

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.317.333

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-5-19-30

ДИАГНОСТИКА ФАРФОРОВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Гатауллин А.М., Гавриленко А.Н., Писковацкий Ю.В., Минкин А.С.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
gataullin1969@gmail.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования определяется тем, что на сегодняшний день отсутствует методика оценки состояния изоляторов и их гирлянд по характеристикам частичных разрядов (ЧР). В настоящее время в эксплуатации находится большое количество опорных и проходных фарфоровых изоляторов. ЦЕЛЬ. Распознавание ЧР в твердой изоляции, исследование характеристик ЧР в предпробойной ситуации, распознавание дефектных изоляторов по характеристикам ЧР. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи осуществлялись регистрация и сравнительный анализ характеристик ЧР для дефектного и работоспособного фарфорового изолятора. Для исследования характеристик различных типов ЧР, в том числе в предпробойной ситуации применялась система образцовых ЧР поверхность-игла. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье сопоставлены характеристики ЧР, полученные стандартным прибором R-400 производства «Димрус» с применением стандартного датчика. Разработана методика распознавания развития предпробойной ситуации разрядного промежутка поверхность-игла и фарфорового изолятора. Разработана методика распознавания дефектного фарфорового изолятора по амплитудно-фазовым диаграммам (АФД) ЧР, разработан метод оценки пробивного напряжения фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов. ВЫВОДЫ. В момент перехода в предпробойную стадию, обнаружены ЧР для которых характерно резкое нарастание встречного движения зарядов. Эти разряды приводили к увеличению тока утечки и регистрировались в фарфоровых изоляторах с применением прибора «Димрус» со стандартным набором датчиков. На основе анализа характеристик этих разрядов был сделан вывод относительно пробивного напряжения изоляторов.

Ключевые слова: метод частичных разрядов; частичные разряды; диагностика высоковольтных фарфоровых изоляторов; высоковольтные изоляторы; диагностика высоковольтных электрических изоляторов по характеристикам частичных разрядов; оценка пробивного напряжения фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов.

Для цитирования: Гатауллин А.М., Гавриленко А.Н., Писковацкий Ю.В., Минкин А.С. Диагностика фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 19-30. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-19-30.

DIAGNOSTICS OF PORCELAIN INSULATORS BY PARTIAL DISCHARGES CHARACTERISTICS

Gataullin A.M., Gavrilenko A.N., Piskovatskiy Y.V., Minkin A.S.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
gataullin1969@gmail.com

Abstract: RELEVANCE of the research is in the development of a non-destructive method for

diagnosing porcelain insulators of high-voltage electrical equipment based on analysis of the characteristics of partial discharges (PDs). The problem of the final stage of breakdown of both the discharge gap and porcelain insulators recognizing is currently has not solved. THE PURPOSE. Recognition of PDs in solid insulation, study of PDs characteristics in a pre-breakdown situation, recognition of defective insulators based on PDs characteristics analysing. METHODS. The study of PDs characteristics for a defective and functional porcelain insulator were carried out. To study the characteristics of various types of PDs, including in the pre-breakdown situation, a system of surface-needle electrode system was used. RESULTS. The article describes compares the PDs characteristics obtained using standard R-400 device and a digital storage oscilloscope (DSO) using a telescopic antenna. A technique for recognizing the development of the pre-breakdown situation of the surface-needle discharge gap and the porcelain insulator was developed. The technique for recognizing a defective porcelain insulator from the amplitude-phase diagrams (APD) of PDs was developed. The method for assessing the breakdown voltage of porcelain insulators based on the characteristics of partial discharges was developed. CONCLUSION. At the moment of transition to the pre-breakdown stage were observed a sharp increase in the counter-movement of charges of opposite polarity. In the stage immediately before the breakdown, near zero values of the applied voltage of negative polarity, ordered PDs of the same polarity as the applied voltage were recorded in large numbers. These discharges led to an increase in leakage current and were interpreted as initial corona discharges. These discharges were recorded both by a telescopic antenna in a surface-needle system and in porcelain insulators.

Keywords: *method of partial discharges; partial discharges; diagnostics of high-voltage electrical insulators; high-voltage electrical insulators; assessment of the breakdown voltage of porcelain insulators based on partial discharge characteristics.*

For citation: Gataullin A.M., Gavrilenko A.N., Piskovatskiy Y.V., Minkin A.S. Diagnostics of porcelain insulators by partial discharges characteristics. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (5): 19-30. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-19-30.

Введение (Introduction)

Частичные разряды приводят к повреждению изоляции высоковольтного электрооборудования. С другой стороны, по характеристикам ЧР можно прогнозировать разрушение изоляции. Поэтому в последнее время метод ЧР активно развивается как наиболее перспективный метод неразрушающего контроля изоляции высоковольтного электрооборудования. Одной из главных нерешенных задач является диагностика изоляторов, оценка их сопротивления и пробивного напряжения по характеристикам ЧР. Следует отметить, что ряд авторов объясняют механизм разрушения фарфоровых и полимерных изоляторов увеличением количества воздушных включений в толще изоляции, так называемых каверн, которые приводят к появлению устойчивого сквозного тока через весь объем изолятора, что и является причиной их пробоя. Также в ряде работ исследованы поверхностные ЧР, которые обычно характерны для тарельчатых изоляторов.

