

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.315.624

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-2-3-16

КОМПЬЮТЕРНАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПОДВЕСНОГО ПОЛИМЕРНОГО ИЗОЛЯТОРА

Зарипов Д.К., Закиров Д.Ф., Тарасов Б.П.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
dzaripov@list.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. В процессе разработки устройств диагностирования технических объектов бывает весьма полезным создание компьютерных моделей функционирования этих объектов. Адекватная и универсальная модель, например, работающей изолирующей конструкции на опоре воздушной линии электропередачи (ВЛ) позволит существенно сократить ресурсы и время на проведение натурных экспериментов и испытаний при разработке устройств ее диагностирования. ЦЕЛЬ. Создание компьютерной модели функционирования изолирующей конструкции на опоре воздушной линии (ВЛ) и лабораторной установке с набором электрических параметров и характеристик, необходимых для диагностирования ее состояния. Задачами моделирования являлось определение распределений электрического поля, напряжений и токов в окружающем изолятор пространстве с учетом геометрии объекта, включая внешние элементы конструкции. МЕТОДЫ. Для достижения поставленной цели был использован метод конечных элементов и программа COMSOL Multiphysics. Валидация разработанных моделей осуществлялась путем сравнения результатов моделирования с измерениями электрических параметров и характеристик изоляторов, находящихся в аналогичной конфигурации лаборатории и ВЛ. РЕЗУЛЬТАТЫ. В ходе моделирования была создана модель работы подвешенного полимерного изолятора на ВЛ и в лаборатории, адекватность и универсальность которой доказана в ходе лабораторных и натурных испытаний с помощью датчиков, работающих на принципе емкостной связи и регистрации токов утечки. В ходе валидации лабораторной модели полученное расчетное значение тока утечки сухого изолятора согласуется с измеренным. Отклонение менее 5%. Выбор, по результатам моделирования, размера электрода емкостного датчика (20x20 см²) показал верность в ходе натурных испытаний опытных образцов онлайн системы контроля состояния изоляции СКАТ-ДИ на ВЛ 110 кВ.

Ключевые слова: изолирующая конструкция; диагностическая модель; метод конечных элементов; емкостный датчик контроля изоляции; ток утечки.

Для цитирования: Зарипов Д.К., Закиров Д.Ф., Тарасов Б.П. Компьютерная диагностическая модель высоковольтного подвешенного полимерного изолятора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРGETИКИ. 2026. Т. 28. № 2. С. 3-16. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-3-16.

COMPUTER DIAGNOSTIC MODEL OF A HIGH-VOLTAGE SUSPENSION POLYMER INSULATOR

Zaripov D.K., Zakirov D.F., Tarasov B.P.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
dzaripov@list.ru

Abstract: *RELEVANCE.* In the process of developing diagnostic devices for technical objects, it is often very useful to create computer models of how these objects function. An adequate and universal model, for instance, of an operating insulating structure on an overhead power line (OHL) support, can significantly reduce the resources and time required for field experiments and tests when developing its diagnostic devices. *OBJECTIVE.* To create a computer model of the operation of an insulating structure on an overhead power line (OHL) support and on a laboratory setup, with a set of electrical parameters and characteristics necessary for diagnosing its condition. The simulation tasks included determining the distributions of the electric field, voltages, and currents in the space surrounding the insulator, taking into account the object's geometry, including external structural elements. *METHODS.* To achieve the set objective, the finite element method and the COMSOL Multiphysics software were used. The validation of the developed models was carried out by comparing the simulation results with measurements of the electrical parameters and characteristics of insulators in analogous laboratory and OHL configurations. *RESULTS.* The simulation resulted in the creation of a model of the operation of a suspension polymer insulator on an OHL and in a laboratory. Its adequacy and universality were proven during laboratory and field tests using sensors based on the principle of capacitive coupling and leakage current measurement. During the validation of the laboratory model, the calculated leakage current value for a dry insulator agreed with the measured one, with a deviation of less than 5%. The selection of the capacitive sensor electrode size (20x20 cm²), based on the simulation results, was confirmed as correct during field tests of prototypes of the SKAT-DI online insulation monitoring system on a 110 kV OHL.

Keywords: *insulating structure; diagnostic model; finite element method; capacitive insulation monitoring sensor; leakage current.*

For citation: Zaripov D.K., Zakirov D.F., Tarasov B.P. Computer diagnostic model of a high-voltage suspension polymer insulator. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (2): 3-16. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-3-16.

Введение (Introduction)

Актуальность данного исследования определяется необходимостью повышения надежности высоковольтных объектов, снижения рисков отказов изоляции и улучшения предсказуемости поведения изоляционных систем в условиях изменяющихся нагрузок и внешних воздействий [1]. Моделирование служит инструментом для оптимизации материалов, геометрии и методов защиты, а также для поддержки проектирования систем диагностирования [2-5].

Компьютерное моделирование обеспечивает детальное представление пространственных распределений электрического поля, потенциала и тока внутри и вокруг изолирующей конструкции, а также взаимодействие изолятора с опорой, стальной арматурой и окружающей средой. Такой подход позволяет исследовать чувствительность конструкции к геометрическим дефектам, параметрам материалов, загрязнениям, а также к различным режимам функционирования энергосистемы.

В последние годы особое внимание уделяется многомерному моделированию с учётом нелинейной динамики электрического поля, что требует сочетания методов численного анализа, таких как метод конечных элементов (FEM), а также подходов к валидации моделирования экспериментальными данными. Методологически работа опирается на современные численные подходы к электромагнитному моделированию, включая решения уравнений Максвелла в стационарном и временном режимах, анализ полей на поверхности и внутри массивов изоляционного материала. В статье описаны выбор физической модели, граничных условий и параметров материалов, а также процедуры валидации моделирования.

Целью моделирования являлось определение распределений электрического поля, напряжений и токов в окружающем изолятор пространстве с учетом геометрии объекта, включая внешние элементы конструкции. Были смоделированы два варианта размещения полимерного изолятора: опора ВЛ и камера «тумана», установленная в лаборатории. Адекватность модели оценивалась по токам утечки через изолирующую конструкцию и потенциалу на электроде емкостного датчика [6], установленного на удалении. Полученные при моделировании данные оценивались по результатам натурных испытаний изолятора в камере «тумана» и работы опытного образца емкостного датчика на опоре ВЛ 110 кВ «Абдрахманово-Узловая».

