

Пискарёва Татьяна Ивановна, к.т.н., доцент, ОГУ
Piskaryova Tatyana Ivanovna, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, OSU

Пужалина Анастасия Андреевна, студент
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина филиал в г Оренбург
Puzhalina Anastasia Andreevna, Student
Gubkin Russian State University of Oil and Gas
(National University) Branch in Orenburg

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И МЕТОДЫ ИХ РЕГУЛИРОВАНИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ RESEARCH OF ELECTRIC FIELDS AND METHODS OF THEIR REGULATION IN HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL INSTALLATIONS

Аннотация. Статья посвящена комплексному анализу методов расчета и регулирования электрических полей в изоляционных конструкциях высоковольтных электроустановок. Рассматриваются фундаментальные принципы, лежащие в основе численных методов, таких как метод конечных элементов, метод граничных элементов и метод эквивалентных зарядов, с опорой на работы авторитетных исследователей в данной области.

Abstract. The article is devoted to a comprehensive analysis of methods for calculating and regulating electric fields in insulating structures of high-voltage electrical installations. The fundamental principles underlying numerical methods, such as the finite element method, the boundary element method, and the equivalent charge method, are considered, based on the work of reputable researchers in this field.

Ключевые слова: Техника высоких напряжений, электрическое поле, метод конечных элементов, поверхностный разряд, скользящий разряд, изоляционная конструкция.

Keywords: High-voltage technology, electric field, finite element method, surface discharge, sliding discharge, and insulating structure.

Электроэнергетика, являясь фундаментальной основой технологического развития и функционирования современного общества, предъявляет исключительно высокие требования к надежности, экономической эффективности и долговечности своего оборудования. Особую роль в энергосистемах играют устройства, функционирующие в условиях высокого и сверхвысокого напряжения, к которым относятся силовые трансформаторы, высоковольтные вводы, газоизолированные линии электропередачи и коммутационная аппаратура.

Протекание физических процессов, определяющих возникновение и распространение электрического разряда в газах, жидких и твердых диэлектриках, всецело определяется значениями и характером распределения напряженности электрического поля в пространстве [1].

Целью настоящей работы является комплексный анализ современных подходов к математическому моделированию и экспериментальному исследованию электрических полей, а также систематический обзор применяемых на практике и перспективных методов управления их распределением для кардинального повышения электрической прочности и эксплуатационной надежности высоковольтных устройств.

Электрические поля установок высокого напряжения в подавляющем большинстве случаев являются полями промышленной частоты. Длина волны электромагнитного поля частоты 50 Гц составляет приблизительно $6 \cdot 10^6$ метров, что на несколько порядков превышает характерные размеры электроэнергетического оборудования, редко превышающие 150 метров. Это



фундаментальное обстоятельство позволяет рассматривать данные поля как квазистатические и описывать их, подобно электростатическим, уравнениями Лапласа и Пуассона. В случае отсутствия объемного заряда уравнение Пуассона сводится к уравнению Лапласа. Исследование поля, таким образом, сводится к решению этих дифференциальных уравнений в частных производных относительно потенциала φ при заданных граничных условиях [2].

Для случаев сложных геометрий, характерных для высоковольтного оборудования, таких как трансформаторы или вводы, аналитические методы (метод зеркальных изображений, конформных отображений, разделения переменных) становятся малоэффективными или требуют грубых приближений. Как следствие, в современной инженерной практике доминирующую роль играют универсальные численные методы, нацеленные на непосредственное решение фундаментальных уравнений поля.

Интегральные методы, к которым относятся метод граничных элементов, метод интегральных уравнений и метод эквивалентных зарядов, основаны на замене реального распределения зарядов на поверхностях электродов системой фиктивных зарядов. Их ключевым преимуществом является необходимость дискретизации только границ тел, а не всего объема, что резко снижает размерность задачи [1].

Перспективным направлением, активно развиваемым в последние годы, является гибридный метод, который позволяет комбинировать преимущества различных подходов в рамках одной задачи. Наиболее общая стратегия, согласно исследованиям, продвигаемым компанией Integrated Engineering Software [3], предполагает использование граничных элементов в линейных областях и конечных элементов – в нелинейных.