В работе [1] описана теория так называемых сверхбольших ЧР, на основе которой объясняется пробой полимерных изоляторов, но не объясняется механизм развития пробоя, который, как известно, начинается от начальных ЧР небольшой амплитуды. В дальнейшем будем называть их максимальными ЧР. При проведении данного исследования дефекты были созданы искусственно, не был произведен сравнительный анализ характеристик ЧР дефектных и бездефектных изоляторов. Также не исследованы характеристики ЧР в их взаимосвязи с током утечки изоляторов, их сопротивлением и пробивным напряжением.

В работе [2] описан прибор для оценки состояния высоковольтных изоляторов комбинированным методом на основе регистрации и анализа характеристик сигналов акустической эмиссии и электромагнитных волн, обусловленных ЧР. В этой работе отсутствует количественная оценка состояния изоляторов.

В работе [3] описаны результаты исследования характеристик ЧР в тарельчатых изоляторах воздушных линий электропередачи в ультравысокочастотном (УВЧ) диапазоне электромагнитного излучения (ЭМИ), обусловленного ЧР. При этом в лабораторных условиях сопоставлялись характеристики ЧР с применением аппарата испытания диэлектриков АИД-70 при величине приложенного напряжения 8,5 кВ. В

данной работе отсутствуют рекомендации по определению величины пробивного напряжения изоляторов по характеристикам ЧР.

В работе [4] были исследованы характеристики модельных разрядов в системе стержень-оконцеватель с помощью телевизионной антенны «Дельта». При этом были обнаружены отличия в фазовом распределении ЧР и их интенсивностей в зависимости от наличия, или отсутствия дефектов. В данной работе отсутствует сравнительный анализ полученных распределений ЧР со стандартными амплитудно-фазовыми диаграммами (АФД), построенными с помощью программного обеспечения стандартного прибора для измерения и анализа характеристик ЧР, например, R-400 производства «Димрус». Также не приведены характеристики ЧР на стадии формирования предпробойной ситуации и перехода в стадию пробоя модельного разрядного промежутка при увеличении приложенного напряжения. В представленной работе рассмотрены вопросы, которые не в полной мере освещены в вышеперечисленных работах.

Для изучения характеристик антенн, эффективности применяемых методов и оборудования обычно используют образцовый источник ЧР поверхность-игла, который позволяет моделировать ЧР в резко неоднородных полях. Отметим, что в фарфоровых тарельчатых изоляторах, ЧР возникают либо на поверхности, либо внутри в условиях резко неоднородных полей. По этой причине полезно сопоставить ЧР в системе поверхность-игла и в фарфоровых тарельчатых изоляторах. При этом актуально решить задачу выработки критериев распознавания ЧР и их источника, в том числе с применением антенн и фильтров. При регистрации ЧР электромагнитными датчиками и антеннами в УВЧ диапазоне ЭМИ теряется информация о фазе приложенного напряжения и соответственно возможность распознавания типа дефекта, что наряду с выработкой критериев предпробойной ситуации является важной научной задачей.

Сделан вывод, что антенны УВЧ диапазона не позволяют регистрировать ЧР, присущие различным стадиям пробоя.

Можно утверждать, что в большинстве случаев основной причиной разрушения изоляторов любого типа являются внутренние дефекты, которые образуются на этапе их изготовления, а их развитие в процессе эксплуатации приводит к постепенному уменьшению электрической прочности и сопровождается увеличением числа и интенсивности ЧР. Для разделения различных типов ЧР друг от друга и идентификации дефекта строят статистические распределения ЧР [5]. Старение изоляции высоковольтного электрооборудования может сопровождаться развитием электрических триингов (дендритов) [6]. Прорастание электрических триингов по поверхности загрязненного изолятора сопровождается уменьшением поверхностного сопротивления изолятора [7]. В предпробойной ситуации воздушного разрядного промежутка и полимерной изоляции в основном наблюдаются ЧР величиной от 50 пКл до 150 пКл [8]. Разработана модель старения изоляции, в которой рост дендритов сопровождается увеличением геометрических размеров каверн [9]. Точное определение величины заряда, обусловленного ЧР, на практике обычно не представляется возможным, причем в одних случаях будет наблюдаться переходная характеристика [10], в других случаях импульсная характеристика [11], обусловленная параметрами измерительной цепи [12], что влияет на величину определяемого кажущегося заряда – заряда, приводящего к таким же изменениям в окружающей среде, что и реальный заряд, внесенный в разрядный промежуток. Имеются сведения, что разрушение диэлектриков под воздействием переменного напряжения происходит по причине электронных лавин [13]. Для разделения различных типов ЧР друг от друга и идентификации дефекта строят статистические распределения ЧР с применением стандартных приборов [14]. Старение изоляции высоковольтного электрооборудования может сопровождаться развитием электрических триингов (дендритов) [15]. Можно сделать вывод, что гораздо более эффективно не стремиться к тому, чтобы как можно более точно измерять величину кажущегося заряда, а сравнивать характеристики ЧР, полученные в одних и тех условиях и делать выводы на основании сопоставления этих характеристик.

Научная значимость исследования состоит в том, что по характеристикам ЧР был изучен переход от начальной стадии пробоя к предпробойной ситуации и к финальной стадии пробоя модельного разрядного промежутка, построена модель оценки пробивного напряжения и получены практические результаты пробивного напряжения фарфоровых изоляторов.

