

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.315.328/611+537.523

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-4-96-107

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДОВ В ОДИНОЧНОМ ВОЗДУШНОМ ДЕФЕКТЕ ИЗОЛЯЦИИ

Ньетерейе Ф., Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Кубарев А.Ю.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
aleksandr_usachev@rambler.ru, shuhrrar1004@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ* исследования заключается в получении новых экспериментальных данных, позволяющих повысить достоверность диагностики электрооборудования методом частичных разрядов (ЧР). *ЦЕЛЬ.* Определить характеристики частичных разрядов, возникающих внутри одиночного воздушного дефекта, находящегося в твёрдой изоляции. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применялись методы техники высоких напряжений для создания и экспериментального измерения высоких напряжений, вызывающих возникновение ЧР в газовом дефекте изоляции. Расчет напряжённости электрического поля в газовых дефектах твёрдой изоляции проводился методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics 6.0. Применялись моделирование электрических цепей в MultiSim, методы теории вероятности и статистики при обработке результатов измерений. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье изложена методика измерения контактным электрическим методом параметров только тех ЧР, которые возникают внутри созданного одиночного воздушного дефекта изоляции. Методом конечных элементов выполнены расчёты коэффициента неоднородности электрического поля для образцов с различными по величине газовыми дефектами. Для измерительной ячейки, в которой электроды имеют форму сегмента шара радиусом 25 мм, рассчитаны ожидаемые параметры ЧР в зависимости от размеров дефектов изоляции. Экспериментально показано, что ЧР в образце с одиночным газовым дефектом происходят только дважды за каждый период синусоидального напряжения промышленной частоты в 1-ой и 3-ей четвертях при одинаковой по модулю напряжённости электрического поля внутри дефекта. Влияния объёмного заряда, образующегося в каверне дефекта при каждом ЧР, на последующий ЧР, возникающий через половину периода синусоиды, не наблюдалось. Изменений напряжения возникновения ЧР ($U_{чр}$), частоты следования и амплитуды импульсов ЧР при выдержке образцов под напряжением $U \sim 1,5 \cdot U_{чр}$ в течение 400 часов не наблюдалось. Признаков деградации изоляции в стенках каверны дефекта за этот период не обнаружено.

Ключевые слова: *частичные разряды; газовый дефект в изоляция; ячейка для измерений электрической прочности жидкостей; напряжённость возникновения ЧР; расчёт электрического поля, коэффициент неоднородности поля.*

Для цитирования: Ньетерейе Ф., Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Кубарев А.Ю. Исследование характеристик частичные разрядов в одиночном воздушном дефекте изоляции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 4. С. 96-107. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-96-107.

PARTIAL DISCHARGES IN GAS INSULATION DEFECTS

Nyetereye F., Usachev A.E., Boboev Sh.A., Kubarev A.Yu.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
aleksandr_usachev@rambler.ru, shuhrrar1004@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE* of the study is to obtain new experimental data to improve the reliability of electrical equipment diagnostics using partial discharge (PD) measurements. *THE*

PURPOSE. To determine the characteristics of partial discharges occurring within a single air defect located in a solid insulation. **METHODS.** To achieve this objective, high-voltage techniques were used to generate and experimentally measure high voltages that cause PDs in gas defects in construction. The field strength in gas defects in solid connections was calculated using the finite element method in COMSOL Multiphysics 6.0. Electrical circuit modeling in MultiSim, along with methods, capabilities, and statistics, were used to process the measurement results. **RESULTS.** This article presents a methodology for measuring the parameters of only those partial discharges (PDs) that occur within a single air-filled insulation defect using the contact electrical method. The electric field non-uniformity coefficient was calculated using the finite element method for samples with gas defects of varying sizes. Modeling in Multisim software was used to determine the phase shift angle between the current and voltage in the cell during PD measurements. For a measuring cell in which the electrodes are shaped like a spherical segment with a radius of 25 mm, the expected PD parameters were calculated depending on the insulation defect sizes. It was experimentally demonstrated that PDs in a sample with a single gas defect occur only twice per period of a sinusoidal industrial frequency voltage in the first and third quarters, with the electric field strength inside the defect having the same absolute value. No effect of the space charge generated in the defect cavity during each PD on the subsequent PD occurring halfway through the sine wave period was observed. No changes in the PD initiation voltage (U_{pd}), pulse repetition rate, or PD amplitude were observed when the samples were held under a voltage of $U \sim 1.5 \cdot U_{pd}$ for 400 hours. No signs of insulation degradation in the defect cavity walls were detected during this period.

Key words: Partial discharges; gas defect in insulation; cell for measuring the electrical strength of liquids; partial discharge occurrence intensity; electric field calculation, field heterogeneity coefficient.

For citation: Nyetereye F., Usachev A.E., Boboev Sh.A., Kubarev A.Yu. Partial discharges in gas insulation defects. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (4): 96-107. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-96-107.

Введение (Introduction)

В настоящее время обоснованно считается, что измерение частичных разрядов (ЧР) в изоляции электрооборудования позволяет обнаруживать дефекты изоляции на ранней стадии их развития [1,2]. Метод ЧР является одним из основных методов¹ в непрерывной и ремонтной диагностике состояния оборудования [3]. Выполнены тысячи исследований и измерений ЧР в различных средах и развиты многочисленные методики их измерений. Установлена однозначная связь между величиной пробивного напряжения газового промежутка и расстояния между электродами [4]. Такая же связь установлена и в том случае, если электроды покрыты диэлектриком [5]. Такие разряды носят название барьерных и для них было установлено, что при размерах электрода меньше 1 см^2 разряды происходят два раза за период синусоиды при одинаковой по модулю напряжённости электрического поля. При исследовании ЧР в изоляции турбогенераторов (ТГ), силовых трансформаторов (СТ) и кабельных линий электропередачи (КЛЭП) было обнаружено, что некоторые ЧР возникают при напряжении электрического поля, которое не может обеспечить существование самостоятельных разрядов в газовых дефектах. Поскольку экспериментально такие ЧР наблюдались, то для их объяснения была предложена модель, в которой электроны лавины ЧР оседали на стенках каверны дефекта и создавали некоторую поверхностную плотность заряда. После прохождения напряжения через ноль эти электроны создавали остаточный заряд в каверне дефекта и следующий ЧР происходил при более низкой напряжённости. Модель остаточных зарядов широко применяется при описании ЧР. Наличие или отсутствие остаточных зарядов в каверне дефекта является принципиальным для диагностики изоляции методом ЧР. В работе [6] было выдвинуто предположение, что остаточных зарядов в каверне дефекта не остаётся, а ЧР при низком напряжении можно объяснить возникновением ЧР в других фазах электрооборудования, смещённых на $\pm 120^\circ$. Таким образом были объяснены все разряды при низком напряжении. Другой особенностью дистанционного контроля изоляции методом ЧР в реальных объектах электроэнергетики является непостоянство числа ЧР при измерениях через короткие (порядка нескольких часов) промежутки времени. В ряде случаев число регистрируемых ЧР изменялось в десятки и сотни раз при

¹ ГОСТР 55191 —2012. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. – М: Стандартинформ, 2014.

