



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ГАЗОВЫХ ДЕФЕКТАХ ИЗОЛЯЦИИ

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

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

aleksandr_usachev@rambler.ru, shuhrar1004@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в расчёте конструкции ячейки для измерения характеристик частичных разрядов (ЧР), возникающих в газовых дефектах внутри твёрдой изоляции. Размеры и объём газовых включений в изоляцию связаны с характеристиками ЧР, которые в этих дефектах происходят. Знание деталей этой связи для дефектов различных размеров и форм необходимо для правильной диагностики состояния изоляции аппаратов высоких напряжений и определения их остаточного ресурса. Эта связь в настоящее время изучена в недостаточной степени. Задача изучения ЧР осложняется их малой величиной и сложностью отделения ЧР в газовых дефектах от поверхностных, коронных ЧР и посторонних случайных шумов, имеющих подобный спектр. ЦЕЛЬ работы состоит в создании экспериментальной установки с измерительной ячейкой, в которой нет коронных и поверхностных ЧР, которые осложняют получение достоверных результатов при измерении ЧР в газовых порах диэлектрика. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся расчет напряжённости электрического поля в различных конструкциях ячейки методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics 6.2. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, приведены результаты расчёта распределения электрических полей при различной конфигурации высоковольтных электродов рассмотрены, результаты измерения ЧР в контрольных (бездефектных) образцах и образцах с дефектами. Доказано, что в предлагаемой конструкции ячейки отсутствуют поверхностные и коронные ЧР на электродах, что позволяет изучать характеристики ЧР в газовых дефектах изоляции. Установлено, что ЧР в газовом дефекте происходят в первой и третьей части каждого периода синусоиды промышленной частоты при одинаковой разности потенциалов между электродами. Сдвига напряжения возникновения ЧР, который предсказывался из-за предполагаемого остаточного заряда на стенках каверны, не обнаружено.

Ключевые слова: частичный разряд, дефекты изоляции, измерительная ячейка, напряжённость возникновения ЧР, диагностика изоляции.

Для цитирования: 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. Т. 27. № 3. С. 14 - 22. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-14-22.

MEASURING CELL FOR STUDYING THE CHARACTERISTICS OF PARTIAL DISCHARGES IN GAS DEFECTS OF INSULATION

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

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

aleksandr_usachev@rambler.ru, shuhrar1004@mail.ru

Abstract: The ACTUALITY of the study is to calculate the design of a cell to measure the characteristics of partial discharges (PD) occurring in gas defects within solid insulation. The size and volume of gas inclusions in the insulation are related to the PD characteristics that occur in these defects. Knowledge of the details of this relationship for defects of various sizes and shapes is necessary for proper diagnosis of the insulation condition of high voltage apparatuses and determination of their residual life. This connection is currently studied to an insufficient extent. The task of studying PDs is complicated by their small magnitude and the difficulty of separating PDs in gas defects from surface, corona PDs and extraneous random noises having a similar

spectrum. OBJECTIVE of the work is to create an experimental setup with a measuring cell in which there are no corona and surface PDs, which complicate obtaining reliable results when measuring PDs in gas pores of a dielectric. METHODS. The calculation of the electric field strength in various cell designs by the finite element method in the ComSol-Multiphysics 6.0 program was used to solve the problem. RESULTS. The paper describes the relevance of the topic, presents the results of calculation of electric field distribution at different configurations of high-voltage electrodes, the results of PD measurements in control (defect-free) samples and samples with defects. It is proved that in the proposed design of the cell there are no surface and corona PDs on the electrodes, which allows us to study the characteristics of PDs in gas defects of insulation. It is established that PDs in a gas defect occur in the first and third parts of each period of a sinusoid of industrial frequency at the same potential difference between the electrodes. No shift of the PD occurrence voltage, which was predicted due to the assumed residual charge on the cavern walls, was found.

Keywords: *partial discharge; insulation defects; measuring cell; PD occurrence voltage; insulation diagnostics.*

For citation: 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. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-14-22.