Практическая значимость данной работы заключается в разработке методики оценки пробивного напряжения фарфоровых изоляторов и их гирлянд по

характеристикам ЧР, полученные стандартным прибором R-400.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объектами исследования были фарфоровые изоляторы тарельчатого типа ПФ-6В и их гирлянды, состоящие из двух изоляторов, содержащие один не поврежденный и один поврежденный изолятор, а также два неповрежденных изолятора, которые будем называть бездефектными. Также исследован пробой модельного разрядного промежутка поверхность-игла. Изоляторы ПФ-6В изготовлены из фарфора, поэтому можно полагать, что физические процессы и особенности их протекания будут схожи с таковыми в опорных и проходных фарфоровых изоляторах. Полученные результаты и методика могут быть использованы для развития и распространения методики на другие фарфоровые изоляторы, в частности опорные и проходные.

Такой выбор объектов был связан с тем, что в обоих случаях ЧР возникают в резко неоднородных полях и схожих особенностях механизмов пробоя. Поврежденный фарфоровый изолятор не имел видимых внешних повреждений, а только внутренние. При этом оказалось, что у него низкое пробивное напряжение, что позволило выявить механизмы развития пробоя гирлянд фарфоровых изоляторов, содержащих поврежденный изолятор. Сопротивление поврежденного изолятора, определенное мегаомметром МС-05, оказалось равным 50 МОм, а сопротивление не поврежденного изолятора 3,5 ГОм. Схема проведения эксперимента показана на рисунке 1. В качестве источника высокого напряжения был выбран аппарат испытания диэлектриков АИД-70. Для анализа характеристик ЧР применялся прибор R-400 производства «Димрус». Прибор R-400 применялся вместе со стандартным датчиком высокочастотным измерительным трансформатором (ВИТ) с полосой частот 1÷10 МГц и программным обеспечением, которое позволяет представить распределение ЧР в дБ, В, нКл.

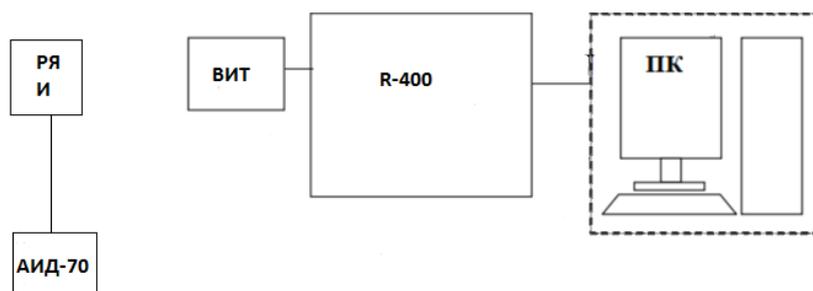


Рис. 1. Схема лабораторной установки. РЯ – разрядная ячейка, И – изолятор и гирлянды изоляторов, АИД-70 – аппарат испытания диэлектриков, ВИТ – высокочастотный измерительный трансформатор (датчик R-400), R-400 – прибор «Димрус», ПК – персональный компьютер

Fig. 1. Schematic diagram of the laboratory installation. РЯ – discharge cell, И – insulator and insulator garlands, АИД-70 – dielectric testing apparatus, ВИТ – high-frequency measuring transformer (R-400 sensor), R-400 – “Dimrus” device, ПК – personal computer

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

Исследования характеристик ЧР проводились при номинальном напряжении отдельно взятых изоляторов и их гирлянд. Исследовали изменение распределений ЧР по фазе и величине приложенного напряжения. Были выведены закономерности изменения этих распределений и их взаимосвязь с пробивным напряжением. Пробивное напряжение не поврежденного изолятора предварительно рассчитывалось по известной формуле и модели, в которой изолятор представлен как цилиндрический конденсатор:

$$U_{np} = E_{np} \frac{(R - r)r}{R}, \tag{1}$$

где R и r – характерные размеры тарельчатого изолятора, а E_{np} – напряженность электрического поля, при которой происходит пробой изолятора.

Для тарельчатого изолятора ПФ-6В она равна примерно 9 кВ/мм. С учетом этой величины и размеров фарфорового изолятора, величина пробивного напряжения оказалась равной 660 кВ. Измерения характеристик ЧР проводились как при постоянном, так и при переменном приложенном напряжении. Исследования показали, что на различных этапах пробоя воздушного разрядного промежутка возникают характерные для этих этапов паттерны ЧР, причем на положительной полуволне

приложенного напряжения в основном наблюдаются провалы приложенного напряжения в момент возникновения ЧР, особенно в интервалах с минимальными значениями напряжений возникновения и гашения ЧР. Такие же особенности были обнаружены для фарфоровых изоляторов и их гирлянд. По этой причине было решено исследовать характеристики одинаковых ЧР, возникающие как при постоянном, так и при переменном приложенном напряжении. Это было сделано также по той причине, что максимальные ЧР при увеличении переменного приложенного напряжения постепенно возникали с меньшей вероятностью, а частота следования относительно небольших ЧР увеличивалась. Также выяснилось, что максимальные ЧР возникают, например, в воздушном разрядном промежутке поверхность-игла в ситуации, далекой от пробоя, а также в неповрежденных фарфоровых изоляторах. Исследования показали, что статистические распределения ЧР для неповрежденного изолятора приближаются к статистическим распределениям ЧР для поврежденного изолятора при значениях приложенного напряжения, близких к пробивным. Такая же особенность характерна для гирлянд. Визуальный осмотр изучаемых изоляторов не проявил таких видимых повреждений как: повреждение глазури, сколы и трещины фарфоровой изоляции, а также отсутствовали видимые загрязнения. Один изолятор не имел внешних повреждений, но его сопротивление было порядка 50 МОм и пробивное напряжение 15 кВ. Другие изоляторы имели омическое сопротивление порядка 3,5 ГОм. Это позволило сделать вывод, что изолятор с сопротивлением 50 МОм имеет внутренние дефекты. Он и был обозначен как поврежденный. Для внутренних разрядов характерна в частности древовидная структура, похожая на структуру разрядов в модели поверхность-игла. Сравнивая АФД для исследуемого объекта с АФД модели поверхность-игла и наблюдая распределение ЧР, похожее на распределение в модели поверхность-игла, можно полагать, что проявляются внутренние ЧР. В частности, при внутренних ЧР увеличивается их количество, особенно с малыми амплитудами, в районе фаз 210÷240 градусов приложенного напряжения. Это позволяет отличать внутренние ЧР от других.