Научная значимость исследования состоит в разработке универсальной компьютерной модели работы подвешенного полимерного изолятора на ВЛ и в лаборатории с использованием метода конечных элементов (FEM) и программного комплекса COMSOL Multiphysics. Данная модель позволяет с высокой точностью исследовать сложное распределение электрического поля, напряжений и токов в изоляторе и окружающем пространстве, учитывая его геометрию и взаимодействие с другими элементами конструкции.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанной модели для разработки и оптимизации конструкций систем диагностики, что напрямую способствует повышению эксплуатационной надежности высоковольтных изоляторов.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для моделирования был использован метод конечных элементов и программа COMSOL Multiphysics. Основные преимущества COMSOL Multiphysics [7]:

1. Мультифизическое моделирование: возможность одновременного решения задач, где участвуют несколько областей физики, например, электростатика, теплофизика и др.;
2. Удобство интеграции процессов: связка областей физики через взаимное влияние параметров на характеристики компонентов;
3. Обширная библиотека готовых модулей (Add-Ons): электрические, тепловые, механические, акустические и пр.;
4. Гибкая геометрия и сетка: автоматическое или ручное создание сеток, адаптивная оптимизация, возможность работы со сложными структурами и много объёмными расчётами;
5. Платформа для верификации и валидации: встроенные инструменты для постобработки, построения графиков и таблиц, экспорт готовых изображений и данных;
6. Визуализация и анализ результатов: продвинутые инструменты визуализации поля, потоков; экспорт в различные форматы для публикаций;
7. Поддержка и документация: обширная сеть обучающих материалов, примеры задач, инструкции по настройке симуляций;

Структурированная методология моделирования высоковольтной изолирующей конструкции с использованием COMSOL Multiphysics охватывает постановку задачи, выбор материалов, геометрию, физику, граничные условия, решатель, а также валидацию (проверку результатов моделирования в ходе натуральных испытаний).

Использованные для контроля результатов моделирования и валидации методы диагностирования изоляции по току утечки и емкостный, являются наиболее распространёнными электрическими методами [8, 9].

Ток утечки — это нежелательный ток, который проходит через изолирующую конструкцию и может указывать на состояние изоляции (загрязнение и повреждение). Измерения проводятся, как правило, с помощью трансформаторов тока или с помощью регистраторов, устанавливаемых в разрыв цепи заземления. Устройства позволяют регистрировать как изменения низкочастотной (НЧ) составляющей тока, так и высокочастотные (ВЧ) импульсы частичных разрядов (ЧР). Для установки датчиков требуется отключение напряжения на объекте.

Емкостный датчик (capacitive coupler) — это устройство, имеющее ёмкостную связь объектом. По сути, это конденсатор, включённый между объектом (изолирующей конструкцией) и входом измерителя. Конструктивно емкостная связь осуществляется с помощью электрода, размещенного на некотором удалении от объекта. Такая конфигурация (дистанционность) имеет свои преимущества – возможность монтажа без снятия напряжения, и недостаток – сигнал зависит от площади электрода и расстояния до изолирующей конструкции. Правильный выбор размеров электрода по результатам моделирования является принципиальной задачей.

Расчеты проводились в программе конечноэлементного моделирования COMSOL Multiphysics путем анализа и построения трехмерных моделей изоляторов ЛК-70/35 и ЛК-70/110, установленных в камере «тумана» (рис. 1) и на опоре ВЛ (рис. 2). Выбор этих типов изоляторов и условий эксплуатации был обусловлен исключительно возможностью сравнения компьютерной модели и работы реальных изоляторов со слабым естественным полевым загрязнением на ВЛ и в лаборатории. Модель позволяет исследовать также и сильное промышленное загрязнение, и покрытие изоляторов, например, слоем льда, поскольку имеется возможность варьировать толщину, проводимость слоя на поверхности и окружающую температуру. Другие типы подвешенных полимерных

изоляторов по электрическим и конструктивным параметрам отличаются незначительно и результаты, полученные в данной работе, могут быть распространены и на них. Что касается гирлянд стеклянных и фарфоровых изоляторов, то предполагается создание компьютерной модели, когда появится возможность валидации ее в ходе экспериментов.

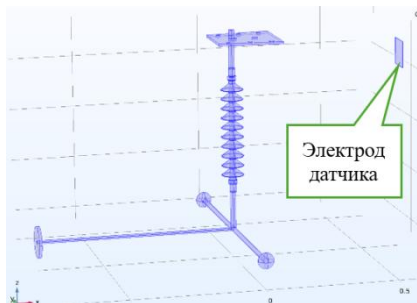


Рис. 1. Геометрия трехмерной модели изолятора ЛК70/35 и ее фотография с электродом емкостного датчика в камере «тумана»



Fig. 1. Geometry of the 3D model of the LK70/35 insulator and its photograph with a capacitive sensor electrode in the "fog" chamber

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

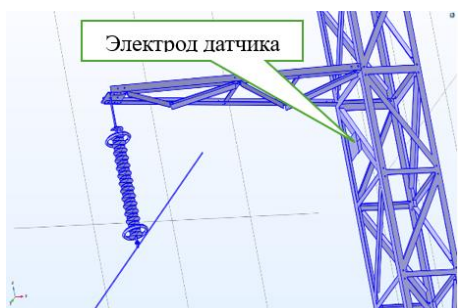


Рис. 2. Геометрия трехмерной модели изолятора ЛК70/110 и ее фотография с электродом емкостного датчика на опоре ВЛ №66 линии 110 кВ «Абдрахманово – Узловая»



Fig. 2. Geometry of the 3D model of the LK70/110 insulator and its photograph with a capacitive sensor electrode on support No. 66 of the 110 kV "Abdrakhmanovo - Uzlovaya" overhead power line

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

Для моделирования использовались два модуля COMSOL Multiphysics (AC/DC): Electric Currents и Electrical Circuit. Использование второго модуля было обусловлено необходимостью учета внутреннего сопротивления электронной схемы емкостного датчика. Величина тока утечки фиксировалась внешним устройством (осциллограф), которое в формировании модели не участвовало.

