВИ того же типа. Повышение точности таких измерений достигается одновременным использованием нескольких методов: акустического и тепловизионного, электромагнитного и акустического, а также дополнительно оптического с накоплением сигналов ЧР и последующей компьютерной обработкой сигналов. Диагностический прогноз дальнейшего срока технического состояния положительных ВИ возможен на оценке изменения фазовых углов начала ЧР, количества и интенсивности самых мощных импульсов ЧР за длительный период (не менее одного часа, а также в течении месяца) воздействия высокого напряжения. Установление длительного (~ 800 часов) периода изменения таких параметров МЧР в дефектных полимерных ВИ, как возрастание интенсивности и количества разрядов, сдвиг начала разрядов к нулевым или 180° значениям фазы переменного напряжения, могут быть использованы в качестве диагностических параметров при прогнозировании остаточного ресурса ВИ.

Режим мониторинговой диагностики значительно отличается от однократных измерений диагностических параметров, в качестве которых также используются характеристики частичных разрядов. На основе выполненных измерений параметров ЧР контактным и бесконтактным способами с использованием электромагнитного и акустического датчиков, а также электрооптического способа измерения напряженности электрических полей, были установлены необходимые наборы параметров характеристик ЧР и ряда других электрофизических параметров. Причем обоснование использования их для оценки ЧР было дано в последнем ГОСТ и международном

стандарте [23, 24]. 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 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 [23, 24] необходимо выполнить измерение интенсивности и количества ЧР в зависимости от фазы высокого напряжения контактным способом с использованием регулируемого источника напряжения. Определение вида и места первоначальных дефектов с не детектируемым уровнем ЧР следует выполнять с помощью электрооптического датчика. Применение электрооптического датчика позволяет точнее их определять, поскольку это наиболее прямой способ, измерять напряженность электрического поля в области дефекта и устанавливать их предельные значения для безопасной эксплуатации ВИ. 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. 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 мощных ЧР в ВИ на 110 кВ и выше нужно учитывать, что параметры МЧР, 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 ЛЭП 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 ЛЭП. Поэтому количество диагностических параметров, измеряемых при мониторинге, вначале следует свести к минимуму. Так 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 МЧР. 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 отсутствии 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.

Комплексный метод дистанционного контроля позволяет решать задачи определения технического состояния и остаточного ресурса ВИ в процессе эксплуатации и представляет собой инструмент для решения широкого круга практических задач, прошедший апробацию в промышленности и учебном процессе в ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Литература

1. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., et al. Effect of partial discharges on the operating condition of highvoltage insulators // E3S Web of Conferences. 2019. 124. pp. 03001. doi 10.1051/e3s.
2. 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). pp 01088.
3. M. Borghei, M. Ghassemi, J. M. Rodríguez-Serna and R. Albarracín-Sánchez. A 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.
4. L. Niemeyer. A generalized approach to partial discharge modeling // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. V. 2. no. 4. pp. 510-528. Aug. 1995, doi: 10.1109/94.407017.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание. 3-е изд. перераб. и доп. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. 736 с.
6. C. Pan, G. Chen, J. Tang and K. Wu. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. V. 26. no. 3. pp. 981-1000. doi: 10.1109/TDEI.2019.007945.
7. K. Wu, C. Pan, Y. Meng and Y. Cheng. Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. V. 20, no. 2. pp. 612-619. doi: 10.1109/TDEI.2013.6508765.
8. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А. Патент № 2679759 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/12. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов: № 2018110016: заявл. 21.03.2018; опубл. 12.02.2019 / заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».
9. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., et al. Integrated Noncontact Diagnostics of the Operable Condition of High-Voltage Insulators // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No 8. P. 596-602.
10. A. Villa, L. Barbieri, R. Malgesini, A. R. Leon-Garzon. 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>.
11. 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.
12. Cheng Pan, Yongpeng Meng, Kai Wu, Zenghui Han, Kai Qin and Yonghong Cheng. Simulation of partial discharge sequences using fluid equations // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. V. 44, N. 25. 255201.
13. F. Gao, Q. Wang, D. Dai, W. Ning, Y. Zhang and L. Li. 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.
14. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., и др. Комплексная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83. № 12. С. 1651-1654. doi 10.1134/S0367676519120068.
15. Овсянников А.Г., Коробейников С.М., Вагин Д.В. Связь кажущегося и истинного зарядов частичных разрядов // Электричество. 2014. №8. С. 37-43.
16. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 89-93.
17. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A. Non-Contact Methods for High-Voltage Insulation Equipment Diagnosis during Operation // Energies. 2021. 14 (18). С. 5670.

doi:10.3390/en14185670.

18. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах в условиях эксплуатации: диссертация ... кандидата технических наук : 05.11.13 / Марданов Георгий Дамирович; [Место защиты: Казан. гос. энергет. ун-т]. Казань, 2019. 98 с.

19. Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Калимуллин Р.И. Дистанционно измеряемые диагностические параметры, позволяющие оценивать остаточный ресурс высоковольтных изоляторов / А.В. Голенищев-Кутузов, Д. А. Иванов, Р. И. Калимуллин, А. В. Семенников // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Т.84. №12. С.1763-1766. doi 10.31857/S0367676520120224.

20. T. Tanaka. Internal Partial Discharge and Material Degradation // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1986. V. EI-21. no. 6. pp. 899-905. doi: 10.1109/TEI.1986.348999.

21. P.H.F. Morshuis. Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005. V. 12. no. 5. pp. 905-913. doi: 10.1109/TDEI.2.

22. Иванов Д.А., Галиева Т.Г., Голенищев-Кутузов А.В., и др. Детектирование акустических сигналов частичных разрядов на дефектах изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021. № 6(180). С. 48-55. doi 10.25206/1813-8225-2021-180-48-55.

Авторы публикации

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

References

1. Golenishchev-Kutuzov A.V, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. *Effect of partial discharges on the operating condition of highvoltage insulators*. E3S Web of Conferences. 2019. 124.P. 03001. doi 10.1051/e3s.

2. Golenishchev-Kutuzov A.V, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. *Monitoring System of High Voltage Dielectric Equipment*. E3S Web Conf., 288 (2021).P. 01088.

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

4. L. Niemeyer. *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.

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

6. C. Pan, G. Chen, J. Tang and K. Wu. *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.

7. K. Wu, C. Pan, Y. Meng and Y. Cheng. *Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.2013;20(2):612-619. doi: 10.1109/TDEI.2013.6508765.

8. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA. Patent No. 2679759 C1 Russian Federation, IPC G01R 31/12. *Method for non-contact remote diagnostics of the state of high-voltage insulators* : No. 2018110016 : Appl. 03/21/2018 : publ. February 12, 2019. applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University».

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

10. Villa A, Barbieri L, Malgesini R, A. R. Leon-Garzon. *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>.

11. 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.

12. Cheng Pan, Yongpeng Meng, Kai Wu, Zenghui Han, Kai Qin and Yonghong Cheng. Simulation of partial discharge sequences using fluid equations. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011;44(25):255201.

13. F. Gao, Q. Wang, D. Dai, W. Ning, Y. Zhang and L. Li. 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.

14. Golenishchev-Kutuzov A.V, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. Complex Diagnostics of Defects in High-Voltage Insulators. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2019;83(12):1490-1493. doi 10.3103/S1062873819120062.

15. Ovsyannikov AG, Korobeinikov SM, Vagin DV. Communication of apparent and true charges of partial discharges. *Electricity*. 2014;8:37-43.

16. Golenishchev-Kutuzov A.V, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. Complex method of remote monitoring of the state of high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;5-6:87-93.

17. Ivanov DA, Sadykov MF, Yaroslavsky DA, et al. *Non-Contact Methods for High-Voltage Insulation Equipment Diagnosis during Operation Energies*. 2021;14(18):5670. doi:10.3390/en14185670.

18. *Remote diagnostics of defects in high-voltage insulators under operating conditions*: dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.11.13 / Mardanov Georgy Damirovich; [Place of protection: Kazan state power engineering university]. Kazan, 2019. 98 p.

19. Golenishchev-Kutuzov AV. Ivanov DA, Kalimullin RI, et al. Remotely Measured Diagnostic Parameters for Estimating the Residual Life of High Voltage Insulators. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2020;84(12):1502-1504. doi 10.3103/S1062873820120229.

20. Tanaka T. Internal Partial Discharge and Material Degradation // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1986;EI-21(6):899-905. doi: 10.1109/TEI.1986.348999.

21. P.H.F. Morshuis. Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005;12(5):905-913. doi: 10.1109/TDEI.2.

22. Ivanov DA, Galiyeva TG, Golenishchev-Kutuzov AV .Detection of acoustic signals of partial discharges on defects in insulating equipment. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021;6 (180):48-55. doi 10.25206/1813-8225-2021-180-48-55.

Authors of the publication

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

Получено 25.02.2022г.

Отредактировано 11.03.2022г.

Принято 18.03.2022г.