Введение (Introduction)

В настоящее время общепризнанно считается, что основной причиной ухудшения свойств изоляции являются частичные разряды (ЧР). Регистрация характеристик частичных разрядов позволяет оценивать состояние изоляции высоковольтных аппаратов и выявлять местные дефекты, которые практически невозможно определить стандартными высоковольтными испытаниями или измерениями каких-либо интегральных характеристик изоляции (тангенс угла диэлектрических потерь, сопротивление изоляции и др.) [1,2]. Условия наблюдения ЧР в высоковольтных лабораториях и в различных объектах электроэнергетики при их эксплуатации существенно различаются [3,4]. Для каждого типа высоковольтного оборудования следует учитывать эти различия и вносить изменения в изначальную модель ЧР [5-7]. Основные измеряемые характеристики одиночного ЧР – амплитуда броска напряжения (тока) и мгновенное значение напряжения, при котором он происходит, существенно искажаются в условиях измерений под нагрузкой [8]. Так при измерении ЧР в работающих турбогенераторах (ТГ) амплитуда ЧР снижается из-за влияния электродвижущей силы (ЭДС) ТГ, а напряжение возникновения невозможно определить из измерений фазы ЧР вследствие различия напряжения в различных частях ТГ и неопределённости места возникновения ЧР [9,10]. Одним из основных представлений результатов регистрации ЧР является амплитудно–фазовое представление [1,2]. В лабораторных условиях это представление хорошо отображает распределение ЧР, поскольку в большинстве случаев исследуется только один дефект круглой или эллипсоидальной формы. Так в серии работ [11,12] исследовалась связь между характеристиками ЧР и размером дефекта. В обзорных работах [13,14] приводятся результаты многочисленных экспериментальных и теоретических исследований условий возникновения разрядов в газовых промежутках при атмосферном давлении. При измерении ЧР в работающем трёхфазном оборудовании высокого напряжения (силовых трансформаторах, кабелях, синхронных генераторах и т.п.) возникает проблема множества ЧР [15,16]. На аппаратном уровне трудно разделить ЧР, происходящие в обследуемом аппарате, от ЧР, возникающих в других устройствах и приходящих по линиям на датчики. Отделить ЧР, возникающие в различных фазах одного и того же аппарата, также не простая задача. В результате такого не учёта регистрируемая напряжённость возникновения ЧР оказывается ниже необходимой для существования самостоятельного разряда, т.е. ЧР при такой напряжённости происходить не может [8]. Для объяснения этого противоречия используется предположение об остаточном заряде, который «оседает» на стенках каверны, подобно краске в технологиях электроокраски, что в свою очередь, противоречит принципу запрета Паули. Число повреждений полимерных цепей на границе диэлектрической каверны объёмом 1 мм³ не превышает нескольких тысяч, что явно недостаточно для объяснения наблюдений ЧР при малых значениях напряжённости электрического поля. В Цель исследования заключается в создании измерительной ячейки, в которой могут наблюдаться только ЧР от внутренних

дефектов изоляции. Научная значимость исследования состоит в том, что такая ячейка позволяет надёжно установить связь между характеристиками ЧР и размерами дефектов изоляции. Практическая значимость исследования заключается в том, что результаты исследований позволят повысить достоверность и предсказательную способность диагностики изоляции методом ЧР.

Материалы и методы (Materials and methods)

Схема испытательной установки для измерения характеристик ЧР в газовых порах изоляции показана на рисунке 1. Источником регулируемого по величине высокого напряжения (ВН) являлся аппарат АИИ-70. Высоковольтный испытательный трансформатор (ИТ) аппарата устанавливался отдельно от его корпуса внутри заземлённого ограждения установки для уменьшения длины проводников ВН между ИТ и объектом испытаний. Объектом испытаний являлись образцы изоляции с внутренними газовыми дефектами различной формы и размеров. Для контроля принадлежности ЧР к разрядам внутри воздушных дефектов изоляции проводилось сравнение измерений с образцами изоляции, в которых дефектов нет. Образцы изоляции помещались в измерительную ячейку, которая устанавливалась в центр заземлённого металлического бака со сторонами 0,8 м. Без заземлённого металлического бака (клетки Фарадея) регистрировались импульсы подобные ЧР даже при нулевом напряжении на электроде ВН. Одним из источников таких наведённых импульсов оказался блок питания компьютера в системе регистрации ЧР.

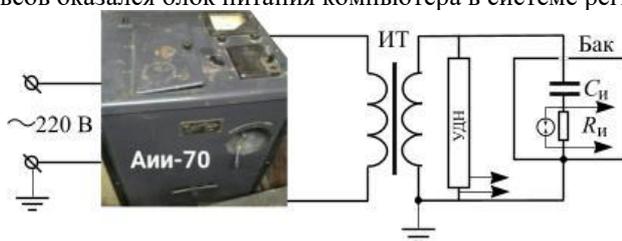


Рис. 1. Схема испытательной установки

Fig. 1. Electrical diagram of the test-system configuration

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

Испытательная ячейка являлась, по сути, конденсатором (C_n), между обкладками которого помещался изолятор с дефектом внутри. Размеры дефекта цилиндрической формы в направлении вдоль силовых линий электрического поля (высота цилиндра) изменялись от 0,3 до 1,2 мм, а его диаметр от 0,5 до 8 мм. Для контроля чистоты эксперимента имелся образец изоляции без дефекта.