Уравнение, по которому программа COMSOL Multiphysics производила расчеты, получается из закона Ома, уравнения непрерывности и теоремы Гаусса. Для синусоидального тока с угловой частотой $\omega=2\pi f$ и изотропной среды эти выражения запишутся в виде

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = -j\omega \rho; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho; \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \cdot V; \mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}; \quad (4)$$

где $\mathbf{J}, \mathbf{E}, \mathbf{D}$ – векторы плотности тока (А/м^2), напряженности электрического поля (В/м), и электрического смещения (Кл/м^2) соответственно; V - электрический потенциал (В); σ - удельная проводимость (См/м); ρ – объемная плотность заряда (Кл/м^3); ε - диэлектрическая проницаемость материала; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; j - мнимая единица.

После подстановки выражений для \mathbf{E} и ρ в уравнение непрерывности из набора математических уравнений, решаемых программой COMSOL Multiphysics, получается уравнение Пуассона вида:

$$\nabla \cdot (-(\sigma + j\omega \varepsilon \varepsilon_0) \cdot \nabla V) = 0 \quad (5)$$

Были проведены два вида параметрических расчетов.

В первом расчете в качестве параметра использовалось значение удельного сопротивления поверхностного слоя изолятора G для имитации загрязнения и увлажнения. Загрязненный и увлажненный слой изолятора моделировался специальной границей Electric Shielding. Скалярное уравнение, описывающее поведение слоя, имеет вид:

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{J}_1 - \mathbf{J}_2) = -\nabla_s \cdot d_s((G + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_s)\nabla_s V), \quad (6)$$

где \mathbf{J}_1 и \mathbf{J}_2 – векторы плотности тока на обеих сторонах слоя загрязнения (A/m^2); d_s , G и ε_s – толщина (м), удельная проводимость (См/м) и диэлектрическая проницаемость увлажненного слоя загрязнения.

Толщина слоя d_s была выбрана в 0,3 мм из экспериментальных данных [10]. Проводимость слоя G задавалась параметрически: 0 (См/м) – сухая и чистая поверхность; $5e-4$ (См/м) – дождевая вода; $2e-2$ (См/м) – легкое загрязнение (водопроводная вода). Ранее было выяснено, что дальнейшее увеличение проводимости уже не приводит к заметному перераспределению напряжения вдоль изолятора и росту напряженности электрического поля [6]. На рисунке 3 выделены загрязненные поверхности изоляторов для двух случаев моделирования.

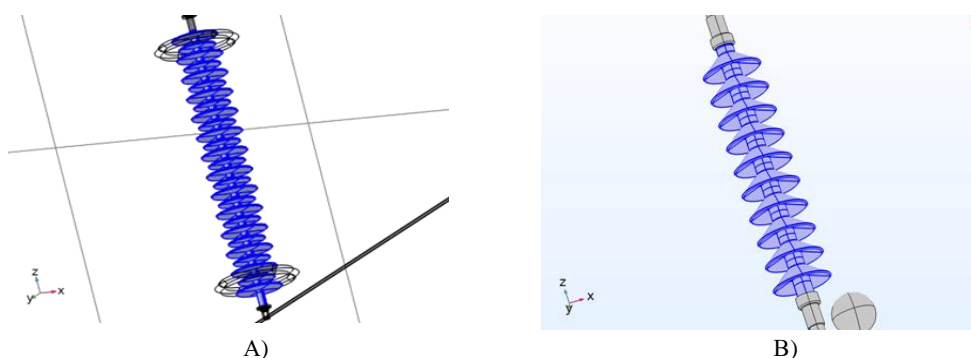


Рис. 3. Слой загрязнения на поверхности изоляторов: А – на опоре ВЛ; В – в камере «тумана»

Fig. 3. Pollution layer on the insulator surface: A - on the overhead line support; B - in the "fog" chamber

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

Во втором расчете в качестве изменяемого параметра служил размер стороны квадратного электрода емкостного датчика a . Данный расчет проводился для выбора оптимального размера электрода емкостного датчика, устанавливаемого на опоре ВЛ. Были рассмотрены три варианта электрода: $0,1 \times 0,1$ м, $0,2 \times 0,2$ м и $0,3 \times 0,3$ м. В лабораторной модели использовался электрод с $a=0,1$ м. На рисунке 4 показаны геометрии электрода со стороной 0,2 м, закрепленного к опоре и размером стороны 0,1 м, закрепленного к стенке камеры «тумана», через изолирующие стойки (не показаны). Электроды электрически связаны с землей через электронную схему емкостного датчика, измеренное сопротивление которой 20 Мом (рис. 4).

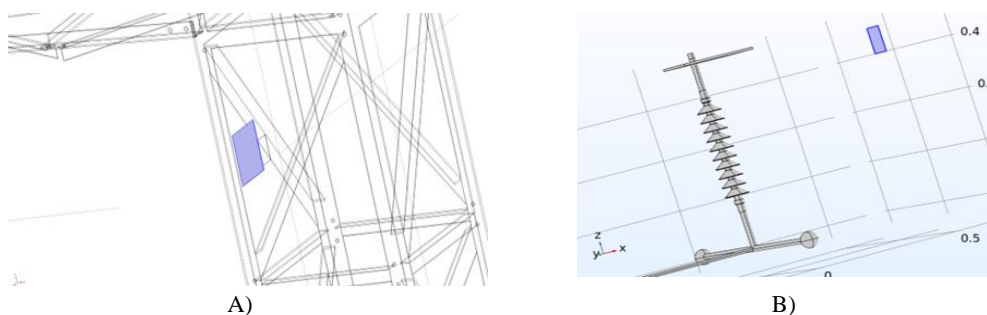


Рис. 4 Расположение электрода емкостного датчика: А - на опоре; В - на стенке камеры «тумана»

Fig. 4. Capacitive sensor electrode placement: A - on the support; B - on the wall of the "fog" chamber

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

Исходные данные для расчета в программе COMSOL Multiphysics приведены в таблице.