последовательных измерениях. Для выяснения таких противоречий и было предпринято настоящее исследование.

Цель исследования заключается в определении характеристик частичных разрядов, возникающих внутри одиночного воздушного дефекта, находящегося в твёрдой изоляции.

Научная новизна и значимость исследования состоит в том, что экспериментально доказано, что газовом дефекте изоляции с размерами менее 1 мм в каждом периоде синусоиды возникает только два ЧР, которые происходят при одинаковых по модулю напряжённостях электрического поля внутри дефектов в 1-ой и 3-ей четверти периода каждой синусоиды. Напряжённость возникновения ЧР в различных образцах совпадала с напряжённостью сквозного пробоя воздушных промежутков в шаровом разряднике с диаметром шаров 5 см и расстоянием между шарами, которое равно размеру дефектов вдоль поля. Число и периодичность ЧР не изменялась в течении 400 часов выдержки под высоким напряжением, превосходящем напряжение, при котором возникали ЧР в 1,5 раза.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования результатов исследования в практике диагностики высоковольтной изоляции электрооборудования для отделения ЧР в газовых дефектах от посторонних импульсов по критерию числа ЧР за единицу времени в течение нескольких суток и постоянству сдвига на 180° по фазе возникновения ЧР.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объектами исследования являлись специально приготовленные образцы изоляции с цилиндрическими дефектами различного размера. Образец состоял из трёх слоёв: изоляции и имел квадратную форму со стороной 60 мм. В среднем слое методом вырубования по центру создавался цилиндрический дефект. Технология создание дефектов методом высверливание была испробована и отвергнута, поскольку приводила к возникновению на краях дефекта обугленных участков, что не соответствовало требуемому качеству внутренней поверхности дефекта. Состояние поверхностей дефекта контролировалось по фотографиям под микроскопом с кратностью увеличения 1500. Слой изоляции с дефектом ламинировался с двух сторон, что предотвращало проникновение масла в каверну дефекта. Для повышения достоверности отнесения ЧР к разрядам, происходящим в созданном дефекте, изготавливались контрольные образцы изоляции, которые отличающиеся от рабочих (с дефектами) только отсутствием в контрольных образцах самих дефектов. Сравнивая результаты измерений ЧР в рабочем и контрольном образце при одинаковых условиях наблюдения, можно отделить ЧР в дефектах от каких-либо других разрядов.

Объектом испытания (ОИ на рис.3а) являлась измерительная ячейка (ИЯ), в которую помещались образцы изоляции. В данной работе описываются измерения ЧР в стандартной ячейке для испытания жидких диэлектриков на пробивное напряжение². Для отделения ЧР от внешних шумовых разрядов ячейка помещались в заземлённый металлический бокс в форме куба с ребром 1 м. Для ввода высокого напряжения в бокс был изготовлен ввод, качество которого определялось по отсутствию сигналов ЧР в контрольном образце при напряжениях до 40 кВ.

Перед каждым измерением ЧР проводились испытания пробивного напряжения трансформаторного масла и в ячейку заливалось масло с пробивным напряжением не менее 70 кВ. Образцы изоляции (рис.1а) квадратной формы с шириной стороны 65 мм вставлялись между электродами ячейки (сегмент шара с диаметром 5 см) так, чтобы ось дефекта совпадала с осью электродной системы (рис.1б). Это достигалось выбором размеров образца. При такой геометрии эксперимента дефект находился в области с наиболее сильным электрическим полем.

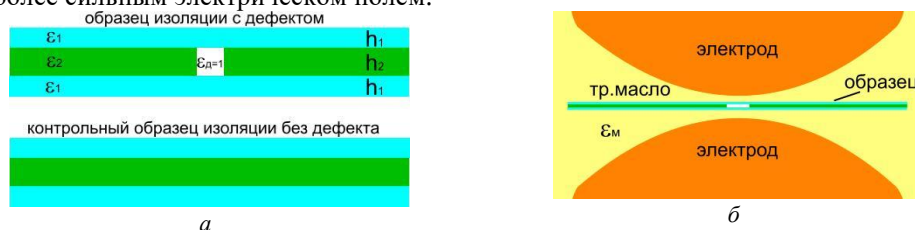


Рис. 1. Образцы изоляции (а) и их положение в измерительной ячейке (б) *Fig. 1. Insulation samples (a) and their position in the measuring cell (b)*

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

² ГОСТ 6581-75. Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. М.: Стандартинформ, 2008.

Моделирование электрического поля в измерительной ячейке

При помещении образцов с дефектами между электродами ячейки электрическое поле становится неоднородным. Для определения напряжённости поля внутри дефекта по измеренному напряжению между электродами ячейки ($U_{ВН}$) нужно знать коэффициент неоднородности поля (K_H) для каждого типа и размера дефекта. Коэффициент неоднородности определяется как отношение максимальной напряжённости внутри дефекта (E_{max}) к средней напряжённости между электродами в однородном поле ($E_{ср}$):

$$K_H = \frac{E_{max}}{E_{ср}}, \quad E_{ср} = \frac{U_{ВН}}{d}, \quad (1)$$

где $d = 2,5$ мм – расстояние между электродами ячейки по оси симметрии, $U_{ВН}$ – амплитудное значение напряжения на высоковольтном электроде ячейки.

Для получения величины и распределения напряжённости поля в объёме воздушного дефекта проводилось моделирование электрического поля методом конечных элементов в среде *ComSol-Multiphysics* для каждого типа дефектов. На рис. 2 показаны результаты моделирования для дефекта типа цилиндр с высотой цилиндра 0,35 мм и диаметром 2 мм при напряжении на высоковольтном электроде 13 кВ.