Первоначально ячейка собиралась с твёрдой изоляцией с двумя металлическими круглыми электродами с диаметром 25, 40, 50 и 60 мм. На один электрод через проходной изолятор подавалось ВН, а второй заземлялся через измерительное сопротивление (R_n). Наибольшее значение R_n должно быть таким, чтобы произведение $C_n \cdot R_n$ было много меньше, чем 5 мс (время подъёма напряжения при частоте 50 Гц. При $C_n \sim 50$ нФ R_n должно быть меньше 50 кОм, чтобы напряжение на C_n совпадало по фазе с напряжением источника, а сдвиг между током и напряжением был 90° . Такая величина R_n позволяла измерение напряжения возникновения ЧР производить непосредственно по осциллограмме тока (напряжения на R_n). Параллельно измерительному сопротивлению R_n устанавливался быстродействующий искровой разрядник с напряжением срабатывания 90 В для защиты осциллографа от сквозного или поверхностного пробоя изоляции между электродами ячейки. Для снижения вероятности поверхностного пробоя длина пути утечки выбиралась равной 30 см. Напряжение с измерительного сопротивления подавалось по экранированному кабелю на один из входов двухканального цифрового осциллографа TDS 1002B. На другой вход подавалось напряжение с универсального делителя напряжения (УДН). Максимальная частота выборки осциллографа составляла 2 измерения за наносекунду, что в режиме запуска развёртки осциллографа по пришедшему импульсу позволяет записать структуру одиночного ЧР. Перед началом измерений:

- регистрировалось давление и температура в высоковольтной лаборатории;
- выполнялось фотографирование под микроскопом с кратностью увеличения 1500 поверхности внутреннего дефекта;
- измерялось пробивное напряжение трансформаторного масла;
- измерялось напряжение возникновения ЧР в ячейке с образцом изоляции без дефектов.

Для каждого образца изоляции с внутренним дефектом записывалось время начала и окончания воздействия ВН, а после окончания измерений производился контроль состояния поверхности дефекта (фотографирование под микроскопом).

Распределение электрического поля внутри бака с измерительной ячейкой рассчитывалось методом конечных элементов в программе *ComSol-Multiphysics*. Электродные системы в нашей ячейке имели осевую симметрию C_∞ , что позволяло перейти от расчёта пространственного распределения поля (3D- модель) к расчёту распределения поля в плоскости, проходящей через ось симметрии (2D *axial*- модель). Поскольку передний фронт (лавинная стадия) ЧР длится наносекунды и за это время напряжение промышленной частоты 50 Гц практически не изменяется, то расчёт напряжённости можно проводить в электростатическом приближении (модели) при постоянном напряжении на электродах.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

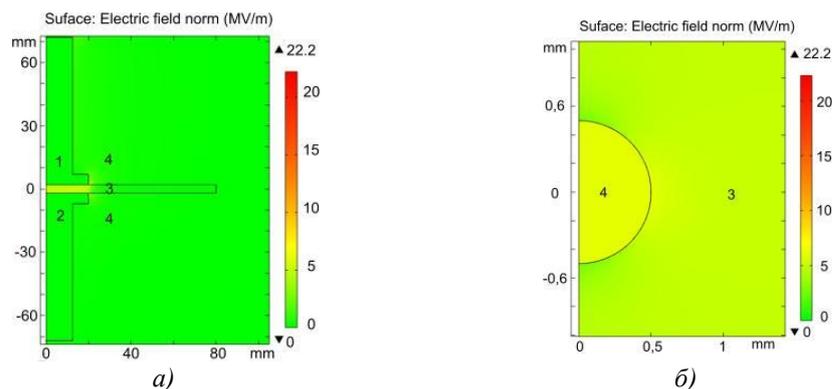
1. Тип ячейки - «сухая» ячейка – измерительная ячейка с электродами цилиндрической формы. Образцы изоляции с дефектом и контрольные образцы изоляции без дефекта вставляются между электродами и плотно прижимаются.

