



МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УСЛОВНОГО ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТВЁРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Гатауллин А. М. ORCID ID 0000-0002-3456-7890,

Минкин А. С. ORCID ID 0009-0008-4990-1463

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет», Казань, Российская Федерация,
e-mail: cntnur_mn@mail.ru*

Оценка остаточного ресурса твёрдой изоляции является критически важной для предотвращения аварийных отказов электрооборудования. Традиционные наиболее распространенные применяемые на практике для оперативного контроля методы диагностики, такие как измерения сопротивления мегаомметром или испытания повышенным напряжением, требуют отключения приложенного напряжения, дают лишь бинарные заключения «годен/не годен» и не позволяют количественно прогнозировать остаточный ресурс в режиме мониторинга. Цель работы заключается в разработке и экспериментальной верификации модели, которая по относительному параметру $K_{\text{отн}}$ частичных разрядов, извлекаемому из амплитудно-фазовых диаграмм, позволяет оценивать сопротивление, пробивное напряжение и условный остаточный ресурс фарфоровых изоляторов в процентах. Эксперименты выполнены на подвесных фарфоровых изоляторах и их гирляндах, состоящих из двух изоляторов, включая дефектные, при приложенном напряжении промышленной частоты 50 Гц в диапазоне от 6÷25 кВ. Регистрация частичных разрядов осуществлялась анализатором частичных разрядов, снабженным стандартными высокочастотными измерительными трансформаторами с полосой частот 1÷15 МГц. По амплитудно-фазовым диаграммам выделены частичные разряды положительной полярности диапазона 35÷430 пКл, по относительному значению которых оценены сопротивление, пробивное напряжение и условный остаточный ресурс изоляторов. $K_{\text{отн}}$ – доля таких частичных разрядов ко всем частичным разрядам положительной полярности. Модель верифицирована на исправных и дефектных образцах. Научная новизна работы заключается в том, что для фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов, выделяемых по амплитудно-фазовым диаграммам, осуществлялась и была верифицирована в лабораторных условиях количественная оценка их состояния, что является развитием метода оценки остаточного ресурса по так называемым измеряемым параметрам. В отличие от нормативных методов, предлагаемый метод позволяет бесконтактно оценивать сопротивление, пробивное напряжение и условный остаточный ресурс изоляторов и их гирлянд без отключения приложенного напряжения, что важно с практической точки зрения.

Ключевые слова: частичные разряды, амплитудно-фазовая диаграмма, условный остаточный ресурс (относительная электрическая прочность), сопротивление изоляции, пробивное напряжение, диагностика

A MODEL FOR ESTIMATING THE CONDITIONAL RESIDUAL LIFE OF SOLID INSULATION BASED ON AMPLITUDE-PHASE DIAGRAMS OF PARTIAL DISCHARGES

Gataullin A. M. ORCID 0000-0002-3456-7890,

Minkin A. S. ORCID 0009-0008-4990-1463

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Kazan State Power Engineering University», Kazan, Russian Federation,
e-mail: cntnur_mn@mail.ru*

Assessing the remaining life of solid insulation is critical for preventing failures of electrical equipment. Traditional diagnostic methods (e.g., megohmmeter measurements or high-voltage testing) require disconnecting the applied voltage, provide only a binary “pass/fail” conclusion, and do not allow quantitative prediction of residual life in monitoring mode. This study develops and experimentally verifies a model that estimates the relative residual life of solid insulation using porcelain insulators as an example. The model employs the relative partial discharge parameter K_{rel} extracted from amplitude-phase diagrams. K_{rel} is the proportion of positive-polarity partial discharges in the range 35÷430 pC to all positive-polarity partial discharges. Experiments were performed on suspended porcelain insulators (type PF-6V) and two-insulator strings, including defective samples, under 50 Hz applied voltage of 6÷25 kV. Partial discharges were recorded with a standard analyzer (1÷15 MHz bandwidth). Using K_{rel} , the model estimates insulation resistance, breakdown voltage, and relative conditional residual life (in percent). For a defective insulator, the calculated breakdown voltage (14.6 kV) agreed well with the experimental value (15 kV), deviation 2.7%. The scientific novelty is that this study presents and experimentally verifies a quantitative assessment of their condition based on partial-discharge characteristics from amplitude-phase diagrams has been developed and verified in laboratory conditions. Unlike standard methods, the proposed approach enables contactless evaluation of resistance, breakdown voltage, and relative residual life of insulators and their strings without disconnecting the applied voltage, which is essential for practical monitoring.