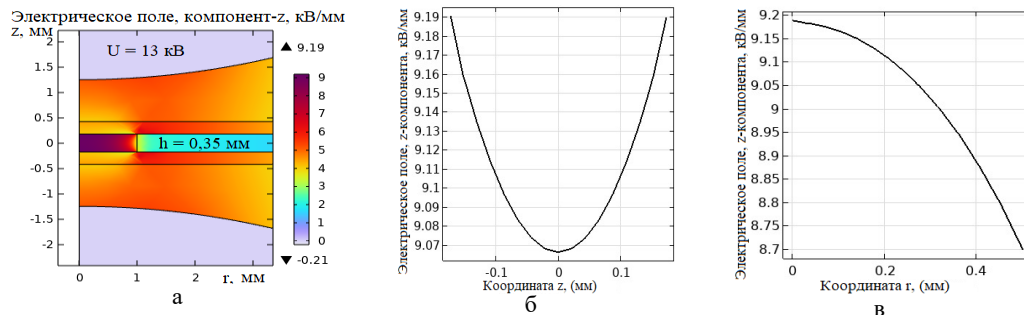


Рис. 2. Распределение E_z компоненты поля: а - между электродами ячейки, б - вдоль оси симметрии z внутри дефекта, в - вдоль горизонтальной плоскости симметрии дефекта ($z = 0$)

Fig.2. Distribution of E_z field components: а - between the electrodes of the cell, б - along the symmetry axis z inside the defect, в - along the horizontal symmetry plane of the defect ($z = 0$)

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Максимальная напряжённость поля будет в точках на оси симметрии на границах воздушный дефект - защитный слой изоляции. Расчёты K_H по (1) были выполнены для образцов с размерами дефектов вдоль поля (h_2) в диапазоне 0,15 – 0,5 мм. После обработки результатов моделирования методом наименьших квадратов была получена формула зависимость коэффициента неоднородности электрического поля внутри дефекта от его размера:

$$K_H = 2,28 - 2,1 \cdot h_2 + 1,5 \cdot h_2^2 \quad (2)$$

где h_2 - размер дефекта вдоль поля в мм (рис. 1).

В целях последующего сравнения напряжённости электрического поля, при которой внутри дефекта происходит ЧР, с напряжённостью поля, при которой происходит сквозной пробой воздушного промежутка в шаровых разрядниках с диаметром 5 см, также были выполнены расчёты K_H для шарового разрядника (ШР) и получена зависимость коэффициента неоднородности от расстояния (S) между шарами при $0 < S < 6$ мм:

$$K_H = 1,0003 + 0,0134 \cdot S. \quad (3)$$

Коэффициент неоднородности поля не зависит от величины приложенного напряжения, а только от конфигурации электродной системы и образца. Проведенные расчёты напряжённости поля при нескольких различных значениях напряжения на высоковольтном электроде показали, что с ростом напряжения максимальная напряжённость увеличивается, но коэффициент неоднородности поля остаётся постоянным и не зависит от величины приложенного напряжения. Знание коэффициента неоднородности поля позволяет при известном расстоянии между электродами определить по (1) напряжённость поля внутри воздушного дефекта по измеренному напряжению на электродах.

Вдоль оси симметрии от краёв к центру дефекта напряжённость убывает (рис. 2, б) и минимальна в центре дефекта. Различие между наибольшей и наименьшей напряжённостью равно 0,12 кВ/мм. В процентах это изменение составляет 1,3%.

При проведении экспериментов образцы могли отклоняться вдоль оси Z от

расположения точно по центру между электродами ячейки. Поскольку поле имеет слабую неоднородность вдоль оси симметрии Z (рис. 2, б), то такое возможное смещение образца приводит к тому, что максимальная напряжённость на нижней и верхней границах дефекта начинает различаться. Максимальное расчётное различие K_n составило 6%, что эквивалентно различию фазы угла возникновения ЧР в положительном и отрицательном полупериодах в 10° . Для предотвращения неопределённости измерения фазы ЧР, вызванного неконтролируемым сдвигом дефекта из центрального положения между электродами, в измерительную ячейку помещалось центрирующее образцы устройство.

Аналогичная ситуация возникает в любой изоляции с неоднородным электрическим полем. Напряжённость поля на границах дефекта, возникшего в такой изоляции, различается, что при отсутствии остающегося объёмного заряда должно привести к различию фаз возникновения ЧР на положительном и отрицательном напряжении.

Измерения частичных разрядов и обсуждение результатов

Измерение ЧР проводилось контактным электрическим методом в испытательной установке промышленной частоты с установкой датчика ЧР (Д) в цепь заземления объекта испытаний. по схеме рис.3

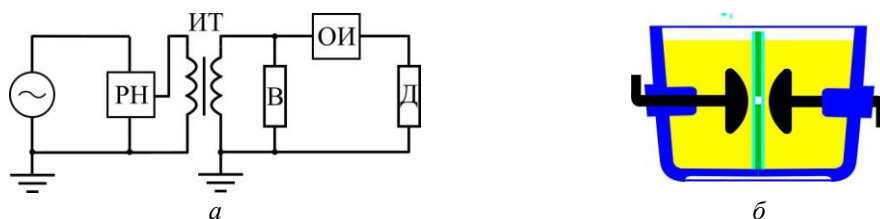


Рис. 3. Схема измерительной установки: а – Fig.3. Measuring device diagram: а – принципиальная схема; б – объект испытания (ОИ) schematic diagram; б - test object

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Напряжение промышленной частоты 220 В подавалось на регулятор напряжения (РН). С РН напряжение подавалось на повышающий испытательный трансформатор (ИТ). Напряжение в высоковольтной части испытательной установки измерялось универсальным делителем напряжения (УДН) с коэффициентом деления 2000, который обозначен на принципиальной схеме рис. 3, а символом «В». Высокое напряжение с ИТ подавалось на объект испытания (ОИ), в цепь заземления которого устанавливался датчик ЧР (Д). В качестве датчика ЧР в работе использовалось активное сопротивление величиной 1 кОм. Напряжение с сопротивления R подавалось по экранированному кабелю на вход двухлучевого цифрового осциллографа TDS-1004. На второй вход осциллографа подавалось напряжение с выхода УДН. Для защиты входных цепей осциллографа параллельно D устанавливался защитный искровой разрядник с напряжением срабатывания 90 В.