Распределение напряжённости электрического поля в измерительной ячейке с различными электродами круглой формы, рассчитанные в стационарной двумерной осевой модели программы *ComSol-Multiphysics* 6.

2 представлены на рисунке 2. На верхнем электроде высокого напряжения (ВН) (1) напряжение 20 кВ, а на нижнем $U=0$. Из распределения напряжённости электрического поля (ЭП), представленного на рисунке 2а следует, что наибольшая напряжённость наблюдается в промежутке и на краях потенциальных электродов 1 и 2. В других частях заземлённого бокса напряжённость менее 2,5 кВ/мм, т.е. условие самостоятельного разряда выполняется только в области между электродами. В промежутке между электродами 1 и 2 на расстоянии более 5 мм от края напряжённость поля однородна (рис.2а, б). Величина средней напряжённости в изоляции при $U_{вн}=20$ кВ и расстоянии между электродами 4 мм равна $E_{ср}=5$ кВ/мм. Внутри сферического газового дефекта (рис.2в) напряжённость так же однородна, превышает среднюю в 1.25 раза и равна $E_{max}=6,25$ кВ/мм. Она слабо зависит от размера дефекта, если размер вдоль поля (вдоль вертикальной оси рис.2) меньше половины толщины изоляции [6]. Если использовать данные по ЧР [12], то в таком дефекте ЧР должен произойти при напряжённости $E_{in}=4,7$ кВ/мм, т.е. при фазовом угле напряжения

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{E_{in}}{E_{max}}\right) = \arcsin(0,752) \sim 49^\circ. \quad (1)$$

Из рисунка 2 видно, что наибольшая напряжённость при различных конфигурациях электродов достигается на границе электрод (1,2) – диэлектрик (3) – воздух (4). Из рис. 2б можно было бы заключить, что напряжённость на краю электрода ВН (22,2 кВ/мм) превышает напряжённость на краю заземлённого электрода (10 кВ/мм). Однако такое различие не соответствует наличию плоскости зеркального отражения у рассматриваемой электродной системы. Из теории симметрии следует, что величины напряжённостей должны быть равны по модулю, а различие вызвано ошибочным моделированием. Действительно, размер сетки на рис.2б у заземлённого электрода был на порядок больше размера сетки у электрода ВН. При уменьшении размера усреднения (сетки) напряжённости становятся равными (рис.2г). Этот пример показывает необходимость проверки правильности дробления сетки в методе конечных элементов. Условие возникновения ЧР вдоль поверхности раздела сред 1-4-3 (2-4-3) [13,14] соответствуют величине напряжённости возникновения ЧР $E_{in}>2,6$ кВ/мм. При таком условии, ЧР в «сухой» ячейке начнут возникать при фазном угле напряжения по (1) $\varphi>7^\circ$. Из этого следует, что коронные и поверхностные ЧР вдоль поверхностей раздела 1-4-3 (2-4-3) будут происходить в том же диапазоне напряжений, что и ЧР от внутренних дефектов изоляции. Поскольку эти разряды имеют случайный характер и подобные характеристики с внутренними ЧР, то разделить их на практике достаточно сложно, а порой и невозможно.