Закономерности пробоя были исследованы на основании расчетной модели оценки пробивного напряжения не поврежденного изолятора, сравнении характеристик ЧР для гирлянд, в том числе содержащих поврежденный изолятор с учетом динамики изменения ЧР, возникающие при постоянном и переменном приложенном напряжении. Расчетная модель пробоя была разработана для гирлянды из двух изоляторов, один из которых дефектный в сравнении с аналогичными характеристиками для гирлянды из двух не поврежденных изоляторов и поврежденного изолятора. При этом предполагалось, что емкость, обуславливающая поверхностные ЧР для поврежденного и неповрежденного изолятора одинаковая, а емкость, обуславливающая внутренние ЧР, разная. Заряд ЧР был определен по формуле:

$$q = CU = (N_1 C_{нов} + N_2 C_{\delta})U, \quad (2)$$

где U приложенное напряжение, $C_{нов}, C_{\delta}$ – емкости поверхностных и внутренних дефектов соответственно, N_1, N_2 – количество поверхностных и внутренних ЧР положительной полярности.

Преобразовав (2), можно получить систему уравнений для каждого изолятора в гирлянде:

$$\begin{cases} \frac{q_1}{N_1} = (C_{нов} + k_1(U_1)C_{\delta 1})U_1 \\ \frac{q_2}{N_2} = (C_{нов} + k_2(U_2)C_{\delta 2})U_2 \end{cases}, \quad (3)$$

где k_1 – относительное количество внутренних ЧР положительной полярности для дефектного изолятора, k_2 – относительное количество внутренних ЧР положительной полярности для работоспособного изолятора, определенные при соответствующих значениях приложенного напряжения.

Выразим емкости дефектов:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{\partial 1} = \frac{\frac{q_1}{N_1 U_1} - C_{nos}}{k_1(U_1)} \\ C_{\partial 2} = \frac{\frac{q_2}{N_2 U_2} - C_{nos}}{k_2(U_2)} \end{array} \right. \quad (4)$$

Далее полагаем, что $k_1(U_{1np}) = k_2(U_{2np})$, $N_1 = N_2$, а через каждый изолятор будет протекать один и тот же ток, обусловленный в основном внутренними дефектами, при этом полагаем $C_{nos} \approx 0$. Тогда будет выполняться соотношение:

$$C_{\partial 1} U_{1np} = C_{\partial 2} U_{2np}, \quad (5)$$

где U_{1np} — пробивное напряжение первого изолятора, U_{2np} — пробивное напряжение второго изолятора.

Соотношение (5) говорит о том, что при условиях внутреннего пробоя, сквозной ток через изоляторы будут одинаковыми при определенных значениях приложенного напряжения. В этом случае из (4), пренебрегая C_{nos} , после преобразований с учетом (5) получим:

$$U_2 = \frac{U_{2np}}{U_{1np}} \frac{k_1(U_1)}{k_2(U_2)} U_1. \quad (6)$$

Далее рассмотрим гирлянду из двух изоляторов.

Для гирлянды с одним дефектным изолятором будет выполняться соотношение (6), а при каждом шаге увеличения приложенного напряжения, выше пробивного для первого изолятора, k_1 и k_2 будут отличаться от предыдущих значений, тогда можем записать:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{U_{2np}}{U_{1np}} \frac{k_1(U_1)}{k_2(U_2)}. \quad (7)$$

Далее экспериментально были определены величины $k_1 = k_1(U_{1np})$ для дефектного изолятора, $k_2 = k_2(U_{1np})$ для гирлянды из двух бездефектных изоляторов и $k_3 = k_3(U_{1np})$ для гирлянды их двух изоляторов, один из которых дефектный. Из (7) видно, что $k_1 = k_2(U_{2np})$, $k_1 = k_3(U_{3np})$.

$$\text{Пусть } \frac{U_3^n}{U_{1np}} = \frac{U_{3np}}{U_{1np}} \frac{k_1}{k_3(U_3^n)}, \quad k_3(U_3^n) = k_3(U_3^{n-1}) \left(\frac{k_3}{k_2} \right), \quad n = 2, 4, 8, \dots$$

Тогда с учетом пробивного напряжения дефектного изолятора 15 кВ пробивное напряжение бездефектного изолятора равно 660 кВ. Далее показано более подробно, как были получены и уточнены эти результаты.