Исходные данные для расчета в программе COMSOL Multiphysics
The initial data for the calculation in the COMSOL Multiphysics program

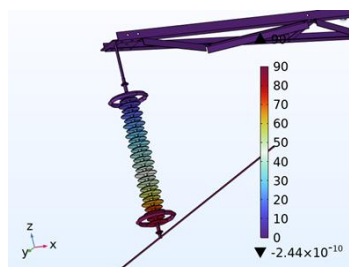
Наименование	Значение	Описание
a	0.1, 0.2 и 0.3 [м]	Длина стороны квадратного электрода
R	$2e7$ [Ом]	Внутренне сопротивление схемы емкостного датчика
G	$0, 5e-4, 2e-2$ [С/м]	Удельная проводимость слоя загрязнения
d	$3e-4$ [м]	Толщина увлажненного слоя загрязнения
sigma_air	0 [С/м]	Удельная проводимость воздуха
epsilon_air	1	Диэлектрическая проницаемость воздуха
sigma_still	$5.99e7$ [С/м]	Удельная проводимость стали (конструкция опоры)
epsilon_still	1	Диэлектрическая проницаемость стали (конструкция опоры)
sigma_al	$3.77e7$ [С/м]	Удельная проводимость алюминия (оконцеватели изоляторов и несущий провод)
epsilon_al	1	Диэлектрическая проницаемость алюминия (оконцеватели изоляторов и несущий провод)
sigma_sig	$1e-14$ [С/м]	Удельная проводимость резины (изолятор)
epsilon_sig	2.09	Диэлектрическая проницаемость резины (изолятор)
U0	42 кВ 90 кВ	Амплитуда фазного напряжения на изоляторе ЛК70/35 Амплитуда фазного напряжения на изоляторе ЛК70/110
f	50[Hz]	Частота переменного напряжения

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

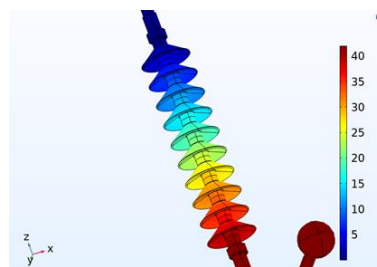
Для обоих случаев моделирования использовался решатель по умолчанию MUMPS (multifrontal massively parallel sparse direct solver).

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

На рисунках 5 и 6 показаны трехмерные распределения потенциала и напряженности электрического поля в области объекта в двух вариантах моделирования, когда изоляторы сухие.



A)

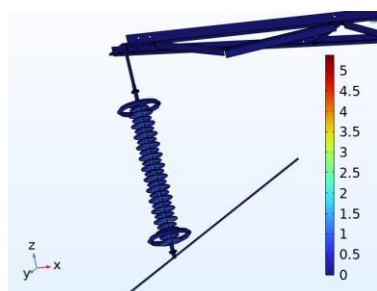


B)

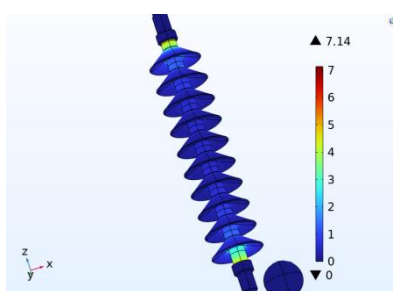
Рис. 5. Распределение потенциала (кВ): А - на опоре ВЛ; В – в камере «тумана»

Fig. 5. Electric potential (kV) distribution: A - on the overhead line support; B - in the "fog" chamber

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author



A)



B)

Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля (кВ/см): А - на опоре ВЛ; В - в камере «тумана»

Fig. 6. Electric field strength (kV/cm) distribution: A - on the overhead line support; B - in the "fog" chamber

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

Анализ распределения напряженности электрического поля показывает, что максимальная ее величина не достигает уровня возникновения частичных разрядов (ЧР). В случае с лабораторной установкой максимальная напряженность поля несколько выше, чем на опоре ВЛ (7 кВ/см против 5 кВ/см). Это объясняется близостью в лаборатории заземленных участков и отсутствием у ЛК-70/35 экранных колец. Детальное знание распределение потенциала и электрического поля в пространстве может быть полезно, например, при обосновании безопасной работы персонала под напряжением.

На рисунках 7–10 представлены графики изменения потенциала и напряженности электрического поля вдоль изоляторов при сухом состоянии и равномерном увлажнении.

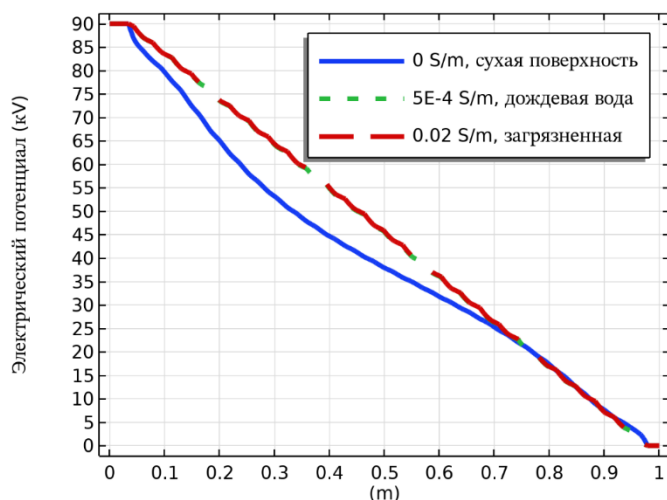


Рис.7. Распределение потенциала (кВ) вдоль изолятора на опоре ВЛ *Fig. 7. Electric potential (kV) distribution along the insulator on the overhead line support*

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

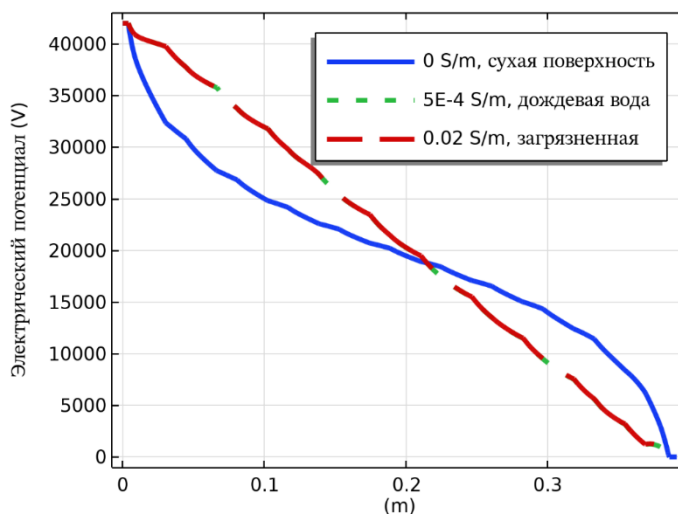


Рис.8. Распределение потенциала (кВ) вдоль изолятора в камере «тумана» *Fig. 8. Electric potential (kV) distribution along the insulator in the "fog" chamber*