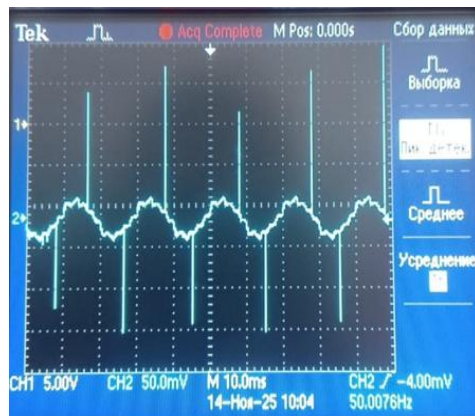
При увеличении напряжения на ячейке внутри газовой поры диэлектрика (рис. 1) возникали ЧР, которые регистрировались по броскам напряжения на датчике D . Типичная картина ЧР показана на рис. 4, а. Напряжение на сопротивлении R пропорционально току в схеме рис. 3. Для определения напряжения на электродах ячейки в момент возникновения ЧР ($U_{чр}$) следует знать величину сдвига между фазой тока и фазой напряжения в схеме рис. 3. Этот сдвиг в нашем случае был равен 90° . Синусоида тока, т. е. напряжения на датчике D , опережала синусоиду напряжения на измерительной ячейке на 90° . Это следовало как из прямого наложения синусоид напряжений с D и УДН на двухлучевом осциллографе, так и из моделирования в программе MultiSim. Напряжение возникновения ЧР ($U_{чр}$) определялась по формуле:

$$U_{чр} = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t_{чр}), \quad (2)$$

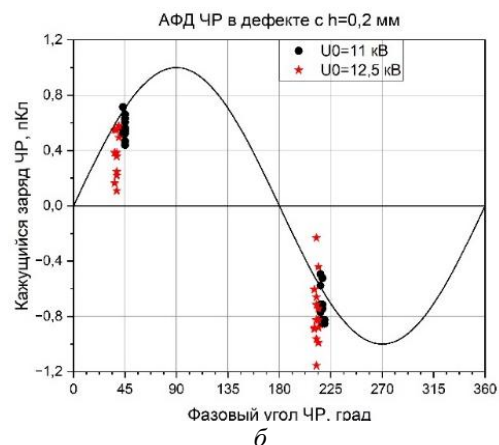
где U_0 – амплитудное значение напряжения на высоковольтном электроде измерительной ячейки, $\omega = 2\pi f \approx 314$ – круговая частота промышленного напряжения 50 Гц, $t_{чр}$ – время от перехода напряжения через 0 на синусоиде напряжения до времени возникновения ЧР. По синусоиде тока (напряжения на датчике D (рис. 4) время $t_{чр}$ следует отсчитывать от максимума синусоиды, поскольку при сдвиге фаз 90° максимум тока соответствует нулю напряжения. Часто вместо времени $t_{чр}$ для обозначения момента возникновения ЧР используют термин фаза ЧР ($\varphi_{чр}$), который равен произведению круговой частоты (ω) на время возникновения ЧР ($t_{чр}$): $\varphi_{чр} = \omega \cdot t_{чр}$ [7-9]. Следует отметить, что термин фаза ЧР связан с величиной напряжения возникновения ЧР $U_{чр}$ только в том случае, когда известна величина амплитудного значения напряжения (U_0) в месте возникновения ЧР.

При регистрации ЧР в режиме мониторинга в большинстве объектов электроэнергетики (турбогенераторы, силовые трансформаторы, кабельные ЛЭП) величина U_0 неизвестна, поскольку положение дефекта в изоляции неизвестно, а значит и понятие фаза не позволяет вычислить напряжение $U_{\text{чр}}$ и мощность ЧР.

При измерениях ЧР в лабораторных условиях такой проблемы не возникает и это позволяет представлять результаты измерений в виде амплитудно-фазовой диаграммы (АФД, *PDPR*). На этой диаграмме положение каждого ЧР определяется фазовым углом, при котором ЧР наблюдается (абсцисса), и величиной кажущегося заряда, зарегистрированного при этом ЧР (ордината). Сам ЧР изображается в виде символа с размерами, характеризующими погрешность измерения по осям. Снимок экрана осциллографа TDS-1004 с сигналом с датчика ЧР (Д) схемы рис. 3а для образца с величиной дефекта вдоль поля $h=0,2$ мм и АФД с ЧР, наблюдавшихся при амплитудных значениях напряжений 11 кВ и 12,5 кВ в этом образце, представлены на рис. 4.



а



б

Рис.4. ЧР в дефекте изоляции: а-снимок экрана осциллографа TDS-1004; б-АФД

Fig. 4. PD in an insulation defect: a-screenshot of the TDS-1004 oscilloscope; b-PRPD

Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author

ЧР, представленных на рисунке 4, происходят при одинаковом по модулю напряжении $U_{\text{чр}}=7,9$ кВ. Для этого типа дефекта с $h=0,2$ мм коэффициент неоднородности поля равен по (2) $K_n=1,92$ и по (1) напряжённость возникновения ЧР равна $E_{\text{чр}}=6,1$ кВ/мм.

Из анализа АФД на рисунке 4, б следует, что ЧР наблюдаются только в 1-ой и 3-ей четверти при одинаковой по модулю фазе возникновения ЧР, то есть в каждом периоде наблюдается 2 ЧР со сдвигом между фазами 180° . Такая «парность» ЧР и периодичность наблюдалась во всех исследованных образцах. При увеличении амплитуды переменного напряжения фаза ЧР уменьшалась.

Частичные разряды имели аperiодическую форму и наблюдались дважды за период. Одни и те же образцы измерялись через различные промежутки времени, в течение которых они находились под приложенным напряжением с числом ЧР 100 ЧР/с. За суммарное время 100 часов под напряжением $10 \div 15$ кВ заметных изменений фазы и амплитуды ЧР не наблюдалось. Регулярное фотографирование дефекта под микроскопом заметных изменений изоляции каверны дефекта (деградации изоляции) не выявили. Различие амплитуд отдельных ЧР не превышало 20% от максимального уровня при времени интегрирования 20 кс.

Для лабораторных условий можно оценить параметры ЧР, которые можно ожидать при нашей геометрии эксперимента. Размеры электродов, расстояние между ними и характеристики дефекта нам известны. Для определения параметров ЧР следует рассчитать ёмкость ячейки до ЧР, после ЧР, бросок напряжения при ЧР на ячейке, общую величину «кажущегося» заряда при ЧР и амплитуду броска напряжения на осциллографе.

Электроды стандартной измерительной ячейки представляют собой секторы сферы радиуса $R=25$ мм с наибольшим радиусом $x_{\text{max}}=18$ мм в плоскости перпендикулярной оси сектора (рис.5а).