Keywords: partial discharges, amplitude-phase diagram, relative residual dielectric strength, insulation resistance, breakdown voltage, diagnostics

Введение

Твёрдая изоляция – ключевой элемент высоковольтного электрооборудования, и её внезапный пробой приводит к серьёзным авариям. Для фарфоровых подвесных изоляторов традиционные методы контроля (измерение сопротивления мегаомметром, испытания повышенным напряжением) дают лишь бинарную оценку «годен/не годен» согласно нормативной документации [1] и не предусматривают количественной оценки сопротивления и пробивного напряжения, хотя эти характеристики на практике являются самыми главными и оцениваются, как правило, при отключенном приложенном напряжении. Изоляторы для оценки пробивного напряжения всегда демонтируются, что ограничивает возможности оперативного персонала, учитывая огромное число изоляторов. После воздействия повышенным, или, если это возможно, пробивным напряжением вновь определяют сопротивление изоляторов, оценивая, на какую величину оно уменьшается после разрушающего воздействия. Сопротивление изоляторов чаще всего оценивается при отключенном приложенном напряжении, хотя до 10 кВ разработаны мегаомметры, способные функционировать без отключения приложенного напряжения. Такая ситуация приводит к экспоненциальному росту числа изоляторов, требующих диагностики, и делает актуальной задачу мониторинга изоляторов под рабочим напряжением. Поэтому метод частичных разрядов (ЧР) считается самым перспективным неразрушающим методом контроля состояния изоляции, но ограничен с точки зрения количественной оценки сопротивления, пробивного напряжения и остаточного ресурса под рабочим напряжением. Задача оценки сопротивления, пробивного напряжения и остаточного ресурса по измеряемым параметрам ЧР остается актуальной [2; 3], несмотря на то, что Г. С. Кучинским была предложена фундаментальная энергетическая модель старения изоляции, связывающая остаточный ресурс с мощностью ЧР и температурой [4]. Предложенные уточнённые математические модели Кучинского не дают прямой оценки остаточного ресурса по параметрам ЧР [5; 6]. Изучены и систематизированы типы повреждений изоляторов: трекинг, эрозия [7]. Изучены фундаментальные аспекты физики ЧР [8]. Типы дефектов распознавались в автоматическом режиме по характеристикам ЧР с использованием методов машинного обучения [9]. На качественном уровне изучена взаимосвязь остаточного ресурса, характеристик ЧР с концентрацией примесей и микрострукту-

рой фарфоровой изоляции [10]. Разработана методика, позволяющая по динамике характеристик ЧР на качественном уровне отслеживать развитие дефекта во времени [11]. Известны алгоритмы сопоставления АФД дефектных и образцовых изоляторов с применением методов машинного обучения, не предполагающие количественного определения остаточного ресурса [12-14]. Изучены механизмы возникновения ЧР в кавернах и их влияние на деградацию диэлектриков без инженерных формул оценки остаточного ресурса [15]. В последних работах 2026 года [16; 17] также рассматриваются вопросы диагностики изоляции высоковольтного оборудования, однако предложенные подходы не дают прямой количественной связи характеристик ЧР с пробивным напряжением и остаточным ресурсом.

Можно сделать вывод о том, что до сих в доступной литературе отсутствовала единая математическая модель, одновременно связывающая сопротивление изоляции, измеряемое мегаомметром, характеристики ЧР с условным остаточным ресурсом по пробивному напряжению (условным остаточным ресурсом). Практическая реализация метода ЧР для оценки состояния изоляторов возможна благодаря промышленным интеллектуальным датчикам серии ISPD (производства ООО «Димрус»). В этих устройствах используется экспертный анализ АФД, позволяющий идентифицировать тип дефекта по паттерну ЧР. Однако встроенная экспертная система не выдаёт простой количественной формулы, связывающей измеряемые параметры с условным остаточным ресурсом.

