

Научная проблема проекта «Электрический пробой»

Этап I

Королёв Иван Андреевич , Кудряшов Артём Николаевич , Оганнисян Давит Багратович , Мугари Абдерахим

21 марта 2025

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Информация

- Кулябов Дмитрий Сергеевич
- д.ф.-м.н., профессор
- профессор кафедры прикладной информатики и теории вероятностей
- Российский университет дружбы народов
- kulyabov-ds@rudn.ru
- <https://yamadharma.github.io/ru/>



- Королёв Иван Андреевич
- Студент третьего курса
- фундаментальная информатика и информационные технологии
- Российский университет дружбы народов
- 1032225751@rudn.ru

Введение

Электрический пробой — явление, при котором диэлектрик теряет изоляционные свойства при достижении критического напряжения. Происходит лавинное размножение носителей заряда, что приводит к быстрому снижению сопротивления материала и переходу в проводящее состояние.

Такие процессы встречаются:

- **В атмосфере** (например, молния),
- **В электрооборудовании** (поверхность диэлектриков, разряд между электродами)

Изучение пробоя важно для:

- Повышения надёжности изоляции,
- Предотвращения аварий,
- Оптимизации материалов.

зучение электрического пробоя важно для:

- Электроэнергетики и линий передачи энергии
- Высоковольтного оборудования
- Электронных и силовых установок.

Понимание процессов пробоя позволяет:

- Разрабатывать материалы с повышенной устойчивостью
- Оптимизировать конструктивные решения
- Предотвращать аварийные ситуации за счёт контроля над критическими режимами работы.

Физические механизмы пробоя

Развитие разряда проходит стадии:

- **Коронный разряд** – слабое свечение при низких напряжениях.
- **Стримерный режим** – образование проводящих каналов.

Модель НПВ: рост стримеров определяется локальным электрическим полем, вероятность роста ветви аппроксимируется зависимостью:

$$p(E) \sim E^\eta$$

где η — показатель роста.

- **Лидерный разряд** – образование плазменных каналов высокой проводимости

Под воздействием сильного поля происходят:

- **Ионизация** – генерация свободных носителей заряда.
- **Лавинное размножение** – экспоненциальный рост заряженных частиц
- **Формирование стримеров** – развитие проводящей структуры.

Основные уравнения

Уравнение Пуассона

Электрическое поле в среде определяется через потенциал ϕ и удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1)$$

где:

- ρ — плотность заряда,
- ε — диэлектрическая проницаемость среды.

Связь напряжённости электрического поля и потенциала:

$$E = -\nabla \phi \quad (2)$$

Движение носителей заряда описывается вторым законом Ньютона:

$$m \frac{dv}{dt} = qE - \mu v \quad (3)$$

где:

- m — масса частицы,
- q — заряд частицы,
- E — напряжённость электрического поля,
- μ — коэффициент торможения,
- v — скорость частицы.

Сохранение заряда описывается уравнением непрерывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot j = 0 \quad (4)$$

где:

- ρ — плотность заряда,
- j — плотность тока.

Связь с электрическим полем через закон Ома:

$$j = \sigma E \quad (5)$$

где σ — проводимость среды.

Коэффициент ионизации описывается экспоненциальным законом:

$$\alpha = A \exp \left(-\frac{B}{E} \right) \quad (6)$$

где:

- α — коэффициент ионизации,
- A и B — эмпирические константы,
- E — напряжённость электрического поля.

Критическое напряжение пробоя $U_{\text{кр}}$ определяется:

$$U_{\text{кр}} = E_{\text{кр}} \cdot d \quad (7)$$

где:

- $E_{\text{кр}}$ — критическая напряжённость,
- d — расстояние между электродами.

Вычисление электрического потенциала методом итераций

В однородном диэлектрике уравнение Пуассона переходит в уравнение Лапласа:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (8)$$

Метод конечных разностей для двумерного случая:

$$\phi_{i,j} = \frac{1}{4} (\phi_{i-1,j} + \phi_{i+1,j} + \phi_{i,j-1} + \phi_{i,j+1}) \quad (9)$$

Критерии и модели роста стримеров

Потенциал стримера равен потенциалу электрода, и структура влияет на распределение поля.

Для вычисления поля на границе стримера:

- Для горизонтальных и вертикальных звеньев:

$$|E| = \phi_B \quad (10)$$

- Для диагональных звеньев:

$$|E| = \frac{\phi_B}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

где ϕ_B — потенциал соседнего узла.

Вероятность роста стримера:

$$p(E) \sim E^\eta \quad (12)$$

или по флуктуационному критерию:

$$p(E) = \exp\left(\frac{E - E^*}{g}\right) \quad (13)$$

где E^* — порог напряжённости, g — параметр флуктуаций.

Численное моделирование

- Решает уравнение Пуассона
- Использует сеточную дискретизацию
- Позволяет рассчитывать распределение потенциала

- Описывают случайные процессы,
- Используются для моделирования роста разряда

- Применяются для расчёта развития разряда в пространстве,
- Используют вероятностные критерии роста

Выводы

На данном этапе мы представили модель, которая описывает процессы электрического пробоя и роста стримеров. Теоретическое описание задачи позволяет понять основные механизмы, такие как

1. **Многофакторность процесса пробоя.** Пробой зависит от множества факторов, таких как интенсивность электрического поля, характеристики материала, геометрия электродов и внешние условия. Это подтверждается различными экспериментальными исследованиями и математическими моделями.
2. **Модели и уравнения для описания процесса.** Уравнение Пуассона, законы Ома и уравнение непрерывности, а также модели ионизации, такие как модель Тауна, позволяют эффективно описывать процессы, происходящие при пробое, и дают важные данные для прогнозирования поведения материалов в экстремальных условиях.

3. **Численные методы.** Для решения уравнений и моделирования процессов пробоя и роста стримеров активно применяются численные методы, такие как метод конечных разностей и методы Монте-Карло. Эти методы позволяют моделировать сложные процессы с высоким уровнем точности и учитывают случайные флуктуации, что является важным при анализе поведения электрических разрядов.
4. **Роль повышения устойчивости материалов.** Понимание механизма пробоя и факторов, влияющих на его развитие, открывает новые перспективы для разработки материалов с улучшенными изоляционными свойствами и повышения эффективности работы высоковольтного оборудования.

Эти теоретические основы будут использованы для дальнейшего анализа и разработки программной реализации проекта.