Наибольший угол α между осью сектора и направляющей центрального конуса, опирающейся на этот сектор составляет $\alpha = \arcsin(x_{\text{max}}/R)=0,804$ рад ($39,7^\circ$), а расстояние по поверхности электрода до наиболее удалённой от оси симметрии точки будет $l_3=0,8 \cdot R=20$ мм. Наибольший телесный угол Ω такого конуса в стерadianах равен двойному углу $2 \cdot \alpha$ в радианах, т.е. $\Omega_{\text{max}}=1,608$ ср. Площадь поверхности электрода S равна

$S = \Omega_{max} \cdot R^2 = 1005 \text{ мм}^2$. Наименьшее расстояние между электродами $d_{min}=2,5 \text{ мм}$. Наибольшее – $d_{max} = 22,5 \text{ мм}$. Расчёт ёмкости ячейки (C_{cell}) будем производить по формуле плоского конденсатора (3) с разбиением всей площади электрода на отдельные кольца площадью S_i , а за расстояние между такими кольцами (d_i) принимать расстояние между серединами колец (рис.5б). Для ячейки с маслом без образца формула для расчёта ёмкости имеет вид:

$$C_{cell} = \varepsilon_0 \varepsilon \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{d_i}, \quad (3)$$

где $S_i = (\Omega_i - \Omega_{i-1}) \cdot R^2$, $\Omega_i = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{x_i}{R}\right)$, $dx = \frac{x_{max}}{n}$, $x_i = dx \cdot i$

$$d_i = d_{min} + 2 \cdot z_i, \quad z_i = \sqrt{R^2 - (dx \cdot (i - 0,5))^2}.$$

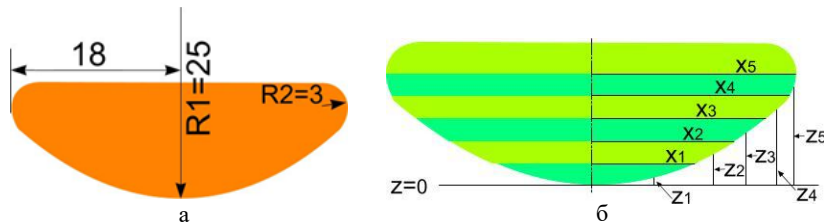


Рис.5. Форма электрода ячейки (а) и разбиение на кольца(б)

Fig.5. Shape of the cell electrode (a) and division into rings (b)

*Источник: составлено авторами. Source: compiled by the author

Для расчёта ёмкости ячейки с образцом можно применить принцип единственности решения уравнения Лапласа, из которого следует возможность замены эквипотенциальных поверхностей тонкими проводящими листами [10]. Тогда ячейку с образцом можно представить в виде пяти последовательно соединённых ёмкостей: 1-ёмкость системы электрод ВН-верхняя поверхность защитной плёнки образца; 2-ёмкость защитной плёнки; 3-ёмкость слоя изоляции, в которой создаётся дефект; 4-ёмкость защитной плёнки; 5-ёмкость системы заземлённый электрод – поверхность защитной плёнки. При расчёте общей ёмкости ячейки с образцом ёмкости 1 и 5, а также 2 и 4 попарно равны. Для суммы ёмкостей 1 и 5 в (3) $d_{min}=2,5 \text{ мм}$ – $(2 \cdot h_1 + h_2)$ (рис.1а), $\varepsilon=2,5$ для трансформаторного масла. Для ёмкостей 2, 3 и 4: $S_i=65 \cdot 65=4225 \text{ мм}^2$, $\varepsilon_2=\varepsilon_4=2,2$; $\varepsilon_3=6,1$; $d_i=h_1$, h_2 и h_1 , соответственно. Результаты расчёта ёмкостей ячейки с образцом и без образца при различном числе колец представлен в таблице 1.

Таблица
Table

Ёмкость измерительной ячейки (C_{cell})
Measuring cell capacity (C_{cell})

Число колец, n	1	5	10	20
C_{cell} с маслом и с образцом, пФ	4,3	5,26	5,255	5,253
C_{cell} с маслом без образца, пФ	3,8	4,22	4,215	4,213

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the author

При повышении напряжения между электродами ячейки возрастает напряжённость электрического поля внутри дефекта. При достижении некоторого критического значения в воздушной полости дефекта возникают условия самостоятельного газового разряда. Разряд имеет лавинный характер и состоит из двух ступеней. Первая ступень – лавинный разряд между гранями каверны с различным потенциалом вдоль силовых линий электрического поля и накопление электронов около поверхности границы воздух-диэлектрик. По мере роста числа электронов увеличивается напряжённость электрического поля, создаваемая этими электронами как вдоль, так и перпендикулярно приложенному внешнему полю от электродов ячейки. При превышении перпендикулярной составляющей поля электронных лавин критической величины начинается разряд вдоль поверхности раздела воздух – диэлектрик. Процесс продолжается до тех пор, пока суммарное поле электронов, распределённых в воздухе у границ дефекта, не становится равным и противоположным по знаку внешнему полю. Поле внутри дефекта становится равным нулю, что эквивалентно исчезновению ёмкости дефекта. Для расчёта ёмкости столбика изоляции, содержащего воздушный дефект до и после ЧР, можно применить формулы (3) с площадью обкладок $S_i=3,14 \text{ мм}^2$ – равной

площади основания цилиндрического дефекта. Если ввести обозначения Ёмкости столбика с дефектом до ЧР после ЧР и их разности - $C_{до}^{ст}$, $C_{после}^{ст}$, $dC^{ст}$, соответственно, то для дефекта с $h_2=0,35$ мм, $h_1=0,25$ мм - $C_{до}^{ст} = 22,57$ фФ, $C_{после}^{ст} = 31,53$ фФ, $dC^{ст}=9$ фФ. Если источник питания не успевает изменить заряд на ячейке за время ЧР, то можно считать, что заряд на обкладках конденсатора до и после ЧР одинаков. Тогда, для столбика с объектом

$$U_{чр} \cdot C_{до}^{ст} = (U_{чр} + dU^{ст}) \cdot C_{после}^{ст}, \quad dU^{ст} = -U_{чр} \cdot \frac{dC^{ст}}{C_{после}^{ст}} = -2,6 \text{ кВ}. \quad (4)$$

Длительность переднего фронта ЧР определяется как сумма времени прохождения лавины электронов вдоль силовой линии между гранями дефекта и времени движение лавин вдоль «анодной» грани дефекта в перпендикулярной к вектору напряжённости электрического поля плоскости. При подвижности электронов $\mu=0,045 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и напряжённости поля в момент ЧР $E_{чр}=6,1 \text{ кВ/мм}$ дрейфовая скорость лавины будет равна $V_{др} = \mu \cdot E_{чр} = 0,045 \cdot 6,1 \cdot 10^6 = 274500 \text{ м/с} = 0,28 \text{ мм/нс}$. Тогда длительность переднего фронта можно оценить, как время, равное $\sim 2 \div 5 \text{ нс}$.