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

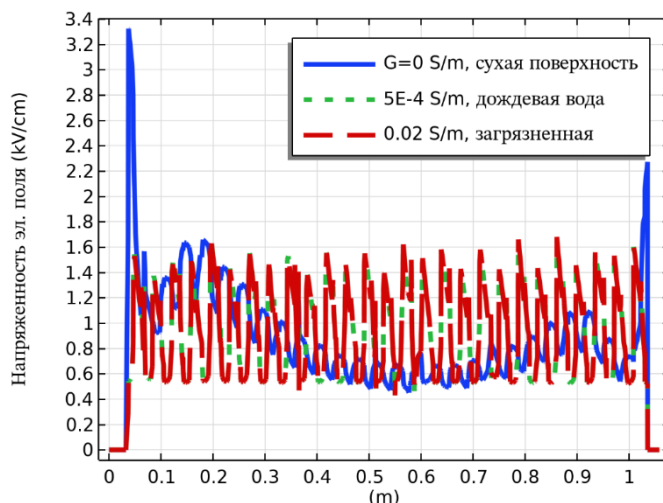


Рис. 9. Распределение напряженности электрического поля (кВ/см) вдоль изолятора на опоре ВЛ; *Fig. 9. Electric field strength (kV/cm) distribution along the insulators on the overhead line support*

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

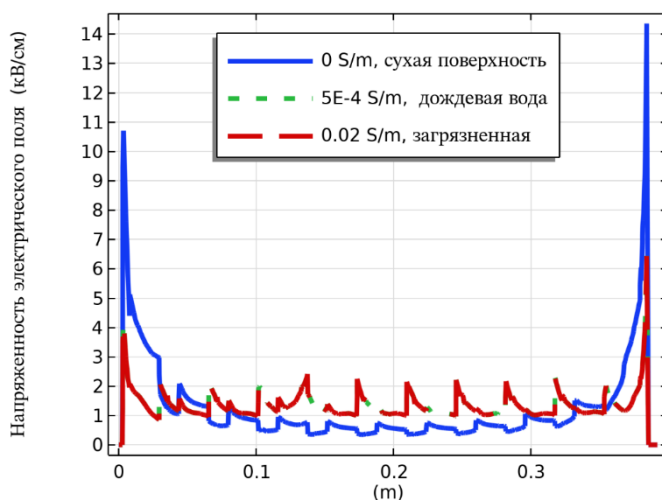


Рис. 10. Распределение напряженности электрического поля (кВ/см) вдоль изолятора в камере «тумана» *Fig. 10. Electric field strength (kV/cm) distribution along the insulator in the "fog" chamber*

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

Как видно из графиков на рисунках 6–9, при увлажнении градиент напряжения вдоль изоляторов выравнивается и пики напряженности электрического поля снижаются. Изоляторы как будто покрываются полупроводящим слоем. Это снижает разрядную деятельность на поверхности и объясняет, например, использование специальных керамических изоляторов с полупроводящим покрытием в сильно загрязненных условиях [11].

Совсем другая картина наблюдается при неравномерном увлажнении загрязненного слоя поверхности. Градиент потенциала на сухих участках поверхности изоляторов кратно возрастет. Это способствует появлению ЧР, разрушающих поверхность, и повышается вероятность перекрытия изоляции. На рисунке 11 и 12 показаны графики распределения напряженности электрического поля для полимерных изоляторов, расположенных на ВЛ и в камере «тумана». Неравномерность загрязнения и увлажнения была смоделирована для случая неоднородности поля, когда сухой участок остается или появляется под нижней юбкой изолятора, ближней к высоковольтному проводу. Повышенная вероятность такого условия связана с подогревом данного участка изолятора током на несущем проводе и повышенным градиентом потенциала. Такая ситуация одна из причин частых внезапных, «немотивированных» отключений ВЛ с низким уровнем загрязнения изоляции [12-14].

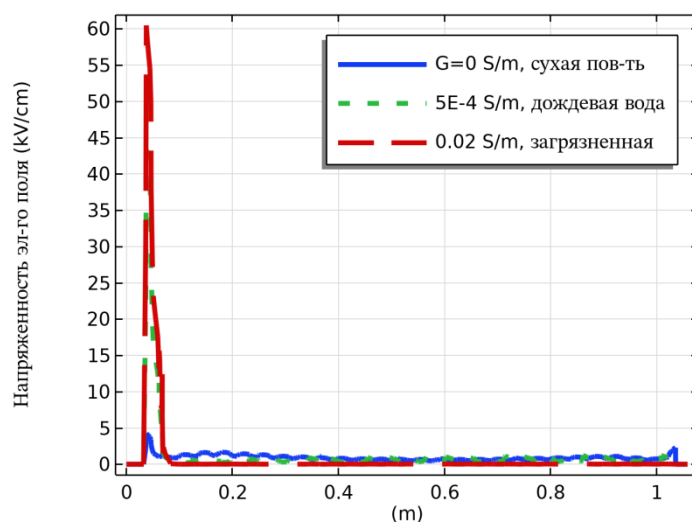


Рис. 11. Распределение напряженности электрического поля при неравномерном увлажнении изолятора на ВЛ

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

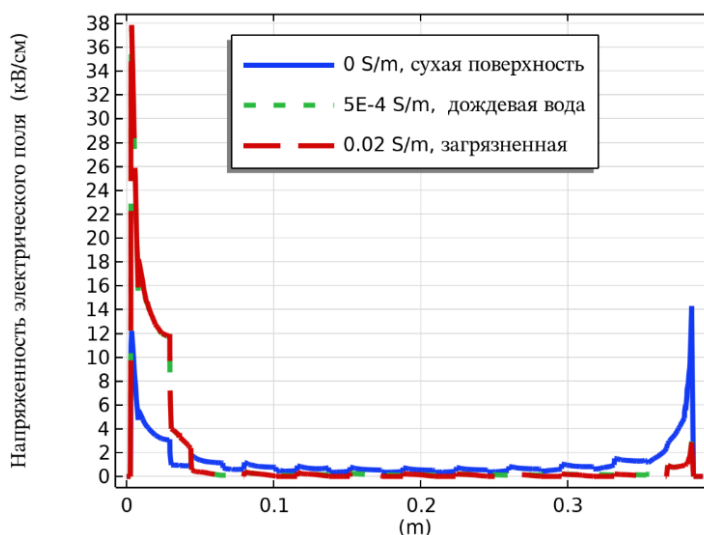


Рис. 12. Распределение напряженности электрического поля при неравномерном увлажнении изолятора в лаборатории