Проведенный анализ литературных данных, позволяет систематизировать ключевые факторы, влияющие на распределение поля и разрядные характеристики изоляционных конструкций. Одним из фундаментальных принципов регулирования поля является снижение максимальной напряженности за счет увеличения радиуса кривизны токоведущих частей. Для количественной оценки этого эффекта рассмотрим зависимость максимальной напряженности поля E_{\max} от радиуса кривизны r внутреннего электрода в коаксиальной системе при постоянном приложенном напряжении 100 кВ. Результаты моделирования, согласующиеся с теоретическими расчетами, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость максимальной напряженности электрического поля
от радиуса кривизны внутреннего электрода в коаксиальной системе

Радиус кривизны внутреннего электрода, мм	Максимальная напряженность электрического поля, кВ/мм	Снижение напряженности относительно базового радиуса в 1 мм, %
1,0	18,5	0,0
2,0	12,1	34,6
3,0	9,8	47,0
5,0	7,4	60,0
7,0	6,3	65,9
10,0	5,2	71,9



Данные таблицы наглядно иллюстрируют ярко выраженную нелинейную обратную зависимость (рисунок 1). Увеличение радиуса с 1 до 10 миллиметров приводит к снижению пиковой напряженности более чем в 3,5 раза. Этот принцип лежит в основе метода экранирования, когда установка дополнительных пассивных электродов-экранов со значительным радиусом закругления позволяет целенаправленно перераспределить силовые линии, снизив их концентрацию в наиболее опасных зонах [1].

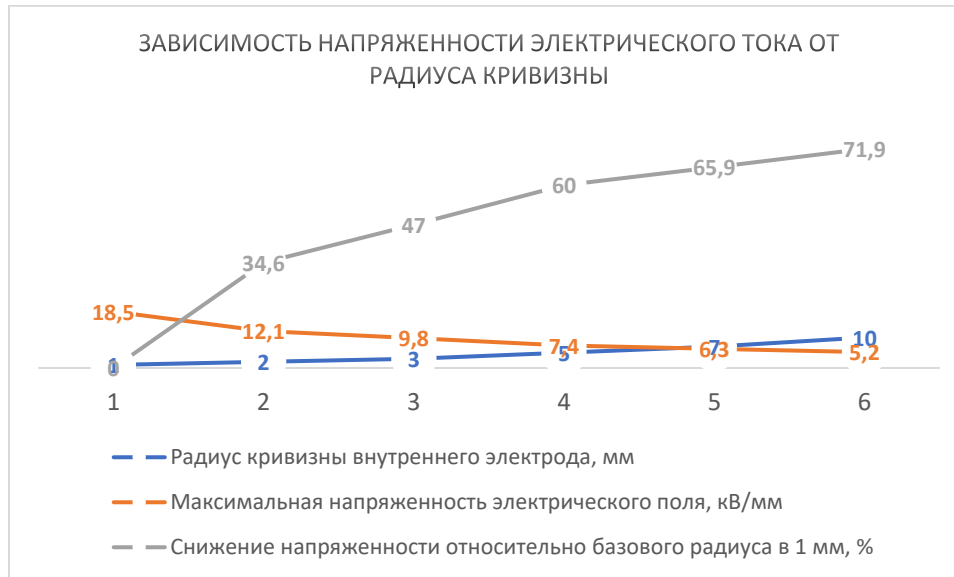


Рисунок 1 – Зависимость максимальной напряженности электрического поля от радиуса кривизны внутреннего электрода в коаксиальной системе

Проведенное исследование на основе анализа авторитетных научных и учебно-методических источников убедительно подтверждает критическую важность задач, связанных с расчетом и регулированием электрических полей в устройствах высокого напряжения. Установлено, что пространственная неравномерность распределения напряженности является основным фактором, лимитирующим электрическую прочность и эксплуатационный ресурс изоляционных конструкций. Современные численные методы, такие как метод конечных элементов и метод граничных элементов, предоставляют инженерам-разработчикам мощный инструмент для детального прогнозирования картины поля на этапе проектирования, позволяя идентифицировать и конструктивно устранять потенциально опасные зоны.

Список литературы:

1. Техника высоких напряжений: В 3 ч. Ч. 1: лабораторный практикум / А.А. Белогловский, А.М. Быкова, В.В. Воеводин и др.; под ред. А.Г. Темникова. (М.: Издательство МЭИ, 2024. (60 с.
2. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник / И.М. Бортник и др.; под ред. И.П. Верещагина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2018.
3. Исследование высоковольтных электрических аппаратов: учеб.-метод. пособие / В.И. Лузгин, И.Е. Лопатин, В.В. Рудный, С.Р. Яковенко; Минво науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 92 с.