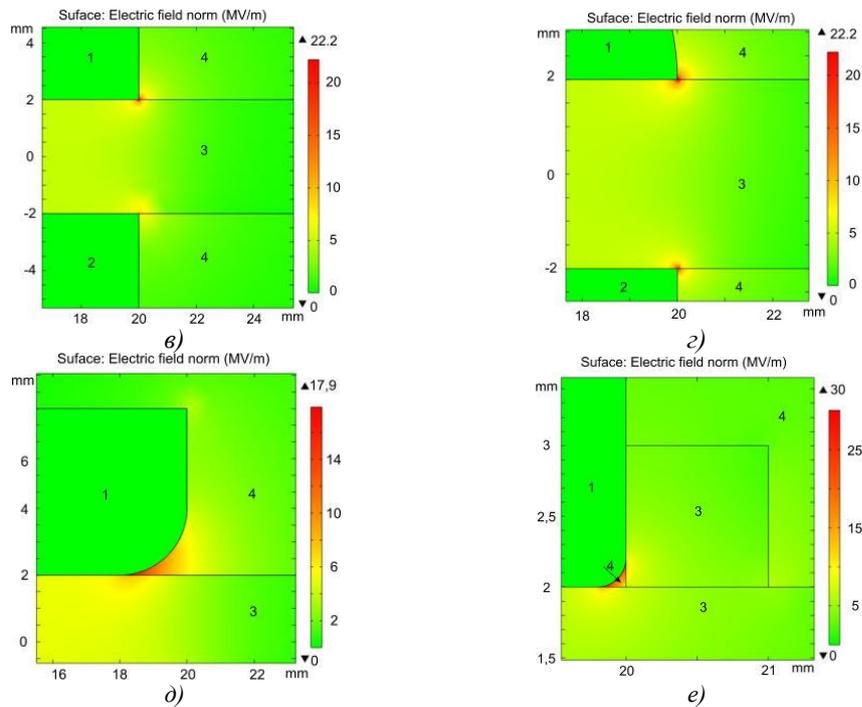


Рис. 2. Напряжённость электрического поля в ячейке: 1 – электрод ВН, 2 – заземлённый электрод, 3 – диэлектрик с дефектом и без него, 4 – воздух

Fig. 2. Electric field in the cell: 1 - electrode HV, 2 - grounded electrode, 3 - dielectric with and without defect, 4 - air

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

Типичные осциллограммы напряжений в измерительной ячейке такого типа представлен на рис.3. При повышении напряжения до $U_{rms}=3\text{kV}$ начинают появляться ЧР в образце изоляции без дефекта (рис.3а). Диэлектрическое кольцо на электродах (рис.2е) снижает напряжённость поля и должно при плотной установке привести к ликвидации поверхностных ЧР. Действительно, интенсивность (число и амплитуда) поверхностных ЧР вначале уменьшается, но после нескольких смен образцов их интенсивность снова возрастает. Это можно объяснить тем, что при неплотном контакте в тройной точке (окружности), где пересекаются границы разделов металл-воздух изолятор, образуются небольшие воздушные каверны типа рис.3е, в которых напряжённость даже выше, чем на границе раздела.

Такая же по порядку величины напряжённость возникает при наличии микроскопических зазоров между электродами и диэлектриком, возникающими при их не плотном прилегании. Нанесение на поверхности контакта трансформаторного масла приводит к его пробое и обугливаю.

При измерении ЧР в «сухой» ячейки регистрировалась ЧР как от образцов с внутренними объёмными газовыми дефектами (включениями), так и на контрольных образцах. Типичная картина наблюдаемых ЧР представлена на рис.3. Выделить сигнал ЧР от внутреннего дефекта (рис.3в) от поверхностных ЧР практически не представляется возможным даже при наличии контрольной осциллограммы образца без дефекта (рис.3б).

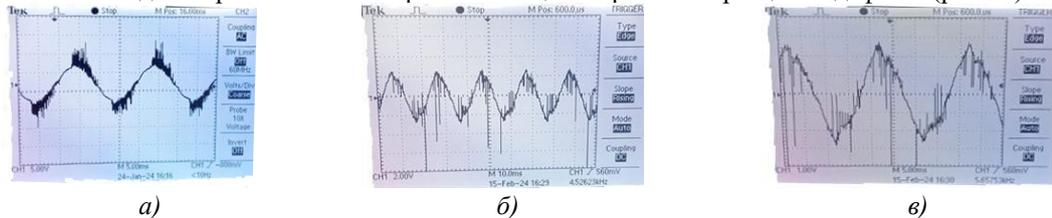


Рис. 3. Осциллограммы ЧР: а) без дефекта (электроды рис.2в), электроды рис.2 (с кольцом без дефекта б) и с дефектом в)

Fig. 3. PD oscillograms: а) without defect (electrodes of Fig. 2b), electrodes of Fig. 2 (with ring) without defect б) and with defect в)

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

2. Тип ячейки – масляная ячейка – стандартная ячейка для измерения пробивного напряжения трансформаторного масла¹ типа Т-1500Ус рабочим диапазоном температуры

¹ ГОСТ 6581-75. Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. // М.: ФГУП «Стандартинформ», 2008.

от +135°C до -45°C. Если в качестве электродной системы использовать эту ячейку, то картина распределения электрического поля существенно изменяется. На рис.4а показано распределения напряжённости в электродной системе масляной ячейки со вставленным образцом состоящий из твердой ПЭТ изоляции, имеющим внутренний газовый дефект.