Результаты (Results)

ЧР от системы поверхность-игла на которую подавалось как переменное так и постоянное напряжение в диапазоне от 5 до 20 кВ как при переменном, так и при постоянном приложенном напряжении ЧР, регистрируемые датчиком R-400, практически не отличаются, независимо от величины приложенного напряжения. В том числе удалось обнаружить ЧР, характерные для перехода к предпробойной ситуации, после возникновения которых при дальнейшем увеличении приложенного напряжения формировались паттерны из большого количества ЧР небольшой амплитуды той же полярности, что и приложенное напряжение. Был сделан вывод, что перед формированием таких паттернов резко нарастает ток, обусловленный встречным движением зарядов. При постоянном приложенном напряжении в основном наблюдались ЧР с провалом приложенного напряжения, но при увеличении приложенного напряжения появлялись редкие ЧР положительной полярности.

При переменном приложенном напряжении на положительной полуволне наблюдались в основном провалы приложенного напряжения, причем относительно большие по сравнению с предпробойным паттерном на отрицательной полуволне

приложенного напряжения. Неожиданным оказалось то, что увеличение переменного приложенного напряжения на отрицательной полуволне приводило к перераспределению ЧР от максимальных к ЧР относительно небольшой амплитуды. Паттерны существенно зависят от диаметра иглы. Например, для иглы 0,5 мм, на положительной полуволне регистрировались биполярные ЧР величиной до 15 нКл (рис. 2).

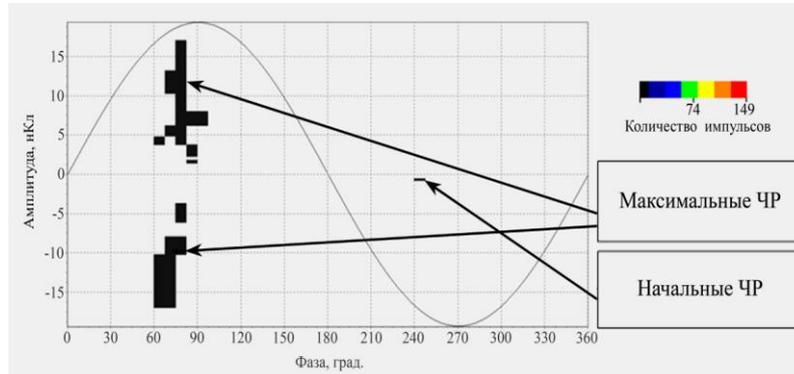


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигналов короны в нКл от фазы действующего напряжения в градусах, полученные с помощью системы поверхность-игла (диаметр иглы 0,5 мм), напряжение 14 кВ. На вставке показана цветовая шкала количества импульсов

Fig. 2. Dependence of the corona signal amplitude in nCl on the phase of the effective voltage in degrees, obtained with the surface-needle system (needle diameter 0.5 mm), voltage 14 kV. The inset shows the color scale of the number of pulses

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

Для моделирования характеристик ЧР, обусловленных внутренними дефектами, была выбрана игла диаметром 20 мкм, распределение ЧР в такой системе соответствует резко неоднородным полям (рис. 3). Такая же особенность была обнаружена для фарфоровых изоляторов и их гирлянд, причем, наиболее яркая для дефектного изолятора.

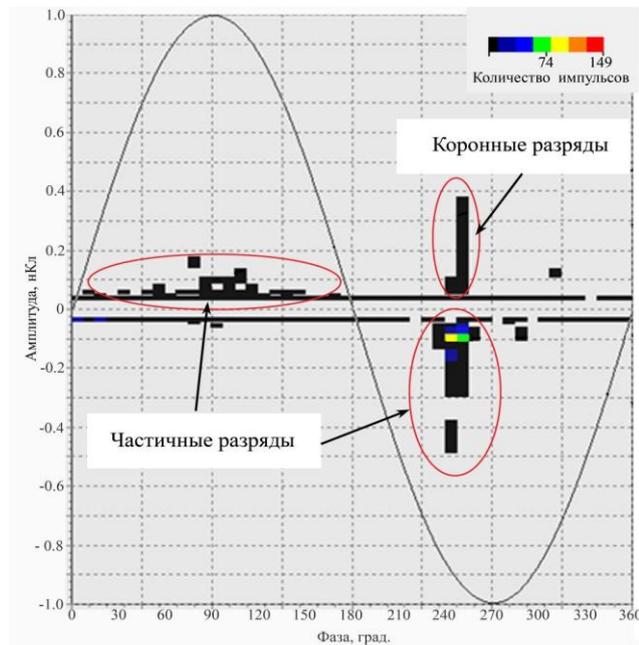


Рис. 3. Частичные разряды в системе поверхность-игла с диаметром иглы 20 мкм. Цветом прямоугольников показано количество импульсов в предпробной ситуации при напряжении 18 кВ

Fig. 3. Partial discharges in the surface-needle system with a needle diameter of 20 μm . The color of rectangles shows the number of pulses in the pre-failure situation at 18 kV

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

Распределения ЧР для фарфоровых изоляторов показаны на рисунках 4, 5 и 6.

С увеличением приложенного напряжения, число относительно больших ЧР росло, но не так быстро, как число относительно небольших ЧР, возникновение которых было объяснено внутренними дефектами. Для дефектного изолятора токи ЧР обусловлены ЧР величиной 35 пКл, 45 пКл, 57 пКл, 262 пКл, 330 пКл и 430 пКл.

Для фарфоровых изоляторов в отличие от системы поверхность-игла, биполярная корона периодически наблюдается практически на всех фазах приложенного напряжения при его увеличении от 15 кВ, при этом ток утечки равен 0,4 мА. Максимальные ЧР при этом наблюдались очень редко, причем до величины 1 нКл. Пробивное напряжение дефектного изолятора 15 кВ. ЧР для этого изолятора регистрировались при 12,5 кВ.