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

Как видно из сравнения графиков напряженности электрического поля на рис. 8–11 для равномерного и неравномерного смачиваний, величина в пике возрастает с 3,2 кВ/см до 60 кВ/см на ЛК-70/110 и с 12 кВ/см до 38 кВ/см на ЛК-70/35. В обоих случаях это намного превышает порог зажигания ЧР. Характерно также, что напряженность электрического поля практически не изменяется как при смачивании непроводящей, так и загрязненной поверхности изолятора дождевой водой. Таким образом источником ЧР на поверхности изоляции является неравномерность смачивания и разряды будут возникать даже на поверхности покрытой непроводящей пылью при дожде, тумане и выпадении росы.

Проверка компьютерной модели полимерного изолятора (ЛК-70/35) проводилась в лаборатории при экспериментах в атмосфере чистого тумана внутри климатической испытательной камеры (камеры «тумана»). Процедура подробно описана в [15].

Загрязнение изолятора, измерения и расчеты проводились в соответствии с ГОСТ 10390–2015. Туман, генерируемый пьезоэлектрическими элементами 2-х ультразвуковых увлажнителей, подавался внутрь камеры. Скорость подачи пара – 300 мл/ч. Продолжительность увлажнения при каждом эксперименте составляла около 1 часа. Влажность в камере «тумана» поднималась до 100%.

Токи утечки изолятора регистрировались при помощи цифрового осциллографа TDS2022C, связанного с персональным компьютером. Точность измерения токов $\pm 3\%$.

Температура окружающего воздуха в помещении при испытаниях была в пределах от 18°C до 24°C, относительная влажность воздуха составляла от 47 % до 64 %.»

Валидация лабораторной модели осуществлялась путем сравнения тока утечки через шину заземления модели и реально подключенного изолятора ЛК-70/35. Ток утечки брался для изолятора в сухом состоянии, поскольку при увлажнении измерения провести сложно из-за появляющихся всплесков ЧР. На рисунках 13 и 14 показаны рассчитанные программой и измеренные осциллографом значения тока утечки. Осциллограф был подключен к сопротивлению 1000 Ом, установленному в разрыв цепи заземления.

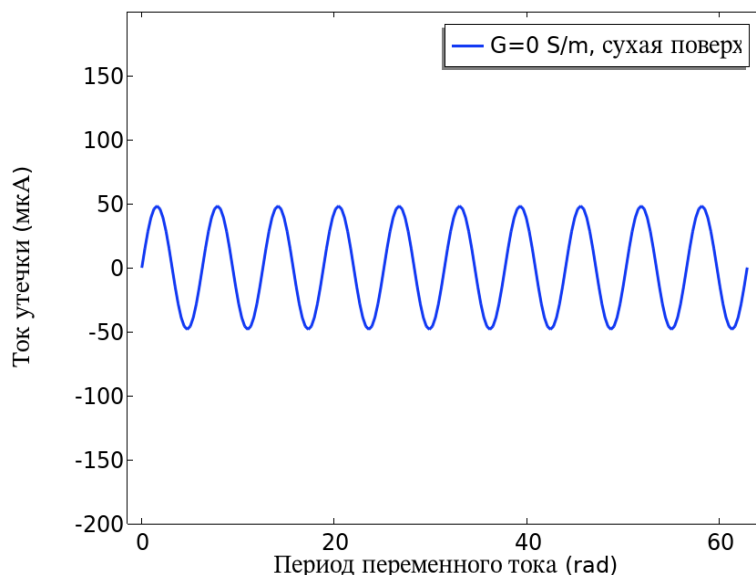


Рис. 13. Графики тока утечки рассчитанные; *Fig. 13. Leakage current graphs calculated*
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

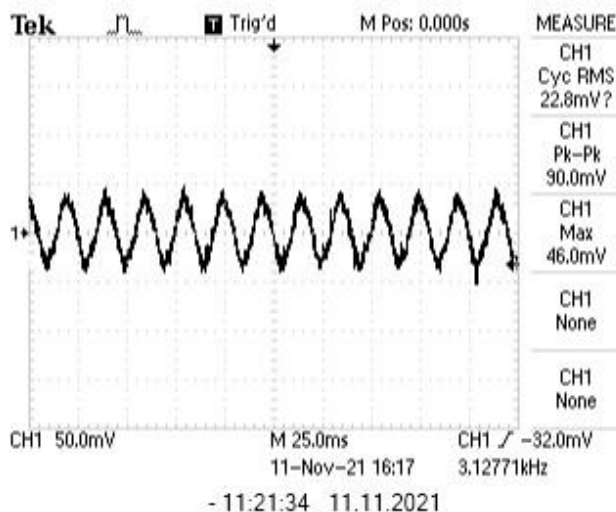


Рис. 14. Графики тока утечки с экрана осциллографа *Fig. 14. Leakage current graphs from the oscilloscope screen*
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученное расчетное значение тока утечки (48 мкА) согласуется с измеренным (46 мкА=46 мВ/1000 Ом). Отклонение менее 5%.

Одной из главных целей моделирования было определение размеров электрода емкостного датчика, изготавливаемого для установки на ВЛ. Для этого было запущено параметрическое моделирование разработанной модели с различными размерами стороны электрода – «а» (10 см, 20 см, 30 см). На рисунке 15 представлены графики одного периода напряжения на электроде при различных его размерах.