Цель исследования – разработать и экспериментально верифицировать такую модель для твёрдой изоляции (на примере фарфоровых изоляторов ПФ-6В), которая позволяет по параметрам ЧР количественно оценивать текущее сопротивление и пробивное напряжение, а также условный остаточный ресурс в процентах ($K_{\text{отн}}$ (рус.) / K_{rel} (англ.)). Под условным остаточным ресурсом в настоящей работе понимается отношение текущего пробивного напряжения изолятора к пробивному напряжению нового (эталонного) изолятора, выраженное в процентах. Этот показатель не является временем до отказа, а служит количественной мерой остаточной электрической прочности и используется для классификации состояния изоляции.

Материалы и методы исследования

Объектами исследований служили подвесные фарфоровые изоляторы ПФ-6В и гирлянды из двух таких изоляторов.

Испытания проводились при атмосферном давлении, температуре 300 К и относительной влажности 65%. Программное обеспечение R-400 автоматически строило АФД, определяло мощность ЧР, суммарный кажущийся заряд за 60 с. С помощью скрипта, созданного в *Python*, определяли из АФД относительное число ЧР положительной полярности в диапазоне 35÷430 пКл (по Кучинскому опасные внутренние ЧР) по отношению к общему числу ЧР положительной полярности.

Характеристика объектов исследования и эксперимента

Испытано 10 подвесных фарфоровых изоляторов ПФ-6В, извлечённых из эксплуатации. Из них по внешнему осмотру и предварительным измерениям частичных разрядов при пониженном напряжении (6 кВ) выделено: 2 заведомо исправных, 6 с признаками старения (повышенный уровень ЧР, но без внешних дефектов) и 2 дефектных. Один из дефектных образцов имел одновременно измеренные сопротивление ≈ 50 МОм и пробивное напряжение ≈ 15 кВ; именно этот образец использован для верификации модели. Остальные образцы служили для качественного сопоставления АФД. Ввиду ограниченного объёма выборки работа носит апробационный характер; окончательная верификация модели требует дополнительных испытаний на большем количестве образцов. Измерения сопротивления мегаомметром МС-05 проводились только для двух образцов: исправного (≈ 3500 МОм) и реперного (нулевого) с сопротивлением ≈ 50 МОм. Для остальных изоляторов сопротивление не измерялось. Измерения пробивного напряжения проводились только для одного дефектного изолятора (≈ 15 кВ). Для остальных образцов пробивное напряжение определялось расчётным путём по предложенной модели. Дефектность изоляторов определялась по АФД (повышенное значение $K_{отн}$). Внешних видимых повреждений (трещин, сколов) у дефектных образцов не наблюдалось.

Обоснование диапазона ЧР 35÷430 пКл

Согласно фундаментальной работе Г. С. Кучинского [4, с. 112–115], ЧР с кажущимся зарядом в интервале 30÷500 пКл в фарфоровой изоляции соответствуют внутренним разрядам в газовых включениях, наиболее опасным для деградации. Выбранный нами диапазон 35÷430 пКл полностью покрывает эту область. Проверка чувствительности показала: изменение нижней и верхней границ на $\pm 20\%$ изменяет $K_{отн}$ не

более чем на 7%, что не влияет на категорирование состояния. Параметр $K_{отн}$ вычисляется по АФД прибора R-400 для эталонных, поврежденных изоляторов и их гирлянд.

Алгоритм расчета параметра $K_{отн}$

1. Построение АФД при переменном приложенном напряжении 50 Гц.
2. Подсчет N (число ЧР положительных по знаку).
3. Подсчёт $N_{слаб}$ (число положительных по знаку ЧР в диапазоне 35÷430 пКл).
4. Подсчет $K = N_{слаб} / N$.

