


УТВЕРЖДАЮ  
Директор ЭЛТИ

  
А.П. Суржиков  
«25» ноября 2008 г.

**В.И. Меркулов**

## **РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Расчет и конструирование электроизоляционных систем  
и электротехнических изделий» для студентов IV курса,  
обучающихся по направлению  
140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»,  
специальности 140611 «Электроизоляционная,  
кабельная и конденсаторная техника»

Издательство  
Томского политехнического университета  
2008

УДК 315.61.001(076.5)  
ББК 31.264-04я73  
М52


**Меркулов В.И.**

М52 Расчет и конструирование электроизоляционных систем и электротехнических изделий: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Расчет и конструирование электроизоляционных систем и электротехнических изделий» для студентов IV курса, обучающихся по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», специальности 140611 «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника» / В.И. Меркулов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 89 с.  
ISBN 5-98298-223-7


УДК 315.61.001(076.5)  
ББК 31.264-04я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы  
к изданию методическим семинаром кафедры  
электроизоляционной и кабельной техники ЭЛТИ  
« 24 » апреля 2007 г.

Зав. кафедрой ЭИКТ  
кандидат технических наук

  
А.П. Леонов

Председатель учебно-методической  
комиссии

  
А.В. Петров

*Рецензент*

Доктор технических наук, профессор ТУСУРа  
Г.А. Воробьев

Кандидат технических наук, заведующий отделом  
ОАО «НИКИ» г.Томска  
Ю.И. Линин

ISBN 5-98298-223-7

© Меркулов В.И., 2008  
© Томский политехнический университет, 2008  
© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2008

## Предисловие

Методические указания к лабораторным работам по курсу «Расчет и конструирование электрической изоляции» содержат теоретическую часть, порядок выполнения лабораторной работы и вопросы для самоконтроля по основным разделам курсов «Расчет и конструирование электроизоляционных систем и электротехнических изделий» и «Основы конденсаторостроения» с применением ЭВМ.

Лабораторные работы позволяют студентам изучить на практике характер распределения электрического поля в различных электротехнических конструкциях, основные закономерности распределения потенциалов и напряженности электрического поля в слоистой изоляции и по поверхности подвесных и стержневых изоляторов, освоить методы исследования электрического поля и явления пробоя в изоляции, методы математической обработки полученных результатов на основе программы *Mathcad* и закрепить знания, полученные в теоретических курсах.

Описание каждой лабораторной работы включает в себя теоретическую часть, цель работы, задание, описание электрической схемы измерения, порядок выполнения работы, форму представления данных, методику обработки результатов на ЭВМ, контрольные вопросы и список необходимой литературы. Приводятся также требования к оформлению отчета и форма отчета по лабораторной работе.

## Лабораторная работа № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

#### 1. Теоретическая часть

Одним из методов расчета электрического поля различных электродных систем является метод конформных отображений, который обладает более широкими возможностями по сравнению с другими для электродов сложной конфигурации. Это метод анализа неизменных во времени двумерных электрических и магнитных полей, удовлетворяющих уравнению Лапласа. Конформное отображение заключается в геометрическом преобразовании заданной системы электродов в систему электродов, для которой известно распределение потенциалов.

Для таких преобразований используются различные отображающие функции. В качестве отображающей функции могут использоваться:

- 1) показательная  $\omega = e^z$ ;
- 2) обратная  $\omega = 1/z$ ;
- 3) логарифмическая  $z = A \cdot \ln(\omega/r_0)$ ;
- 4) интеграл Шварца–Кристоффеля:

$$\omega = \int \frac{cdz}{(z - a_1)\gamma_1(z - a_2)\gamma_2 \dots (z - a_n)\gamma_n}.$$

Рассмотрим суть конформных отображений.

Расположим оси декартовой системы в исследуемом поле так, чтобы ось  $Z$  была перпендикулярна полю. Тогда положение точки на плоскости  $Z(x,y)$  будет характеризоваться координатами в комплексной форме:

$$Z = x + jy. \quad (1)$$

Совокупность точек  $(x,y)$ , принадлежащих эквипотенциальной линии, обозначим  $U = U(x,y)$ , а совокупность точек, принадлежащих силовой линии, обозначим  $V = V(x,y)$ . Так как силовые и эквипотенциальные линии взаимно перпендикулярны, то одну из данных функций можно принять в качестве действительной, а другую в качестве мнимой части, т. е.