Возникающий на столбике отрицательный импульс напряжения распространяется от места возникновения в центре электродов на всю их поверхность электрода со скоростью $v \sim 300 \text{ мм/нс}$. Через время $t = l_3 / v = 20 \text{ мм} / 300 \text{ мм/нс} = 0,067 \text{ нс}$. Из такого времени, малого по сравнению с длительностью переднего фронта ЧР, следует, что понижение напряжения при ЧР происходит на электродах ячейки (dU_{cell}). В этом случае из инвариантности заряда следует:

$$U_{чр} \cdot (C_{cell} + C_{до}^{ст}) = (U_{чр} + dU_{cell}) \cdot (C_{cell} + C_{после}^{ст}), \quad dU_{cell} = -U_{чр} \cdot \frac{dC^{ст}}{C_{cell}}. \quad (5)$$

Произведение $dU_{cell} \cdot C_{cell} = q_{чр} = U_{чр} \cdot dC^{ст}$ называется «кажущимся» зарядом ЧР.

Ожидаемый бросок напряжения за время переднего фронта ЧР при $U_{чр}=8,6 \text{ кВ}$ будет равен $dU_{cell} = -8,6 \text{ кВ} \cdot 0,009 \text{ пФ} / 5,25 \text{ пФ} = -14,7 \text{ В}$. Эта величина уменьшения разности потенциалов между электродами измерительной ячейки при ЧР получена без учёта влияния источника питания. Кажущийся заряд равен $q_{чр} = U_{чр} \cdot dC^{ст} = 45 \text{ пКл}$.

Учёт источника питания приводит к тому, что в момент ЧР следует учитывать переходной процесс изменения напряжения на ячейке, происходящий между состояниями до ЧР и после ЧР. За время переднего фронта изменение напряжение на испытательном трансформаторе не превышает $0,1 \text{ В}$, т.е. его изменением можно пренебречь и принять за напряжение установившегося режима постоянное напряжение $U_{чр}$. За начальное напряжение переходного процесса можно принять напряжение $U_{чр} - dU_{cell}$. Амплитуда броска напряжения в этом процессе равна dU_{cell} , а характер процесса зависит от параметров элементов схемы рис.4. За индуктивность в цепи присоединения измерительной ячейки к ИТ можно принять индуктивность высоковольтного провода от ИТ до ячейки. Его длина равна $1,5 \text{ м}$ и индуктивность $L = 2 \text{ мкГн}$. $R = 1 \text{ кОм}$ и $C = 5,25 \text{ пФ}$. При таких значениях переходной процесс будет иметь вид [11,12]:

$$U(t) = U_{чр} - dU_{cell} \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta) \cdot \exp(-\beta \cdot t), \quad (6)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$, $\omega_0 = 1/\sqrt{L \cdot C}$, $\beta = R/(2 \cdot L)$. $\theta = \arctan\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)$

Уравнение (6), описывающее колебательный переходной процесс, справедливо при условии $\omega_0 > \beta$, т.е. $\frac{R}{2\sqrt{L/C}} < 1$. Для схемы (рис.3) это соответствует условию $L > 1,3 \text{ мкГн}$.

Это условие для наших экспериментов выполняется. Вид изменения напряжения между электродами ячейки, полученный по (6) при различных значениях индуктивности L представлен на рисунке 6.

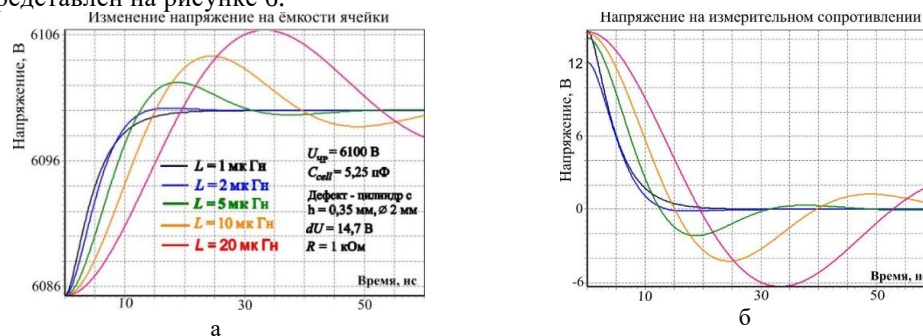


Рис.6. Зависимость напряжения (а) на ячейке и сопротивления (б) при ЧР от времени

Fig. 6. Dependence of cell voltage (a) and resistance (b) during partial discharge on time

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the author

Экспериментально наблюдаемые ЧР (рис.4) можно отнести к переходному процессу с параметрами $\omega_0 \sim \beta$, что подтверждается расчётами по (6). Из рис.6 видно, что амплитуда напряжения на сопротивлении R равна амплитуде броска напряжения на ячейке (dU_{cell}). Измеряя падение напряжения на сопротивлении в цепи заземления или измеряя бросок тока в этой цепи, мы фактически измеряем бросок напряжения при ЧР на измерительной ячейке. Произведение этого броска на ёмкость объекта даёт величину кажущегося заряда, который является одной из двух основных характеристик одиночного ЧР. Из представленных на рис.6б расчётных функций переходного процесса при ЧР можно сделать вывод, что форма напряжения зависит от плохо контролируемой величины – индуктивности в цепи между объектом измерения и источником питания. Для измерения этой величины в цифровом виде на подъёме (спаде) нужно измерить минимум 4 значения напряжения, т.е. при приходе импульса ЧР частота дискретизации должно быть порядка 500 МГц. На рис.4 представлен 1 экран осциллографа. На экране представлен временной интервал 100 мс, состоящий из 5000 тысяч выборок, т.е. время накопления (усреднения) напряжения составляет 20 мкс. При таком времени интегрирования, амплитуде импульса 15 В и длительности первого полупериода колебаний ~ 15 нс на экране осциллографа он должен иметь амплитуду ~ 150 мВ, что и наблюдается. Все вышеописанные оценки сделаны в предположении мгновенного пробоя газового промежутка дефекта и нулевом времени перехода объекта из состояния «до ЧР» в состояние «после ЧР». Как упоминалось выше, это время определяется временем лавинообразного нарастания числа свободных электронов в каверне и их распределением в газовой среде вблизи «анодной» грани дефекта до создания нулевого электрического поля внутри полости. Длительность переднего фронта импульса ЧР для нашего случая можно оценить в ~ 1 -3 нс. Наблюдаемая в эксперименте форма импульса ЧР состоит из апериодической составляющей, в которой содержится информация о размерах дефекта, и колебательной составляющей, характеризующей объект испытаний, а не дефект изоляции.