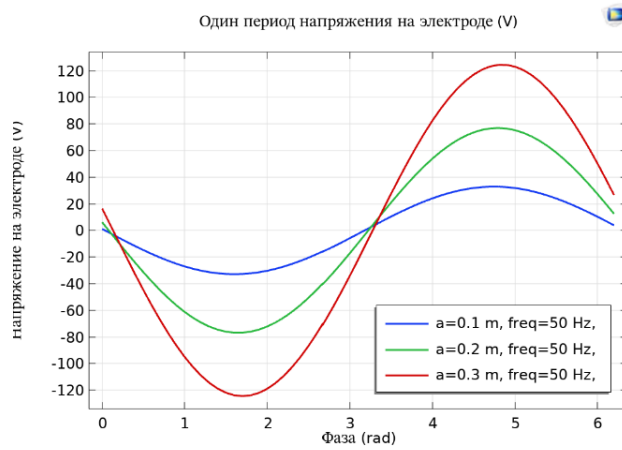


Рис. 15. Амплитуда напряжения на квадратном электроде емкостного датчика, установленного на опоре ВЛ "110 кВ в зависимости от размера его стороны «а»

Fig. 15. Voltage amplitude on the square electrode of the capacitive sensor installed on the 110 kV overhead line support versus the length of its side «a»

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

На основании созданной модели для емкостного датчика, устанавливаемого на опору 110 кВ, был выбран электрод со стороной 20 см, поскольку амплитуда напряжения при $a=10$ см находится на пороге обнаружения датчика (30–40 В) [16]. Именно с таким электродом был сконструированы и изготовлены группой компаний «Эсорт» емкостные датчики СКАТ-ДИ, проходящие опытную эксплуатацию на линии 110 кВ «Абдрахманово-Узловая» Альметьевских электрических сетей АО «Сетевая компания».

На рисунке 16 показан дневной график сигналов с датчика на опоре № 66 ВЛ.

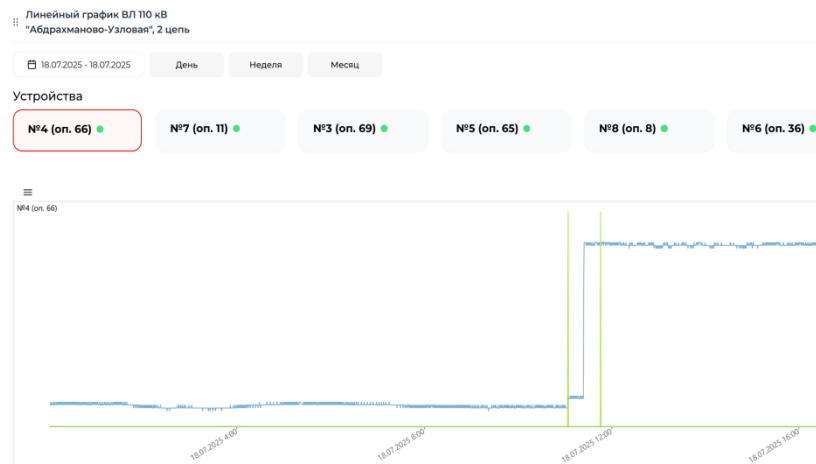


Рис. 16. Недельный график низкочастотного (синий) и высокочастотного (зеленый) сигналов от системы СКАТ-ДИ с датчика на опоре № 66, вторая цепь, фаза А

Fig. 16. Weekly graph of low-frequency (blue) and high-frequency (green) signals from the SKAT-DI system from the sensor on support No. 66, second circuit, phase A

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

На рисунке выделяется участок со скачком сигнала (синий цвет) в 12.00 18.07.2025 г., вызванный включением второй цепи данной линии. Электрод направлен в сторону изолятора на нижней фазе второй цепи. Вертикальные зеленые линии — это реакция высокочастотного канала датчика на ЧР, появившиеся на изоляторе от набегающих волн перенапряжения при коммутациях в ходе переключения.

Заключение (Conclusions)

В ходе моделирования была создана модель работы подвешенного полимерного изолятора на ВЛ и в лаборатории.

Адекватность и универсальность моделей доказана в ходе лабораторных и натуральных испытаний с помощью датчиков, работающих на принципе емкостной связи и регистрации токов утечки.

Изучение разработанной модели при неравномерном смачивании поверхности изолятора атмосферной влагой показало, что появление ЧР возможно и при отсутствии загрязнения.

В ходе валидации лабораторной модели полученное расчетное значение тока утечки сухого изолятора (48 мкА) согласуется с измеренным (46 мкА). Отклонение менее 5%.

Выбор, по результатам моделирования, размера электрода емкостного датчика (20x20 см²) показал адекватность в ходе натуральных испытаний опытных образцов онлайн системы контроля состояния изоляции СКАТ-ДИ на ВЛ 110 кВ.

Разработанная модель изолятора является базовой, позволяющей исследовать основные электрические параметры (распределение напряжения, напряженность электрического поля и токи утечки) под напряжением. В модели не увязаны напряженность электрического поля и возникновение частичных разрядов. Также, не учтены динамика градиента температур и влажности в естественной среде, влияющие на продолжительность и интенсивность разрядной деятельности на поверхности. Требуют отдельного рассмотрения вопросы длительной прочности изоляторов при тепловых и механических нагрузках в процессе старения материала.

Литература

1. Vapin Y. et al. Outage data analysis of the overhead transmission lines in kazakhstan power system // 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). – IEEE, 2020. – С. 1-6
2. Балобанов Р.Н., Булатова В.М. Анализ влияния режимов работы сухого трансформатора на состояние его изоляции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т.27. №1. С. 70-87. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-70-87.
3. Salem A.A. et al. Pollution Flashover Under Different Contamination Profiles on High Voltage Insulator: Numerical and Experiment Investigation // IEEE Access. 2021. Vol.9. P. 37800-37812. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063201.
4. Simulation of Electric Field: What & What Not to Expect [Электронный ресурс] // INMR [Сайт]. [2024]. URL: <https://www.inmr.com/simulation-of-electric-field-what-what-not-to-expect/> (дата обращения: 07.10.2025).
5. Modeling Transmission Tower Performance Using Boundary Element Method Solver [Электронный ресурс] // INMR [Сайт]. [2024]. URL: <https://www.inmr.com/modeling-electric-field-on-transmission-towers/> (дата обращения: 07.10.2025).
6. Зарипов Д.К., Балобанов Р.Н., Закиров Д.Ф. Computer simulation of the operation of the device for monitoring the state of high-voltage insulators during its operation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019, Belgorod, 31 октября – 01 ноября 2019 года. Vol. 791. Belgorod: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012037. doi: 10.1088/1757-899X/791/1/012037.
7. Comsol Multiphysics [Электронный ресурс] // Comsol [Сайт]. URL: <http://www.comsol.com/> (дата обращения: 07.10.2025).
8. Maraaba L. et al. Contamination level monitoring techniques for high-voltage insulators: a review // Energies. – 2022. – Т. 15. – No. 20. – С. 7656 <https://doi.org/10.3390/en15207656>
9. Галиева Т.Г., Иванов Д.А., Садыков М.Ф. и др. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(4):165-177. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177>
10. Lampe W. Pollution and rain flashovers on HVDC wall bushings // Proceedings., Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Beijing, China, 1988. Vol.1. P. 29-32. doi: 10.1109/ICPADM.1988.38323.
11. Абрамов В.Д., Хомяков М.В. Эксплуатация изоляторов высокого напряжения. М.: Энергия, 1976. 264 с.
12. Gorur R.S. et al. Sudden flashover of nonceramic insulators in artificial contamination tests // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1997. Vol.4.

