

# **Проект: Электрический пробой**

## **Этап 4. Защита проекта**

Кадров В. М.      Туем Г.      Адабор К. Т.

# Содержание

<b>1</b>	<b>Этап 1: Модель</b>	<b>4</b>
1.1	Теоретическое введение . . . . .	4
1.2	Электрическая изоляция и диэлектрики . . . . .	5
1.3	Цель модели . . . . .	6
1.4	Пример использования модели . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Этап 2: Алгоритмы</b>	<b>8</b>
2.1	Постановка и Цель задачи . . . . .	8
2.2	Расчет электрического поля . . . . .	8
2.2.1	Аппроксимация вторых производных . . . . .	8
2.3	Численное решение . . . . .	8
2.4	Сетка . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Модель роста стримера</b>	<b>10</b>
3.1	Рост . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Этап 3: Комплексы программ</b>	<b>11</b>
4.1	Постановка задачи . . . . .	11
4.2	Задание начальных условий . . . . .	11
4.2.1	Параметры и начальные условия . . . . .	11
4.3	Расчет электрического поля (решение уравнения Лапласа) . . . . .	12
4.3.1	Решение уравнения Лапласа . . . . .	12
4.3.2	Моделирование роста стримера . . . . .	13
4.3.3	Моделирование . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Заключение</b>	<b>17</b>

# Список иллюстраций

1.1	fig1 . . . . .	4
1.2	fig2 . . . . .	5
1.3	fig3 . . . . .	6
2.1	fig4 . . . . .	9
4.1	fig5 . . . . .	13
4.2	fig7 . . . . .	16

# 1 Этап 1: Модель

## 1.1 Теоретическое введение

Электрический пробой – это явление резкого возрастания электрического тока через диэлектрик, сопровождающееся потерей его изолирующих свойств. Другими словами, это переход материала из изолирующего состояния в проводящее под воздействием сильного электрического поля.(рис. 1.1).



Рис. 1.1: fig1

Процесс разрушения диэлектрика, наступающий в ходе ударной ионизации электронами вследствие разрыва межатомных, межмолекулярных или межионных связей, называется электрическим пробоем. Продолжительность

электрического пробоя по времени лежит в диапазоне от единиц наносекунд до десятков микросекунд.

В зависимости от обстоятельств возникновения, электрический пробой может быть вредным или полезным. Пример полезного электрического пробоя — разряд на свече зажигания в рабочей зоне цилиндра двигателя внутреннего сгорания. Пример вредного пробоя — пробой изолятора на ЛЭП.(рис. 1.2).



Рис. 1.2: fig2

## 1.2 Электрическая изоляция и диэлектрики

- Электрическая изоляция не требует значительного тока, но требует значительное напряжение.(рис. 2.1).
- Диэлектрики: Диэлектрики – это непроводящие материалы (изоляторы), используемые для хранения электрической энергии в виде электрического

поля. Они поляризуются в присутствии электрического поля, то есть их молекулы выстраиваются в соответствии с полем, но не позволяют свободного перемещения электронов. Диэлектрики необходимы в конденсаторах, кабелях, трансформаторах и многих других электрических устройствах. Примеры диэлектриков: воздух, бумага, пластик, стекло, керамика, масло.(рис. 1.3)