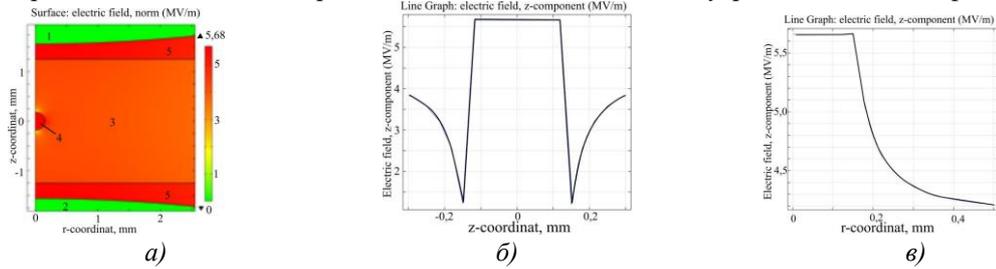


Рис.4. Электрическое поле в масляной ячейке с образцом диэлектрика с дефектом: а) rz – плоскость, б) $E_z=f(z)$ при $r=0$; в) $E_z=f(r)$ при $z=0$; цифрами обозначены: 1, 2 высоковольтный и заземлённый электроды; 3-диэлектрик; 4-воздушный дефект; 5 – трансформаторное масло

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

Воздушное включение только одно. Это дефект в изоляции. Электрическое поле в дефекте однородно, что видно из расчёта E_z компоненты как вдоль оси z (рис.4б), так и вдоль оси r (рис.4в). Распределение электрического поля на рис.4 рассчитано при напряжении $U_{rms}=8$ кВ на высоковольтном электроде 1. Наибольшая напряжённость получается в воздушном включении в изоляцию и равно $E_{max}=5,68$ кВ/мм. Для дефекта размером 0,3 мм вдоль оси Z напряжённость возникновения ЧР по данным работы [12] равна $R_{in}=5,8$ кВ/мм, т.е. при данном напряжении ЧР должен наблюдаться вблизи амплитудного значения напряжения при фазном угле 90° на положительной полуволне напряжения и вблизи угла 270° на отрицательной полуволне. На рис.5. представлены осциллограммы образца без дефекта (рис.5а) и с дефектом 0,3 мм вдоль поля (рис.5б) со среднеквадратичным напряжением между электродами $U_{rms}=24$ кВ, что соответствует максимальной напряжённости в масляном зазоре 17 кВ/мм. Никаких ЧР разрядов в системе с диэлектриком без дефекта (рис.5а) не наблюдается и при таких напряжённостях. Обычно ЧР в испытательной ячейке с маслом начинаются за несколько кВ до сквозного пробоя. Напряжённость 17 кВ/мм получается в ячейке без диэлектрика при напряжении между электродами $17 \text{ кВ/мм} \cdot 2,5 \text{ мм} = 42,5 \text{ кВ}$, что является низкой электрической прочностью масла. Перед началом измерений ЧР в газовых порах диэлектрика проводились два типа измерений: а) измерение пробивного напряжения в ячейке без вставленного диэлектрика и выбиралось трансформаторное масло с электрической прочностью не ниже 70 кВ; б) вставлялась диэлектрическая пластина без дефекта, повышалось напряжение до ~ 50 кВ и акустическим датчиком контролировалось отсутствие ЧР. Действуя по такой методике можно быть уверенным, что все ЧР, которые регистрируются в установке рис.1, принадлежат к внутренним дефектам изоляции, вставленной между электродами стандартной измерительной ячейки.



Рис.5. Осциллограммы ЧР в масляной ячейке при $U_{rms}=24$ кВ: а) контрольный образец изоляции без дефекта; б) изоляция с воздушным дефектом 0,3 мм вдоль поля

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

Как видно из рисунка 5б спектр ЧР состоит только из 2 ЧР по одному на период. Делались различные снимки экрана с 5 периодами и 3 периодами синусоиды переменного напряжения промышленной частоты. Число ЧР, возникающих на 1 периоде синусоиды,

равнялось 0, 1 или 2. У всех ЧР было одинаковый фазовый угол на положительной полувольтне, который был меньше на 180° фазового угла на отрицательной полувольтне напряжения. Это свидетельствует о том, что все ЧР происходят при одинаковой по модулю напряжённости ЭП. Если делается снимок экрана с масштабом развёртки 10 мс/дел на временной интервал 100 мс приходится 2500 выборок, т.е. измерения напряжения происходят через интервал 40 мкс. При такой частоте выборки много ЧР просто не фиксируются, поскольку длительность фронта одиночного ЧР имеет порядок нескольких нс, а время полуспада напряжения до сотни нс. Точность измерения фазового угла ЧР (напряжения возникновения) по такой методике составляют несколько градусов, что позволяет утверждать, что в исследованном образце после каждого ЧР происходит полная нейтрализация остаточного заряда каждую половину периода. Остаточного заряда на стенках воздушной каверны после 10^7 ЧР не образуется, а заметного деградации поверхности дефекта через 30 часов после приложения напряжения под микроскопом не наблюдалось.