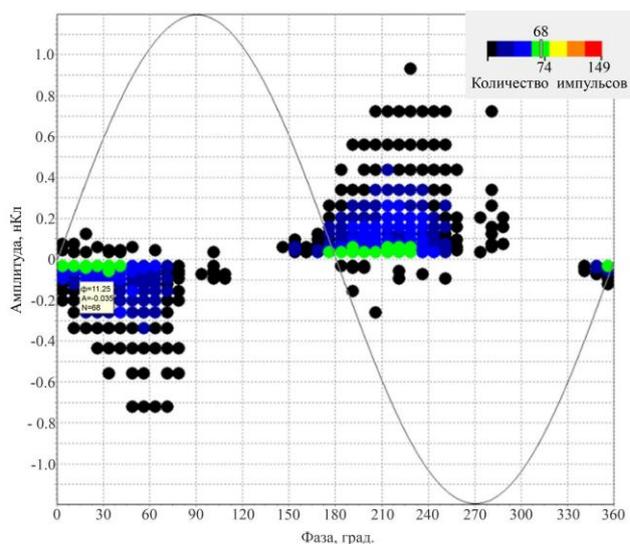


Рис. 4. Частичные разряды в системе гирлянда, состоящей из двух изоляторов, находящихся в нормальном состоянии. Приложено переменное напряжение 10 кВ

Fig. 4. Partial discharges in a daisy chain system consisting of two insulators under normal condition. An alternating voltage of 10 kV is applied

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

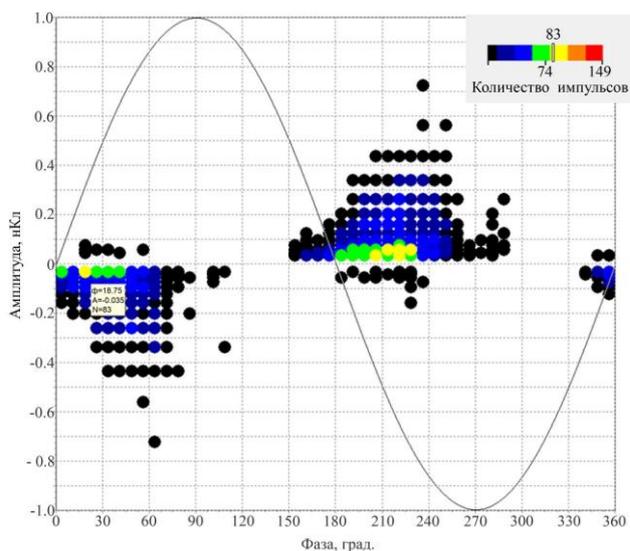


Рис. 5. Частичные разряды в системе гирлянда, состоящей из двух изоляторов, один из которых дефектный. Приложено переменное напряжение 10 кВ

Fig. 5. Partial discharges in a daisy chain system consisting of two insulators, one of which is defective. An alternating voltage of 10 kV is applied

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

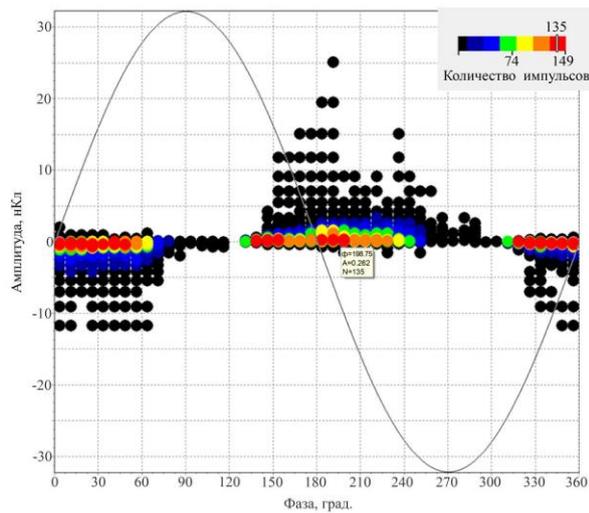


Рис. 6. Частичные разряды. К исправному изолятору приложено переменное напряжение 30 кВ

Fig. 6. Partial discharges. An AC voltage of 30 kV is applied to a serviceable insulator

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

Такие распределения для фарфоровых изоляторов и их отличия для системы поверхность-игла объясняется тем, что при относительно небольших величинах приложенного напряжения, с помощью прибора удается наблюдать ЧР, распространяющиеся со стороны стержня к шапке и в противоположном направлении. Если изолятор исправен, по мере увеличения напряжения происходит пробой за счет развития поверхностных ЧР, пробивное напряжение при этом в десятки раз превышает номинальное. Если изолятор имеет внутренние дефекты, пробой происходит изнутри при существенно меньшей величине действующего напряжения. Поверхностные ЧР наблюдаются на фоне коронных разрядов. Корона, как правило, возникает на пиках действующего напряжения. Для исправного изолятора при 30 кВ наблюдаются начальные ЧР в широком диапазоне фазы приложенного напряжения (рис 6), при этом ток утечки возрастает до 1 мА.

В таблице 1 приводятся характеристики ЧР, полученные с помощью R-400.