Для количественной оценки степени деградации введён относительный параметр $K_{отн}$ вычисляемый по АФД:

$$K_{отн} = K(U_{раб}) / K_{эм}(U_{раб}). \quad (1)$$

Эталонная зависимость для исправного изолятора получена аппроксимацией точек (6 кВ, 0) и (10 кВ, 0,11), $U \geq 6$ кВ:

$$K_{эм}(U_{раб}) = 0,0275(U - 6). \quad (2)$$

Таким образом, из (1) и (2) следует, что для исправного изолятора $K_{отн} = 1$. Рост $K_{отн}$ указывает на накопление дефектов. Ключевая идея предлагаемой модели – предположение, что как сопротивление изоляции, так и пробивное напряжение функционально связаны с $K_{отн}$, который может быть получен по характеристикам ЧР неразрушающим способом из стандартных АФД. Условный остаточный ресурс в процентах определим как отношение текущего пробивного напряжения к пробивному для эталонного изолятора при одних и тех же условиях:

$$\alpha = (U_{пр} / U_{пр.эм}) \times 100\%. \quad (3)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные данные и вычисление $K_{отн}$

Измеренные значения напряжения, тока утечки и характеристик ЧР для всех испытуемых объектов сведены в таблице 1. Для каждого образца из АФД рассчитывался параметр $K_{отн}$, а затем α , согласно (6). Это же значение можно получить из (3) с учетом (5) При напряжениях, использованных для верификации, получены следующие значения $K_{отн}$: исправный одиночный изолятор (10 кВ) – 1,00; дефектный одиночный изолятор (12,5 кВ) – 3,94; гирлянда с одним дефектным элементом (25 кВ) – приблизительно 1,12.

Для исправного изолятора при повышении напряжения до 30 кВ максимальные ЧР возрастают до 40 нКл (табл. 1), а суммарный заряд остаётся высоким.

Таблица 1

Сравнение расчётных и экспериментальных параметров

Объект	U , кВ	$K_{отн}$	$R_{расч}$, МОм	I_a , мА	$I_{ут.эксп}$, мА	$U_{пр.расч}$, кВ	$U_{пр.эксп}$, кВ
Исправный одиночный	10	1,00	3500	0,00286	0,3	100	-
Дефектный одиночный	12,5	3,94	57,2	0,219	0,5	14,6	15
Гирлянда с дефектом	25	1,12	3557	0,00703	0,4	97	-

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования. Погрешности не превышают 15%, что подтверждает адекватность модели.

Таблица 2

Оценка условного остаточного ресурса изолятора ПФ-6В

$K_{отн}$	$U_{пр}$, кВ	α , %	R , МОм	Состояние
1,00	100	100	3500	Новый
1,50	93	93	1037	Норма
2,00	80	80	438	Норма
2,50	63	63	224	Требует контроля
3,00	44	44	130	Преддефектное
3,94	15	15	57	Дефектное
5,00	2	2	28	Критическое

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

При наличии внутреннего дефекта (табл. 2) максимальные ЧР резко снижаются (до 5,4 нКл при 12 кВ), а параметр $K_{отн}$ растёт до 0,705. Параметр $K_{отн}$ извлекался из АФД.

Связь сопротивления и пробивного напряжения с $K_{отн}$

Экспериментальные значения (исправный:

$$K_{отн'эт.} = 1, R=3500 \text{ МОм};$$

дефектный:

$$K_{отн'нул.} = 3,94, R=50 \text{ МОм})$$

описываются степенной зависимостью с показателем $n = 3$:

$$R = 3500 / K_{отн}^3 \text{ МОм.} \quad (4)$$

Для дефектного изолятора при $K_{отн'нул.} = 3,94$, формула даёт

$$R = 3500 / 61,2 \approx 57,2 \text{ МОм},$$

что близко к экспериментальному 50 МОм (погрешность 14%).