Одним из дискуссионных вопросов при интерпретации ЧР является вопрос об остаточном заряде в объёме каверны дефекта, который может оставаться после предыдущего разряда [13]. Если за время спада напряжения промышленной частоты до нуля и последующего нарастания до пробивного напряжения электрическое поле объёмного заряда уменьшится за счёт рекомбинации электронов и ионов так, что станет существенно меньше внешнего поля, то каждый последующий ЧР должен происходить при одинаковом по модулю напряжении. В этом случае между размером каверны по полю и напряжённостью возникновения ЧП существует однозначная связь и по величине $U_{чр}$ можно оценить размер каверны дефекта вдоль поля, что представляется важным при оценке состояния изоляции. При измерении ЧР в объектах электроэнергетики иногда наблюдаются ЧР, происходящие в нулевом электрическом поле или при напряжениях, недостаточных для возникновения самостоятельного разряда [14,15,16]. Для объяснения этих наблюдений была высказана гипотеза остаточного заряда. Согласно этой гипотезе, заряженные частицы (электроны и ионы) после ЧР не успевают рекомбинировать и в каверне дефекта остаётся объёмный заряд, который влияет на последующие ЧР в этой каверне. При смене знака напряжения промышленной частоты этот заряд создаёт внутреннее электрическое поле, которое складывается с внешним полем. В результате последующие ЧР происходят при различных значениях внешнего напряжения. Связь $U_{чр} - E_{чр}$ внутри каверны дефекта – размер дефекта вдоль поля оказывается нарушена случайным остаточным зарядом. Оценить размер дефекта по величине $U_{чр}$, если справедлива гипотеза остаточного заряда, невозможно, вследствие неопределённости величины этого заряда. В работе [17] было предложено другое объяснение возникновения ЧР при малых величинах внешнего поля без привлечения концепции остаточного заряда. Было предположено, что остаточный заряд в каверне равен нулю, а ЧР могут приходить на датчики из других фаз. Учет такого возможного междофазного перехода ЧР позволил авторам объяснить происхождение всех ЧР без привлечения концепции остаточного заряда. В наших экспериментах ЧР происходят в одном дефекте одной фазы. Типичная картина АФД ЧР в газовом дефекте представлена на рис. 4, б. Наблюдение ЧР при одном и том же по модулю напряжении в положительном и отрицательном полупериодах доказывают, что если на поверхности дефекта нет значительных проводящих образований, то на частоте 50 Гц в таких дефектах остаточный объёмный заряд можно не учитывать при анализе результатов измерений ЧР. Неизменный характер ЧР (рис. 4) от газового дефекта в изоляции в течении продолжительного периода позволяет сформулировать следующий критерий разделения ЧР от внешних посторонних шумов,

которые могут быть зарегистрированы датчиками системы мониторинга. Число частичных разрядов должно быть кратно близко к 100 и не должно существенно изменяться в течение суток.

Заключение (Conclusions)

На основании проведённых измерений было установлено, что в дефектах без следов обугливания ЧР происходят только дважды за период напряжения промышленной частоты в 1ой и 3ей четверти синусоиды при одинаковом по модулю напряжении. Из этого экспериментального факта следует, что в таких дефектах на частоте 50% электроны и ионы, образующие объёмный заряд в каверне дефекта после ЧР, успевают нейтрализоваться и не оказывают заметного воздействия на последующий ЧР. Для практики интерпретации ЧР в объектах электроэнергетики из этих результатов следуют учитывать, что:

- ЧР от газовых дефектов, возникших в той же фазе, в которой установлен датчик, могут происходить **только** в диапазоне фазовых углов $\varphi_{min} \div 90^\circ$ в 1й четверти и $180^\circ + \varphi_{min} \div 270^\circ$ в 3й четверти. Значение угла φ_{min} индивидуально для каждого типа оборудования:

- в изоляции с однородным полем каждому ЧР, возникшему в каверне с газовым дефектом, должен найтись второй ЧР с фазовым углом, отличающимся от угла первого ЧР на 180° с учётом погрешность измерения фазового угла. В изоляции с неоднородным полем различие фазовых углов уменьшается и ЧР в 3й четверти происходит при меньшем по модулю напряжении, чем в 1й четверти:

- число ЧР, возникающих в одном газовом дефекте изоляции без металлических включений в поверхности, равно 100 ЧР за секунду и относительно медленно изменяется во времени.

Установление о связи напряжённости возникновения ЧР с размером дефектов является следующим этапом данной работы

Литература

1. Коробейников С.М., Овсянников А.Г. Физические механизмы частичных разрядов: монография – 2-е изд., испр. // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. - 266 с.
2. Ilias H.A. Measurement and Simulation of Partial Discharges within a Spherical Cavity in a Solid Dielectric Material, Abstract // Southampton: University of Southampton, 2011. – 213 с. <http://eprints.soton.ac.uk>.
3. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. // Екатеринбург: УрГУПС, 2011. - 370 с. — ISBN: 978-5-94614-177-2.
4. Александров А.Ф. Ионизация воздуха в околоритическом электрическом поле / Александров А.Ф., Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И., Ломтева А.Ю. // Журнал технической физики, 2006. Т.76, в.3, с.38-43.
5. A Review of Recent Advances of Dielectric Barrier Discharge Plasma in Catalysis./ Ju Li at all // Nanomaterials 2019, 9(10), 1428; <https://doi.org/10.3390/nano9101428>.
6. Baboraik A.M., Usachev A.E., Ziad M.Ali A. New Proposed Method for Interpretation On line Partial Discharge Measurements Data of Turbine Generator. // Journal of Electrical Engineering & Technology 2020, 15, pp.1301–1311.
7. Ньетерейе Ф., Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Кубарев А.Ю. Измерительная ячейка для изучения характеристик частичных разрядов в газовых дефектах изоляции. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025; 27(3):14-22. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-3-14-22>.
8. Wang, H., et al.: Partial discharge measurement and analysis under lightning impulse superimposed DC voltage in SF6 gas. High Volt. 7(4), 744–752 (2022)
9. Streamers in transformer oil initiated by partial discharge in a bubble at low AC electric fields / S. M. Korobeynikov, A. V. Ridel, A. G. Ovsyannikov, D. I. Karpov, M. N. Lyutikova, V. A. Loman, R. A. Savenko. – DOI 10.1007/s00202-024-02359 // Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 106, iss. 4. – P. 5219–5228.
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. – Изд. 7-е, испр.// М.: Наука, 1988. - 512 с.
11. C Yang at all. Research on transient simulation of partial discharge based on differential-algebraic equation approach. // J. Phys.: Conf. Ser. 3110 (2025) 012008/ pp.1-6.-doi:10.1088/1742-6596/3110/1/012008.
12. Петренко Ю.В. Теоретические основы электротехники. Переходные процессы в линейных электрических цепях. // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. - 84 с.
13. Pattanadech N. et al. Partial Discharges (PD): Detection, Identification and

Localization. – John Wiley & Sons, 2023.