Таблица 1
Table 1

Основные характеристики ЧР
Main characteristics of PD

Объект исследования и величина приложенного переменного напряжения	Величина ЧР, пКл	Число ЧР	Соответствующие дефектам ЧР	Всего ЧР	Величина k
Один дефектный изолятор, 12,5кВ	35	375	1160	1645	0,705167173
	45	325			
	57	460			
	262	200			
	330	135			
Два бездефектных изолятора, 25кВ	430	150	305	1010	0,301980198
	35	90			
	45	85			
	57	130			
	262	240			
Два изолятора в гирлянде, один дефектный, 25кВ	330	230	388	1103	0,351767906
	430	235			
	35	115			
	45	118			
	57	155			
262	235				
330	215				
430	265				

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

Для бездефектного изолятора ток утечки не более 0,2 мА при величине приложенного напряжения 6 кВ. Для гирлянды с одним дефектным изолятором ток утечки при переменном приложенном напряжении 15 кВ 0,4 мА, что уже больше допустимого в условиях эксплуатации. Можно сделать вывод, что ток утечки связан с внутренними ЧР. Следовательно, разработанная методика и модель справедлива для гирлянд фарфоровых изоляторов.

Обсуждение (Discussions)

При значении пробивного напряжения для дефектного изолятора 12,5 кВ была определена величина $k_1 = 0,705$. При величине приложенного напряжения 25 кВ были определены $k_2 = 0,302$ и $k_3 = 0,352$. С учетом того, что пробивное напряжение дефектного изолятора 15 кВ согласно разработанной методике были оценены значения пробивного напряжения гирлянды с дефектным изолятором 660 кВ, что хорошо согласуется с соотношением омических сопротивлений дефектного и бездефектного изоляторов (50 МОм и 3,5 ГОм), которые определяются при постоянном приложенном напряжении с помощью мегаомметра. Разница в оценке связана с тем, что при переменном напряжении более интенсивное встречное движение зарядов разного знака и, как следствие, более интенсивная ионизация окружающего воздуха. Также можно сделать вывод, что максимальные ЧР не определяют степень разрушения внутри изолятора.

Заключение (Conclusions)

Разработана модель пробоя и методика оценки пробивного напряжения гирлянд фарфоровых изоляторов, содержащих дефектный изолятор, по характеристикам частичных разрядов. Полученные значения пробивного напряжения хорошо согласуются с теоретическими приблизительными оценками как по разработанной модели, так и по существующим методикам. Данная методика может быть применена для дистанционной оценки состояния фарфоровых изоляторов в условиях эксплуатации. В работе показано как по амплитудно-фазовым диаграммам распределения ЧР определить гирлянду с дефектным изолятором при номинальном приложенном напряжении. Полученная методика позволяет оценивать пробивное напряжение гирлянды изоляторов по относительным величинам, без калибровки по величине кажущегося заряда, что делает ее универсальной с точки зрения широты выбора способа и частотного диапазона регистрации ЧР.

Литература

1. Иванов Д.А. Особенности мониторинга сверхбольших частичных разрядов в высоковольтных. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С.151-163. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163>.
2. Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Потапов А.А., Кротов В.И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 4. С. 123-133. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-123-133>.
3. Галиева Т.Г., Иванов Д.А. Садыков М.Ф., Андреев Н.К., Хамидуллин И.Н. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. No 4. С. 165-177. [doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177).
4. Голенищев-Кутузов А.В., Ахметвалеева Л.В., Еникеева Г.Р., Иванов Д.А., Семенников А.В., Марданов Г.Д. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. No 2. С. 117-127. [doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127).
5. Detection and Localization of Partial Discharge in Connectors of Air Power Lines by Means of Ultrasonic Measurements and Artificial Intelligence Models <https://www.researchgate.net/publication/347952901>
6. Schurch, R.; Munoz, O.; Ardila-Rey, J.; Donoso, P.; Peesapati, V. Identification of Electrical Tree Aging State in Epoxy Resin Using Partial Discharge Waveforms Compared to Traditional Analysis. *Polymers* **2023**, *15*, 2461. <https://doi.org/10.3390/polym15112461>
7. Florkowski, M.; Kuniewski, M. Partial Discharge-Originated Deterioration of Insulating Material Investigated by Surface-Resistance and Potential Mapping. *Energies* **2023**, *16*, 5973. <https://doi.org/10.3390/en16165973>
8. Rodríguez-Serna, J.M.; Albarracín-Sánchez, R. A Study on the Life Estimation and Cavity Surface Degradation Due to Partial Discharges in Spherical Cavities within Solid Polymeric Dielectrics Using a Simulation Based Approach. *Polymers* **2021**, *13*, 324. <https://doi.org/10.3390/polym13030324>

9. Kyere, I.K.; Nyamupangedengu, C.; Swanson, A.G. A Comparative Study of Time-Evolution Characteristics of Single and Double Cavity Partial Discharges. *Energies* **2024**, *17*, 1905. <https://doi.org/10.3390/en17081905>

10. Zhang, X.; Pang, B.; Liu, Y.; Liu, S.; Xu, P.; Li, Y.; Liu, Y.; Qi, L.; Xie, Q. Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables. *Energies* **2021**, *14*, 7692. <https://doi.org/10.3390/en14227692>

11. Karami, H.; Azadifar, M.; Mostajabi, A.; Rubinstein, M.; Karami, H.; Gharehpetian, G.B.; Rachidi, F. Partial Discharge Localization Using Time Reversal: Application to Power Transformers. *Sensors* **2020**, *20*, 1419. <https://doi.org/10.3390/s20051419> <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/5/1419>

12. Sikorski, W.; Wielewski, A. Low-Cost Online Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers. *Sensors* **2023**, *23*, 3405. <https://doi.org/10.3390/s23073405>