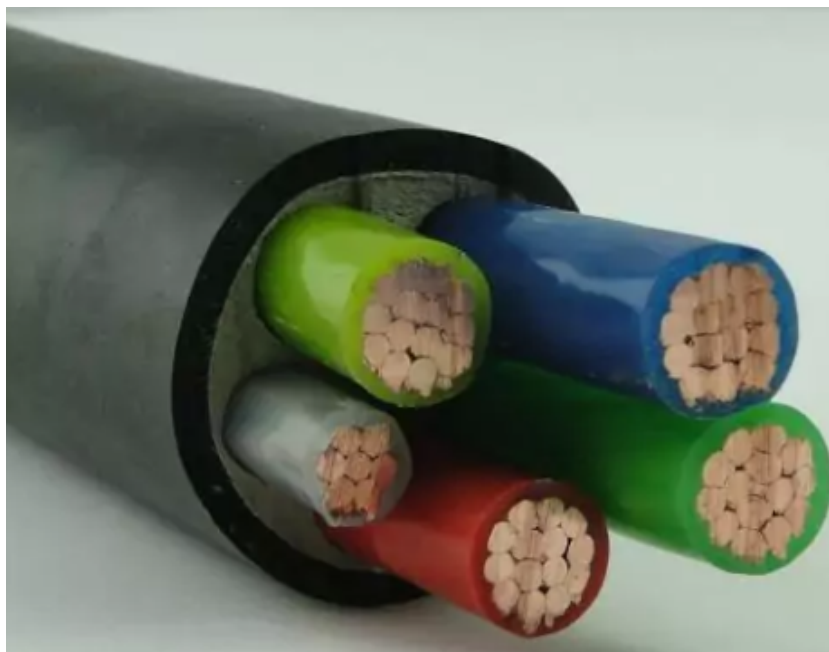


Рис. 1.3: fig3

### 1.3 Цель модели

Модель позволяет: - Исследовать зависимость электронного тока от расстояния между электродами. - Определить условия, при которых происходит электрический пробой. - Анализировать влияние параметров (напряженности поля) на процесс пробоя.

## **1.4 Пример использования модели**

Модель может быть применена для анализа пробоя в газоразрядных устройствах, таких как люминесцентные лампы или разрядники. Она также может быть расширена для учета дополнительных факторов, таких как рекомбинация, диффузия или неоднородное электрическое поле.

## 2 Этап 2: Алгоритмы

### 2.1 Постановка и Цель задачи

Необходимо разработать алгоритм для решения задачи моделирования электрического пробоя (модель Нимейера, Пьетронеро и Висмана)[1]. Всего мы имеем 2 этапа моделирования:

- Расчет электрического поля
- Итерационное моделирования роста стримера (главной ветви заряда)

### 2.2 Расчет электрического поля

#### 2.2.1 Аппроксимация вторых производных

Поскольку задача расчета поля сводится (см. Этап 1) к решению уравнения Лапласа  $\nabla^2 \varphi = 0$

### 2.3 Численное решение

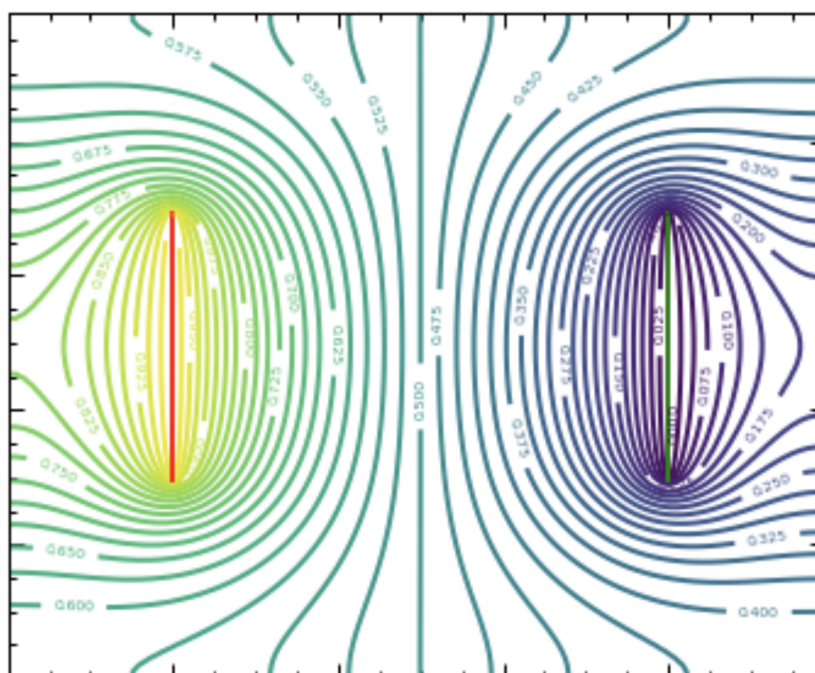
Таким образом, для решения этого уравнения методом конечных разностей нам необходимо:

1. Разбить сетку с шагом  $\Delta$
2. Задать граничные условия
3. Рассчитывать  $\varphi_{i,j}$  в каждом узле.
4. Повторять пункт 3 до достижения сходимости



## 2.4 Сетка

Часто рассматривается система, состоящая из двух горизонтальных плоских электродов, пространство между которыми заполнено диэлектриком. Удобно задать потенциал одного из электродов равным нулю. Тогда потенциал второго электрода равен приложенному напряжению. Для простоты можно рассматривать задачу в прямоугольной области, ограниченной сверху и снизу электродами, а слева и справа — вертикальными границами, на которых тоже необходимо задать граничные условия.(рис. 2.1)



## 3 Модель роста стримера

Рост начинается с одной из точек на электроде. На каждом шаге роста с некоторой вероятностью может образоваться одна веточка разрядной структуры. Эта веточка будет соединять два соседних узла сетки, один из которых уже принадлежит разрядной структуре, а другой является «диэлектриком».