Заключение (Conclusions)

Создана экспериментальная установка с измерительной ячейкой, в которой могут быть исследованы ЧР от внутренних газовых дефектов в изоляции при отсутствии коронных и поверхностных разрядов. Установлено, что ЧР в газовых кавернах изоляции происходят дважды за период синусоиды промышленной частоты 50 Гц при постоянных по модулю напряжениях. Проявления остаточных зарядов от предыдущих ЧР не обнаружено. Повреждения поверхности каверны после 30 часов приложения напряжения, создающего напряжённость электрического поля, превышающую напряжённость возникновения частичных разрядов, не наблюдалось.

Литература

1. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования // Новосибирск: Наука. - 2007. – 155с.
2. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. // Екатеринбург: УрГУПС, 2011. — 370 с. — ISBN: 978-5-94614-177-2.
3. Taylor N. A literature review: The nature of partial discharges in stator insulation. // ETK, KTH. 2008. P.34.
4. Kaziz S., Said M.H., Imburgia A., Maamer M, Flandre D., Romano P., Tounsi F. Radiometric Partial Discharge Detection: A Review. // *Energies* 2023, 16, 1978.
5. Zhang X., Pang B., Liu Y., Liu S., Xu P., Li Y., Liu Y., Qi L., Hie Q. Review on detection and analysis of partial discharge along power cables. // *Energies*, 2021, 14 (22), 7692,
6. Raziq H., Batoola M., Nawaz F., Akgul A., Afzal F., Hassani M.K. A review on analysis and modeling of electrical machine insulation system. // *Electrical & Electronic Engineering cogent engineering*, 2024, V.11, 2400614.
7. Ба Бораик А. М., Усачев А.Е., Кубарев А. Ю., Ильдарханов Р.Г. Новая методика определения размеров и положения дефектов в изоляции обмоток статоров турбогенераторов при измерениях в них частичных разрядов. // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2018. Т.20. № 1-2. С. 41-53.
8. Baboraik A.M., Usachev A.E. New model of explanation for phase angle pattern of online partial discharge measurement in winding insulation of turbine generator. // *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, V.72 (2021), pp.66–77.
9. Kubarev A.Yu., Usachov A.E., Mikhaylova E.V. Modeling of Partial Discharge Waveforms in the Generalized Model of Power Transformer Insulation // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446437; ISBN Information: Electronic ISBN:978-1-7281-4587-7; USB ISBN:978-1-5386-1797-7; Print on Demand (PoD) ISBN:978-1-7281-4588-4
10. Kubarev A.Yu., Usachov A. E., Paramonov M.A. Analysis of Power Transformers Monitoring Systems // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553850 Electronic ISBN:979-8-3503-9501-3 USB ISBN:979-8-3503-9500-6 Print on Demand (PoD) ISBN:979-8-3503-9502-0
11. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L. Modeling of partial discharges from a spherical cavity within a dielectric material under variable frequency electric fields // *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2008. CEIDP 2008. Annual Report Conference on. – IEEE, 2008. – С. 447-450.
12. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L. Effect of surface charge distribution on the electric field in a void due to partial discharges // *Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, Proceedings of 2011 International Conference on. – IEEE, 2011. – С. 245-248.
13. Александров А.Ф., Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И., Ломтева А.Ю.

Ионизация воздуха в околокритическом электрическом поле. // ЖТФ, 2006, т.76, в.3., с.38-43.

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

15. Luo B., Wang J., Dai D., Jia L., Li., Wang T. Partial Discharge Simulation of Air Gap Defects in Oil-Paper Insulation Paperboard of Converter Transformer under Different Ratios of AC–DC Combined Voltage // Energies, 2021, 14, 6995

16. Киншт Н.В., Борисов Б.Д., Петрунько Н.Н. Вопросы оценки множественных частичных разрядов в высоковольтном оборудовании. // Электроэнергия. Передача и распределение, 2019 № 2(53).

Авторы публикации

Ньетерейе Фредерик–аспирант кафедры «Электрические станции им. Шибанова В.К.», nyetereyefrederic@gmail.com, Казанский государственный энергетический университет.