13. Syasko, V.; Musikhin, A.; Gnivush, I. Improvement of Methods and Devices for Multi-Parameter High-Voltage Testing of Dielectric Coatings. *Coatings* **2024**, *14*, 427. <https://doi.org/10.3390/coatings14040427>

14. Barbieri, L.; Villa, A.; Malgesini, R.; Palladini, D.; Laurano, C. An Innovative Sensor for Cable Joint Monitoring and Partial Discharge Localization. *Energies* **2021**, *14*, 4095. <https://doi.org/10.3390/en14144095>

15. Lu, B.; Li, S.; Cui, Y.; Zhao, X.; Zhang, D.; Kang, Y.; Dong, H. Insulation Degradation Mechanism and Diagnosis Methods of Offshore Wind Power Cables: An Overview. *Energies* **2023**, *16*, 322. <https://doi.org/10.3390/en16010322>

Авторы публикации

Гатауллин Айрат Мухамедович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID**: <http://orcid.org/0000-0002-6581-2400>. gataullin1969@gmail.com.

Гавриленко Андрей Николаевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Писковацкий Юрий Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Минкин Ахметгарей Султанович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Ivanov D.A. Features of monitoring extra large partial discharge in high voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(1):151-163. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163>.

2. Golenishchev-Kutuzov A.V., Ivanov D.A., Potapov A.A., Krotov V.I. Using contactless methods of diagnostics of high electric fields. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(4):123-133. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-123-133>.

3. Galieva T.G., Ivanov D.A., Sadykov M.F., Andreev N.K., Khamidullin I.N. Methodology and device for diagnostics of high-voltage insulators based on continuous recording of the spatial level of electromagnetic radiation of partial discharges. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(4):165-177. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177>.

4. Golenishchev-Kutuzov A.V., Akhmetvaleeva L.V., Enikeeva G.R., Ivanov D.A., Semennikov A.V., Mardanov G.D. Remote testing for defects in service high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):117-127. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127>.

5. Detection and Localization of Partial Discharge in Connectors of Air Power Lines by Means of Ultrasonic Measurements and Artificial Intelligence Models <https://www.researchgate.net/publication/347952901>

6. Schurch, R.; Munoz, O.; Ardila-Rey, J.; Donoso, P.; Peesapati, V. Identification of Electrical Tree Aging State in Epoxy Resin Using Partial Discharge Waveforms Compared to Traditional

Analysis. *Polymers* **2023**, *15*, 2461. <https://doi.org/10.3390/polym15112461>

7. Florkowski, M.; Kuniewski, M. Partial Discharge-Originated Deterioration of Insulating Material Investigated by Surface-Resistance and Potential Mapping. *Energies* **2023**, *16*, 5973. <https://doi.org/10.3390/en16165973>

8. Rodríguez-Serna, J.M.; Albarracín-Sánchez, R. A Study on the Life Estimation and Cavity Surface Degradation Due to Partial Discharges in Spherical Cavities within Solid Polymeric Dielectrics Using a Simulation Based Approach. *Polymers* **2021**, *13*, 324. <https://doi.org/10.3390/polym13030324>

9. Kyere, I.K.; Nyamupangedengu, C.; Swanson, A.G. A Comparative Study of Time-Evolution Characteristics of Single and Double Cavity Partial Discharges. *Energies* **2024**, *17*, 1905. <https://doi.org/10.3390/en17081905>

10. Zhang, X.; Pang, B.; Liu, Y.; Liu, S.; Xu, P.; Li, Y.; Liu, Y.; Qi, L.; Xie, Q. Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables. *Energies* **2021**, *14*, 7692. <https://doi.org/10.3390/en14227692>

11. Karami, H.; Azadifar, M.; Mostajabi, A.; Rubinstein, M.; Karami, H.; Gharehpetian, G.B.; Rachidi, F. Partial Discharge Localization Using Time Reversal: Application to Power Transformers. *Sensors* **2020**, *20*, 1419. <https://doi.org/10.3390/s20051419><https://www.mdpi.com/1424-8220/20/5/1419>

12. Sikorski, W.; Wielewski, A. Low-Cost Online Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers. *Sensors* **2023**, *23*, 3405. <https://doi.org/10.3390/s23073405>

13. Syasko, V.; Musikhin, A.; Gnivush, I. Improvement of Methods and Devices for Multi-Parameter High-Voltage Testing of Dielectric Coatings. *Coatings* **2024**, *14*, 427. <https://doi.org/10.3390/coatings14040427>

14. Barbieri, L.; Villa, A.; Malgesini, R.; Palladini, D.; Laurano, C. An Innovative Sensor for Cable Joint Monitoring and Partial Discharge Localization. *Energies* **2021**, *14*, 4095. <https://doi.org/10.3390/en14144095>

15. Lu, B.; Li, S.; Cui, Y.; Zhao, X.; Zhang, D.; Kang, Y.; Dong, H. Insulation Degradation Mechanism and Diagnosis Methods of Offshore Wind Power Cables: An Overview. *Energies* **2023**, *16*, 322. <https://doi.org/10.3390/en16010322>

Authors of the publication

Ayrat M. Gataullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-6581-2400>. gataullin1969@gmail.com.

Andrey N. Gavrilenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yuri V. Piskovatskiy – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Akhmetgarey S. Minkin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено **25.05.2024 г.**

Отредактировано **19.06.2024 г.**

Принято **21.06.2024 г.**