Учёт поверхностных ёмкостных токов позволил снизить оценку пробивного напряжения гирлянды с 600 до 100 кВ. Связь между $K_{отн}$ и пробивным напряжением:

$$U_{пр} = 103 \exp(-0,03186 K_{отн}^3) \text{ кВ.} \quad (5)$$

Пример: для исправного изолятора

$$U_{пр} = 103 \exp(-0,03186) = 100 \text{ кВ};$$

для дефектного

$$U_{пр} = 103 \exp(-1,95) = 14,6 \text{ кВ} \\ (\text{эксперимент } 15 \text{ кВ}).$$

Из (5) получаем простую формулу для условного остаточного ресурса:

$$\alpha = \exp(-0,03186(K_{отн}^3 - 1)) \times 100\%, \quad (6)$$

В таблице 2 представлены расчётные значения $U_{пр}$ и α для нескольких значений $K_{отн}$, охватывающих наблюдаемый в эксперименте диапазон.

Прямое сравнение расчётного и экспериментального пробивного напряжения выполнено для дефектного образца: расчёт дал 14,6 кВ, эксперимент – 15 кВ, расхождение 2,7%. Для исправного изолятора и гирлянды экспериментальное определение пробивного напряжения не проводилось, приведены расчётные значения по модели. Порог 300 МОм по ПУЭ достигается при $K_{отн} = 2$ и 2,5, поэтому для $K_{отн} = 2,5$ состояние уже «Требует контроля», несмотря на $\alpha = 63\%$. Это корректно отражает нормативные требования.

Применение к гирляндам

Если один изолятор дефектный (его расчётное сопротивление 57 МОм), то условный остаточный ресурс гирлянды определяется по самому слабому изолятору. Таким образом, алгоритм оценки аналогичен слу-

чаю одиночного изолятора, но использует $K_{отн}$ гирлянды.

Если один изолятор исправен ($K_{отн,1} = 1$), а другой дефектный ($K_{отн,1} = 3,94$) то по (4) сопротивление гирлянды

$$R_{гирл} = 3500(1 + (1/61,2)) = 3557 \text{ МОм.}$$

Вклад дефектного изолятора мал (около 1,6%). Для практических расчётов допустимо приближение

$$R_{гирл} = 3500 / K_{отн,эт.}^3$$

где $K_{отн,эт.}$ – параметр бездефектного (этагонного) изолятора.

На основе полученных зависимостей предложен следующий алгоритм неразрушающей диагностики:

- 1) измерить АФД ЧР при рабочем напряжении (рекомендуется 10 кВ для одиночного изолятора, 25 кВ для гирлянды);
- 2) вычислить $K_{отн}$ по (1);
- 3) оценить сопротивление R (4) и пробивное напряжение $U_{пр}$ (5);
- 4) определить условный остаточный ресурс по формуле (3) или (6);

5) принять решение. Для лабораторных условий и изоляторов ПФ-6В предварительно могут быть рекомендованы следующие ориентировочные пороги условного остаточного ресурса: $> 70\%$ – норма, $40 \div 70\%$ – требует дополнительной диагностики спустя 6 месяцев, менее 40% – требует замены. Окончательные пороги требуют уточнения по результатам эксплуатационных испытаний на большей выборке

Статистическая обработка

Ввиду малого объёма прямых измерений сопротивления (2 образца) и пробивного напряжения (1 образец) полноценный регрессионный анализ не проводился. Проверка модели выполнена сравнением расчётного (14,6 кВ) и экспериментального (15 кВ) значений пробивного напряжения для единственного дефектного образца. Расхождение составило 2,7%, что признаётся приемлемым для инженерных диагностических целей.

Ограничения исследования

- модель проверена только на изоляторах ПФ-6В;
- испытания проведены в лабораторных условиях (температура 300 ± 5 К, влажность $65 \pm 10\%$);
- малый объём прямых измерений сопротивления и пробивного напряжения;
- результаты не могут быть без дополнительной верификации распространены на другие типы изоляции и реальные объекты.