Усачев Александр Евгеньевич– д.ф.-м.н. профессор, профессор кафедры «Электрические станции им. Шибанова В.К.», aleksandr_usachev@rambler.ru. Казанский государственный энергетический университет.

Бобоев Шухрат Абдусаломович– ассистент кафедры «Электрические станции им. Шибанова В.К.», shuhrrar1004@mail.ru Казанский государственный энергетический университет.

Кубарев Артём Юрьевич –кан. техн. наук. доцент кафедры «Электрические станции им. Шибанова В.К.», artemkubarev@yandex.ru. Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Vdoviko, V.P. Partial discharges in diagnostics of the high-voltage equipment (in Russian) // Novosibirsk: Nauka. - 2007. - 155с.

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

3. Taylor N. A literature review: The nature of partial discharges in stator insulation. // ETK, KTH. 2008. P.34.

4. Kaziz S., Said M.H., Imburgia A., Maamer M, Flandre D., Romano P., Tounsi F. Radiometric Partial Discharge Detection: A Review. // Energies 2023, 16, 1978.

5. Zhang X., Pang B., Liu Y., Liu S., Xu P., Li Y., Liu Y., Qi L., Hie Q. Review on detection and analysis of partial discharge along power cables. // Energies, 2021, 14 (22), 7692,

6. Raziq H., Batoola M., Nawaz F., Akgul A., Afzal F., Hassani M.K.. A review on analysis and modeling of electrical machine insulation system. // Electrical & Electronic Engineering, 2024, V.11, 2400614.

7. Ba Boraik A.M., Usachev A.E., Kubarev A.Yu., Ildarkhanov R.G. New methodology for determination of the sizes and positions of the defects in the insulation of the stator windings of the turbogenerators at the measurements of the partial discharges in them. // Izvestiya Vuzov. Problems of power engineering. 2018. T.20. № 1-2. С. 41-53.

8. Baboraik A.M., Usachev A.E.. New model of explanation for phase angle pattern of online partial discharge measurement in winding insulation of turbine generator. // Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, V.72 (2021), pp.66-77.

9. Kubarev A.Yu., Usachev A.E., Mikhailova E.V. Modeling of partial discharge waveforms in a generalized model of power transformer insulation // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446437; ISBN Information: Electronic ISBN:978-1-7281-4587-7; USB ISBN:978-1-5386-1797-7; Print on Demand (PoD) ISBN:978-1-7281-4588-4

10. Kubarev A.Yu., Usachev A.E., Paramonov M.A. Analysis of power transformer monitoring systems // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553850 Electronic ISBN:979-8-3503-9501-3 USB ISBN:979-8-3503-9500-6 Print on Demand (PoD) ISBN:979-8-3503-9502-0

11. Ilias H. A., Chen G., Lewin P. L. Modeling of partial discharges from a spherical cavity inside a dielectric material in electric fields of variable frequency // Electrical Insulation and

Dielectric Phenomena, 2008. CEIDP 2008. Annual reporting conference. - IEEE, 2008. - С. 447-450.

12. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L. Effect of surface charge distribution on the electric field in a void due to partial discharges // Electrical Insulating Materials (ISEIM), Proceedings of the 2011 International Conference on. - IEEE, 2011. - С. 245-248.

13. Alexandrov A.F., Bychkov V.L., Grachev L.P., Esakov I.I., Lomteva A.Yu. Ionization of air in near-critical electric field. // ZhTF, 2006, vol. 76, v.3, p.38-43.

14. Mesyats G. A. Similarity laws in pulsed gas discharges. // UVN. Reviews of Actual Problems 2006. Vol.176, No.10, pp.1069-1091.

15. Luo B., Wang J., Dai D., Jia L., Li., Wang T. Partial Discharge Simulation of Air Gap Defects in Oil-Paper Insulation Paperboard of Converter Transformer under Different Ratios of AC-DC Combined Voltage // Energies, 2021, 14, 6995.

16. Kinct, N.V.; Borisov, B.D.; Petrunko, N.N. Assessment questions of the multiple partial discharges in the high-voltage equipment. // Electricity. Transmission and Distribution, 2019 № 2(53).

Authors of the publication

Nyetereye Frederic – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alexander E. Usachev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Shuhrat A. Boboev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Artyom Y. Kubarev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Получено **29.05.2025 г.**

Отредактировано **01.06.2025 г.**

Принято **10.06.2025 г.**