### 3.1 Рост

Удобно рассматривать рост структуры с электрода, имеющего нулевой потенциал.

Обычно предполагают, что вероятность образования новой ветки приближенно равна  $p(E) \propto E^n$ .

На каждом шаге роста случайный процесс выбора новой веточки структуры реализуется следующим образом:

1. Для каждого возможного направления роста считается сумма  $Z = \sum_{k=1}^M E_k^n$
  2. Случайным образом выбирается число  $\xi$  от 0 до  $Z$
  3. Затем повторно шаг за шагом рассчитывается сумма  $Z$  до тех пор, пока текущая сумма не окажется больше  $\xi$
  4. Новой образовавшейся веточке присваивается значение потенциала того электрода, с которого она образовалась
  5. Алгоритм повторяется до тех пор, пока стример не дойдет до второго электрода.
- Таким образом, мы получаем однозвенную структуру стримера.

## 4 Этап 3: Комплексы программ

### 4.1 Постановка задачи

Необходимо написать программную реализацию решения задачи моделирования электрического пробоя на языке Julia

### 4.2 Задание начальных условий

Задаем начальные условия для расчета электрического поля: сетка 50x50, два электрода:

- К правому приложено напряжение
- На левом потенциал равен нулю, как на других границах
- Начальные значения в узлах сетки также равны нулю

#### 4.2.1 Параметры и начальные условия

```
rows, cols = 50, 50
field = fill(0.0, rows, cols)
field[:, 1] .= 0.0      # левый электрод
field[:, end] .= 100.0 # правый электрод
```

## 4.3 Расчет электрического поля (решение уравнения Лапласа)

Итерации в цикле останавливаются, если мы достигли сходимости, либо же если количество итераций превысило максимум (max\_iter).

### 4.3.1 Решение уравнения Лапласа

```
function solve_field(field; max_iter=10000, tol=1e-6)
    rows, cols = size(field)
    new_field = copy(field)
    # Основной цикл итераций
    for _ in 1:max_iter
        # Проходимся по всем узлам сетки
        for i in 2:rows-1, j in 2:cols-1
            new_field[i, j] = 0.25 * (field[i-1, j] + field[i+1, j] + field[i, j-1] + field[i, j+1])
        end
        if maximum(abs.(new_field - field)) < tol
            break
        end
        field, new_field = new_field, field
    end

    return field
end
```