Развивая энергетическую модель старения изоляции Кучинского [4] и подход к прогнозированию по измеряемым параметрам Коржова и др. [5], настоящая работа предлагает инженерную методику, которая позволяет определять сопротивление, пробивное напряжение и условный остаточный ресурс фарфоровых изоляторов их гирлянд по относительному параметру ЧР, в котором, по терминологии Кучинского, учитываются опасные внутренние ЧР. В отличие от работ [6; 11; 12], где диагностика сводится к качественному анализу, наша модель даёт количественную оценку в процентах. Предложенная модель для данного класса изоляторов объединяет измеряемое на практике сопротивление фарфоровых изоляторов ПФ-6В и характеристики ЧР в единый количественный инструмент для оценки условного остаточного ресурса. В отличие от предыдущих работ, где диагностика сводится к качественному анализу или статистическим моделям, предложенная модель даёт замкнутую аналитическую модель. Так, например, в [11; 12] определяли динамику развития дефектов, но не было выработано критериев выбраковки изоляторов. В [13] изучали состояние изоляции по характеристикам ЧР под воздействием постоянного приложенного напряжения, но не было разработано теории пробоя по данным ЧР.

Модель может рассматриваться как аналитическое ядро для систем мониторинга на основе стандартных анализаторов характеристик ЧР. В отличие от проприетарного программного обеспечения этих приборов, в работе предложена прозрачная и легко верифицируемая методика, которая позволяет обслуживающему персоналу самостоятельно вычислять условный остаточный ресурс по стандартным АФД без обращения к заранее определенным алгоритмам экспертной системы. С другой стороны, предложенная модель органически развивает экспертные системы разработчиков оборудования. Это особенно ценно для учебных целей и для быстрой инженерной оценки состояния изоляции непосредственно на объекте. Сравнение с единственным определенным в ПУЭ пороговым критерием выбраковки изоляторов – сопротивлением (не менее 300 МОм) – показывает, что полученное значение 3500 МОм для исправного изолятора с большим запасом ему удовлетворяет, причем оно получено как непосредственно с помощью мегаомметра, так и по характеристикам ЧР. Прямое сопоставление с литературными данными по пробивному напряжению для ПФ-6В также соответствует оценкам электрических характеристик изоляторов по данным ЧР предложенной авторами теории. Это демонстрирует работо-

способность предлагаемого подхода. Физический механизм модели – лавинообразный рост коротких встречных ЧР, шунтирующих объёмное сопротивление, вызывающих резкое падение R и U_{np} – согласуется с современными представлениями о стримерном характере ЧР перед пробоем и не противоречит работам Кучинского. Для разделения различных типов ЧР и коронных разрядов применяется АФД [14]. Предположение о встречных коротких ЧР перед пробоем и их стримерном характере объясняет степенной характер зависимостей (5) и (6). Эта оценка в перспективе может быть распространена на изоляционные материалы различного типа, для определения состояния которых можно применять стандартные анализаторы характеристик ЧР.

Заключение

В продолжение фундаментальных работ Г. С. Кучинского и развития подхода к диагностике по измеряемым параметрам, в настоящей статье предложена и экспериментально верифицирована эмпирическая модель, связывающая сопротивление изоляции, пробивное напряжение и условный остаточный ресурс с относительным параметром частичных разрядов K_{omn} , вычисляемым по АФД. Модель верифицирована на примере фарфоровых изоляторов ПФ-6В; погрешность оценки пробивного напряжения не превышает 3%. Показано, что в гирлянде дефектный элемент маскируется по сопротивлению, но может быть выявлен по возрастанию K_{omn} гирлянды на 10÷15%. Разработан практический алгоритм неразрушающей оценки условного остаточного ресурса по однократному измерению ЧР, который может служить открытой альтернативой закрытым алгоритмам промышленных датчиков.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. М.: НИЦ ЭНАС, 2003. 260 с. URL: https://www.elec.ru/viewer?url=library/direction/pue_7.pdf (дата обращения: 24.04.2026).
2. Florkowski M., Kuniewski M. Partial Discharge-Originated Deterioration of Insulating Material Investigated by Surface-Resistance and Potential Mapping // *Energies*. 2023. Vol. 16. № 16. P. 5973. DOI: 10.3390/en16165973.
3. Maresch K., Freitas-Gutierrez L. F., Oliveira A. L. et al. Advanced Diagnostic Approach for High-Voltage Insulators: Analyzing Partial Discharges through Zero-Crossing Rate and Fundamental Frequency Estimation of Acoustic Raw Data // *Energies*. 2023. Vol. 16. № 16. P. 6033. DOI: 10.3390/en16166033 (дата обращения: 24.04.2026).

4. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с. URL: <https://ru.djvu.online/file/oJsNWY2zpjArN> (дата обращения 11.05.2026).

5. Коржов А. В., Сафонов В. И., Дзюба М. А., Бабаев Р. М. о., Коростелев Я. Е. Математическая модель прогнозирования остаточного ресурса изоляции по режимным параметрам // *Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика*. 2023. Т. 23. № 1. С. 56–64. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50467321> (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.14529/power230106.

6. Голенищев-Кутузов В. А., Голенищев-Кутузов А. В., Семенников А. В., Калимуллин Р. И., Иванов Д. А. Контроль текущего рабочего состояния и прогнозирование остаточного ресурса высоковольтных изоляторов // *Известия РАН. Серия физическая*. 2023. Т. 87. № 12. С. 1823–1827. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54804666> (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.31857/S0367676523703143.

7. Georgiev G., Ivanova M., Dimitrova R., Rangelov Y. Polymeric Composite Insulators for Overhead Power Lines. A Review of In-Service Damages and Diagnostic Approaches // 2021 17th Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/ELMA52514.2021.9503054.

8. Pan C., Wu K., Meng Y., Cheng Y., Tang J. The effect of discharge area variation on stochastic characters of PD magnitude // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017. Vol. 24. № 1. P. 217–226. DOI: 10.1109/TDEI.2016.005904.

9. Montanari G. C., Shafiq M., Myneni S. B. Insulation Defect Modelling and Partial Discharge Typology Identification: A Robust and Automatic Approach // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. № 15. P. 6715. DOI: 10.3390/app14156715.

10. Sanyal S., Kim T., Yi J. et al. Failure Trends of High-Voltage Porcelain Insulators Depending on the Constituents of the Porcelain // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. № 2. P. 694. DOI: 10.3390/app10020694.

11. Gao X., Li Z., Xu Z. et al. Dynamic Severity Assessment of Partial Discharge in HV Bushings Based on the Evolution Characteristics of Dense Clusters in PRPD Patterns // *Sensors*. 2025. Vol. 25. № 24. P. 7537. DOI: 10.3390/s25247537.

12. Abubakar A., Zachariades C. Phase-Resolved Partial Discharge (PRPD) Pattern Recognition Using Image Processing Template Matching // *Sensors*. 2024. Vol. 24. № 11. P. 3565. DOI: 10.3390/s24113565.

13. Гатауллин А. М. Регистрация и обработка сигналов частичных разрядов // *Приборы и техника эксперимента*. 2014. № 4. С. 55–60. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33969451> (дата обращения: 24.04.2026).

14. Гатауллин А. М., Гавриленко А. Н., Писковацкий Ю. В., Минкин А. С. Диагностика фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26. № 5. С. 19–30. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=74034948> (дата обращения: 24.04.2026). DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-5-19-30.

15. Morshuis P. H. F. Partial discharge mechanisms in voids related to dielectric degradation // *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.* 1995. Vol. 142. № 1. P. 62–68. URL: <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/ip-smt%3A19951562> (дата обращения 16.06.2026). DOI: 10.1049/ip-smt:19951562.

16. Исмагилов Ф. Р., Демин А. Ю., Янгиров И. Ф., Кудрявцев Н. С. Импульсный резонансный генератор для испытания изоляции высоковольтного электрооборудования // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2026. Т. 22. № 1. С. 42–50. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=89213528> (дата обращения 11.05.2026). DOI: 10.17122/1999-5458-2026-22-1-42-50.

17. Гуляев И. В., Васенин А. Б., Степанов С. Е., Крюков О. В., Зюзев А. М. Экспериментальные исследования по мониторингу параметров изоляции трансформаторов // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2026. № 2 (257). С. 29–38. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=89088773> (дата обращения 11.05.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.