14. G Wu, T Zhang, B Cao, K Liu, K Chen...A review and progress of insulation fault diagnosis for cable using partial discharge approach.// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2025. (том: 32 , выпуск: 3 , июнь 2025 г.) pp.1639-1652. DOI: 10.1109/TDEI.2024.3524332.

15. LT Thobejane, BA Thango. Partial discharge source classification in power transformers: A systematic literature review. // Appl. Sci. 2024 , 14 (14), 6097; <https://doi.org/10.3390/app14146097>.

16 C. Staubach, S. Reddig and P. Zander, "Practical Experience with PD-Localization in Rotating Machines," 2024 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika), Pilsen, Czech Republic, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/Diagnostika61830.2024.10693883.

17. Бораик А.М., Усачев А.Е., Ильдарханов Р.Г., Кубарев А.Ю. НОВАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ И ПОЛОЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ В НИХ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2018;20(1-2):41-53. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-41-53>.

Авторы публикации

Ньетерейе Фредерик – аспирант Казанского государственного энергетического университета. Email: nyetereyefrederic@gmail.com.

Усачев Александр Евгеньевич – д.ф.-м.н. профессор, профессор кафедры «Электрические станции им. Шибанова В.К.» Казанского государственного энергетического университета. Email: aleksandr_usachev@rambler.ru.

Бобоев Шухрат Абдусаломович – ассистент кафедры «Электрические станции им. Шибанова В.К.» Казанского государственного энергетического университета. Email: shuhrar1004@mail.ru.

Кубарев Артём Юрьевич – кан. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электрические станции им. Шибанова В.К.» Казанского государственного энергетического университета. Email: artemkubarev@yandex.ru.

References

1. Korobeynikov S.M., Ovsyannikov A.G. Physical mechanisms of partial discharges: monograph – 2nd ed., corr. // Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2022. - 266 p.

2. Illias H.A. Measurement and Simulation of Partial Discharges within a Spherical Cavity in a Solid Dielectric Material, Abstract // Southampton: University of Southampton, 2011. – 213 p. <http://eprints.soton.ac.uk>

3. Rusov V.A. Measurement of partial discharges in insulation of high-voltage equipment. / Yekaterinburg: UrGUPS, 2011. - 370 p. — ISBN: 978-5-94614-177-2.

4. Alexandrov A.F. Ionization of air in a near-critical electric field / Alexandrov A.F., Bychkov V.L., Grachev L.P., Yesakov I.I., Lomteva A.Yu. // Journal of Technical Physics, 2006. Vol.76, v.3, pp.38-43.

5. A Review of Recent Advances of Dielectric Barrier Discharge Plasma in Catalysis./ Ju Li at all // Nanomaterials 2019, 9(10), 1428; <https://doi.org/10.3390/nano9101428> .

6. Baboraik A.M., Usachev A.E., Ziad M.Ali A. New Proposed Method for Interpretation On line Partial Discharge Measurements Data of Turbine Generator. // Journal of Electrical Engineering & Technology 2020, 15, pp.1301-1311.

7. Nyetereye F., Usachev A.E., Boboev Sh.A., Kubarev A.Yu. Measuring cell for studying the characteristics of partial discharges in gas defects of insulation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025;27(3):14-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-3-14-22>.

8. Wang, H., et al.: Partial discharge measurement and analysis under lightning impulse superimposed DC voltage in SF6 gas. High Volt. 7(4), 744–752 (2022)

9. Streamers in transformer oil initiated by partial discharge in a bubble at low AC electric fields / S. M. Korobeynikov, A. V. Ridel, A. G. Ovsyannikov, D. I. Karpov, M. N. Lyutikova, V. A. Loman, R. A. Savenko. – DOI 10.1007/s00202-024-02359 // Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 106, iss. 4. – P. 5219-5228.

10. Landau L. D., Lifshits E. M. Field theory. – 7th ed., Spanish// M.: Nauka, 1988. 512 p.
11. C Yang at all. Research on transient simulation of partial discharge based on differential-algebraic equation approach. // J. Phys.: Conf. Ser. 3110 (2025) 012008/ pp.1-6.-doi:10.1088/1742-6596/3110/1/012008.
12. Petrenko Yu.V. Theoretical foundations of electrical engineering. Transients in linear electrical circuits. / Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2016. 84 p.
13. Pattanadech N. et al. Partial Discharges (PD): Detection, Identification and Localization. – John Wiley & Sons, 2023.
14. G Wu, T Zhang, B Cao, K Liu, K Chen...A review and progress of insulation fault diagnosis for cable using partial discharge approach.// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2025. (Volume: 32 , issue: 3 , June 2025) pp.1639-1652. DOI: 10.1109/TDEI.2024.3524332.
15. LT Thobejane, BA Thango. Partial discharge source classification in power transformers: A systematic literature review. // Appl. Sci. 2024 , 14 (14), 6097; https://doi.org/10.3390/app14146097.
- 16 C. Staubach, S. Reddig and P. Zander, "Practical Experience with PD-Localization in Rotating Machines," 2024 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics), Pilsen, Czech Republic, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/Diagnostics61830.2024.10693883.
17. Baboraik A.M., Usachev A.E., Ildarkhanov R.G., Kubarev A.Y. NEW METHOD OF DETERMINING SIZE AND PROVISION OF DEFECTS IN THE INSULATION OF WINDINGS OF STATOR OF TURBOGENERATORS AT MEASUREMENT OF PARTIAL DISCHARGES IN THEM. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(1-2):41-53. (In Russ.) https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-41-53.

Authors of the publication

Nyetereye Frederik – Kazan State Power Engineering University.

Alexander E. Usachev – Kazan State Power Engineering University.

Shukhrat A. Boboev – Kazan State Power Engineering University.

Artyom Y. Kubarev – Kazan State Power Engineering University.

Шифр научной специальности: 2.4.3. Электроэнергетика

Получено 19.01.2026 г.

Отредактировано 15.04.2026 г.

Принято 11.06.2026 г.