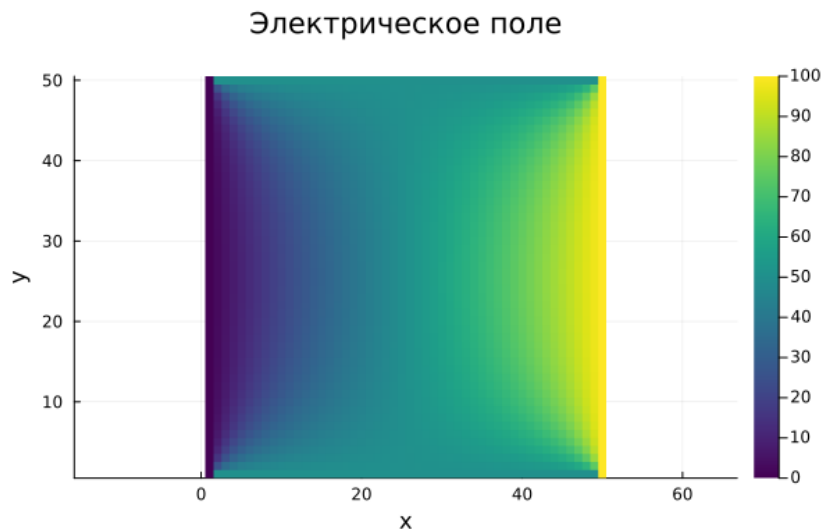


Рис. 4.1: fig5

### 4.3.2 Моделирование роста стримера

Расчитываем структуру стримера по модели НПВ (Нимейера, Пьетронеро и Висмана).

```
function grow_streamer(field, growth_factor=2.0, max_steps=10_000)
    rows, cols = size(field)
    path = [(rand(1:rows), 1)]
    # задаем максимальное количество шагов
    for _ in 1:max_steps
        curr = path[end]
        # Находим возможные направления роста
        neighbors = [(curr[1]+di, curr[2]+dj) for di in -1:1, dj in -1:1
                     if (di != 0 || dj != 0) &&
                        1 ≤ curr[1]+di ≤ rows &&
                        1 ≤ curr[2]+dj ≤ cols &&
                        !((curr[1]+di, curr[2]+dj) in path)]
```

```

    if isempty(neighbors)
        break
    end
    # Считаем сумму вероятностей и умножаем на случайное число
    probs = [abs(field[i, j])^growth_factor for (i, j) in neighbors]
    total_prob = sum(probs)
    r = rand() * total_prob

    acc = 0.0
    # Находим узел, в котором накопленная сумма превышает порог r
    for ((i, j), p) in zip(neighbors, probs)
        acc += p
        if acc > r
            push!(path, (i, j))
            break
        end
    end
    end
    # Проверяем, не достигли ли мы противоположного электрода
    if path[end][2] == cols
        break
    end
end
end

```

### 4.3.3 Моделирование

Необходимо дополнительно задать фактор роста ( $\alpha$ ) и добавить визуализацию.

```

field = solve_field(field)
path = grow_streamer(field, 3.0)

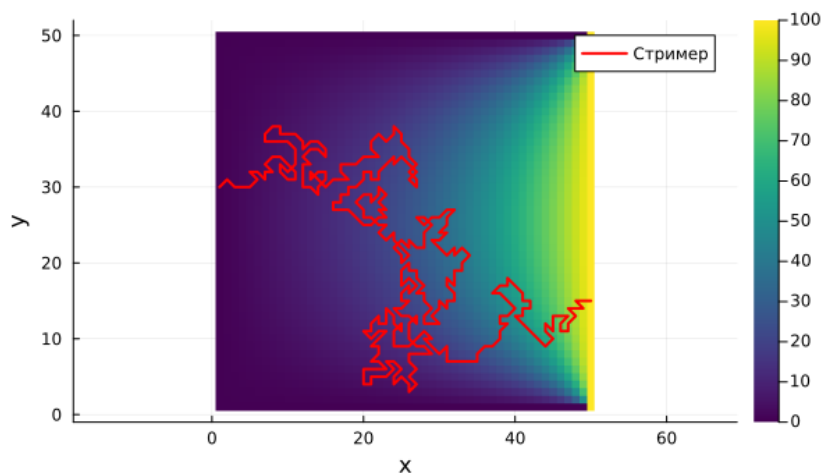
```

### Визуализация

```
heatmap(field, aspect_ratio=1, title="Электрическое поле и стример", xlabel="x", ylabel="y",  
x, y = [i for (i, _) in path], [j for (_, j) in path]  
plot!(y, x, color=:red, lw=2, label="Стример", legend=:topright)
```

Попробуем запустить моделирования с разным фактором роста

При малом параметре роста структура получается достаточно запутанной.  
Электрическое поле и стример



Хорошо видно, что чем выше показатель роста, тем более прямолинейная получается структура стримера

### Электрическое поле и стример

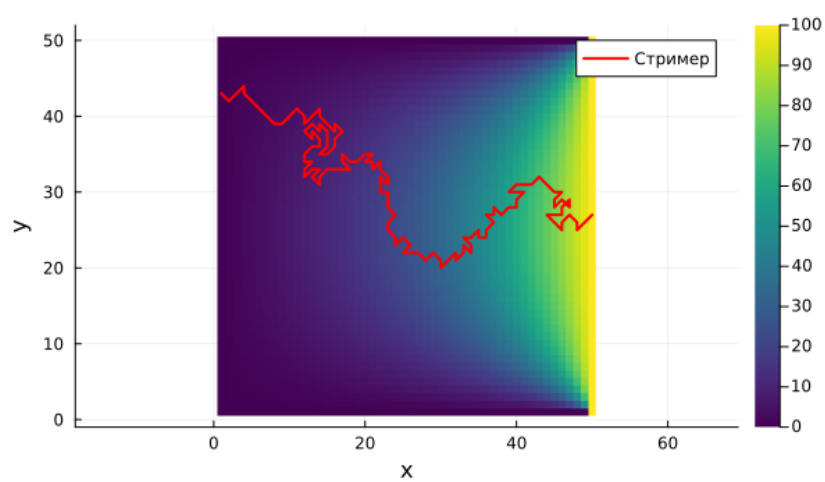


Рис. 4.2: fig7



## 5 Заключение

1. Было дано точное и полное определение электрического пробоя, стримера. Описана модель роста стримеров НПВ.
  2. Подготовлен алгоритм для решения задачи моделирования пробоя в диэлектрике.
  3. Написана программная реализация решения задачи моделирования электрического пробоя на языке Julia.
- 
1. Медведев Д. и др. Моделирование физических процессов и явлений на ПК.