№1. P. 79-87. doi: 10.1109/94.590870.

13. Zhang Z., Jiayao Z., Donghong W. et al. Effects of Non-uniform Pollution on the AC Flashover Performance of Suspension Insulators // Journal of Electrical Engineering and Technology. 2016. Vol.11. №4. P. 961-968. doi: 10.5370/JEET.2016.11.4.961.

14. Venkataraman S., Gorur R.S. Prediction of flashover voltage of non-ceramic insulators under contaminated conditions // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2006. Vol.13. №4. P. 862-869. doi: 10.1109/TDEI.2006.1667747.

15. Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А., Закиров Д.Ф., и др. Исследование работы полимерного изолятора при увлажнении искусственным туманом. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023;25(5):20-29. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29>

16. Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А., Закиров Д.Ф. Распределенная система контроля изоляции воздушных линий и подстанций на основе беспроводных датчиков емкостного типа // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. №1. С. 8-17. doi: 10.25791/pribor.1.2022.1314. – EDN ABQHUI.

Авторы публикации

Зарипов Дамир Камилевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова» (ЭС), Казанский государственный энергетический университет. Email: dzaripov@list.ru.

Закиров Динар Файзелханович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ). Email: qwerty2014dinar@gmail.com.

Тарасов Богдан Павлович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ). Email: tarasovbogdanpav@mail.ru.

References

1. Bapin Y. et al. Outage data analysis of the overhead transmission lines in kazakhstan power system // 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAAPS). – IEEE, 2020. – С. 1-6

2. Balobanov RN, Bulatova VM. Analiz vliyaniya rezhimov raboty sukhogo transformatora na sostoyanie ego izolyacii. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI [Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS]. 2025;27(1):70-87. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-70-87.

3. Salem AA, et al. Pollution Flashover Under Different Contamination Profiles on High Voltage Insulator: Numerical and Experiment Investigation. IEEE Access. 2021; 9:37800-37812. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063201.

4. Simulation of Electric Field: What & What Not to Expect. In: INMR; 2024. Available at: <https://www.inmr.com/simulation-of-electric-field-what-what-not-to-expect/>. Accessed: 07.10.2025.

5. Modeling Transmission Tower Performance Using Boundary Element Method Solver. In: INMR; 2024. Available at: <https://www.inmr.com/modeling-electric-field-on-transmission-towers/>. Accessed: 07.10.2025.

6. Zaripov DK, Balobanov RN, Zakirov DF. Computer simulation of the operation of the device for monitoring the state of high-voltage insulators during its operation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019, Belgorod, 31 Oct – 01 Nov 2019. 2020; 791:012037. doi: 10.1088/1757-899X/791/1/012037.

7. Comsol Multiphysics. In: Comsol. Available at: <http://www.comsol.com/>. Accessed: 07.10.2025.

8. Maraaba L. et al.; Contamination Level Monitoring Techniques for High-Voltage Insulators: A Review. Energies 2022.15(20):7656. <https://doi.org/10.3390/en15207656>

9. Galieva T.G., Ivanov D.A., Sadykov M.F. et al. 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>

10. Lampe W. Pollution and rain flashovers on HVDC wall bushings. Proceedings., Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Beijing, China, 1988;1:29-32. doi: 10.1109/ICPADM.1988.38323.

11. Abramov VD, Khomyakov MV. Ekspluatatsiya izolyatorov vysokogo napryazheniya [Operation of high-voltage insulators]. Moscow: Energiya; 1976. 264 p. (In Russ).

12. Gorur RS, et al. Sudden flashover of nonceramic insulators in artificial contamination tests. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1997;4(1):79-87. doi: 10.1109/94.590870.

13. Zhang Z, Jiayao Z, Donghong W, et al. Effects of Non-uniform Pollution on the AC Flashover Performance of Suspension Insulators. Journal of Electrical Engineering and Technology. 2016;11(4):961-968. doi: 10.5370/JEET.2016.11.4.961.

14. Venkataraman S, Gorur RS. Prediction of flashover voltage of non-ceramic insulators under contaminated conditions. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2006;13(4):862-869. doi: 10.1109/TDEI.2006.1667747.

15. Zaripov DK, Nasibullin RA, Zakirov DF, et al. Issledovanie raboty polimernogo izolyatora pri uvlazhnenii iskusstvennym tumanom. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI [Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS]. 2023;25(5):20-29. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29.

16. Zaripov DK, Nasibullin RA, Zakirov DF. Raspredeleonnaya sistema kontrolya izolyatsii vozdushnykh liniy i podstanciy na osnove besprovodnykh datchikov emkostnogo tipa. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika [Instruments and systems. Monitoring, control, diagnostics]. 2022;(1):8-17. (In Russ). doi: 10.25791/pribor.1.2022.1314.

Authors of the publication

Damir K. Zaripov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: dzaripov@list.ru.

Dinar F. Zakirov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: qwerty2014dinar@gmail.com.

Bogdan P. Tarasov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: tarasovbogdanpav@mail.ru.

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

Получено **15.10.2025 г.**

Отредактировано **03.02.2026 г.**

Принято **13.02.2026 г.**