$$\omega = U + jV. \quad (2)$$

Число  $\omega$  называют комплексным потенциалом, который описывает совокупность силовых и эквипотенциальных линий поля, т. е. его ортогональную сетку. Если считать, что  $U$  – потенциальная функция, а  $V$  – функция потока, характеризующего это поле, то проекции вектора напряженности на осях  $x,y$  будут, соответственно, равны:

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}; E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}. \quad (3)$$

Отсюда модуль напряженности поля

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \left| \frac{\partial \omega}{\partial z} \right|. \quad (4)$$

Исходя из определения, конформными преобразованиями будут являться преобразования совокупности точек плоскости  $z = x + jy$  в совокупность точек плоскости  $\omega = U + jV$ , осуществляемые с помощью аналитической функции

$$\omega = U + jV = f(x + jy) = f(z) = \rho e^{j\varphi}. \quad (5)$$

Пересчет от напряженности поля  $E_\omega$  в плоскости  $\omega$  к напряженности  $E_z$  в исходной плоскости  $Z$  производится согласно следующим соотношениям:

$$E_z = E_\omega \frac{d\omega}{dz} \quad \text{или} \quad (6)$$

$$E_\omega = E_z \frac{dz}{d\omega}. \quad (7)$$

Следует отметить, что при переходе из одной системы координат  $\omega$  в другую  $Z$  (или наоборот) происходит сохранение постоянства углов. Это показано на рис. 1.

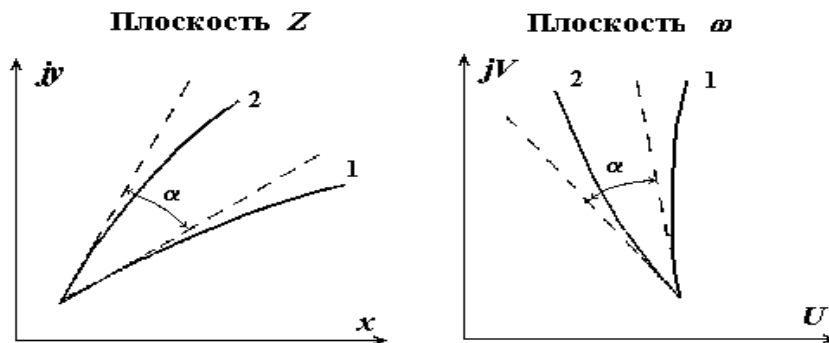


Рис. 1. Сохранение постоянства углов при конформном преобразовании

Функция  $\omega$  называется аналитической, если производная  $d\omega/dz = \lim(\Delta\omega/\Delta z)$  не зависит от направления, вдоль которого взято приращение  $\Delta z$ , т. е. производная должна быть одна и та же, если приращение  $dz$  один раз взять вдоль оси  $x$  ( $dz = dx$ ), а другой раз вдоль оси  $y$  ( $dz = jdy$ ).

Приращение вдоль  $x$   $\Delta_x\omega = \Delta_x U + j\Delta_x V$ .

Приращение вдоль  $y$   $\Delta_y\omega = \Delta_y U + j\Delta_y V$ .

Тогда  $\frac{\partial\omega}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial x} + j\frac{\partial V}{\partial x}$ ;  $\frac{\partial\omega}{j\partial y} = -\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y}$ ,

т. к.  $\frac{\partial\omega}{\partial x} = \frac{\partial\omega}{j\partial y}$ , то, приравнявая правые части, получаем:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad \text{— это уравнение Коши–Римана.} \quad (8)$$

После дифференцирования получим

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y}; \quad \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = -\frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y}.$$

После их сложения получим

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0 \quad \text{— это уравнение Лапласа.} \quad (9)$$

**Пример 1. Преобразование равномерного поля на плоскости  $Z$  в поле верхней полуплоскости  $\omega$**

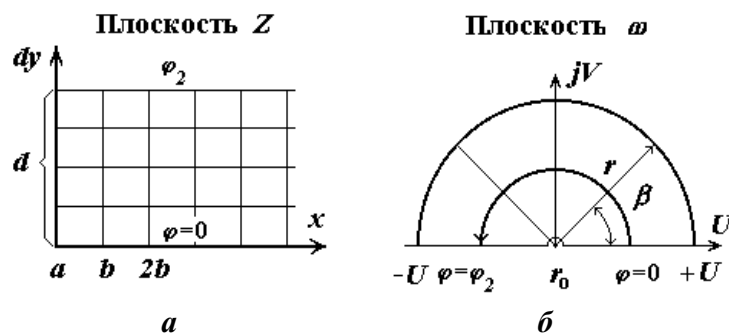


Рис. 2. Преобразование равномерного поля (а) в поле верхней полуплоскости (б)

Координату некоторой точки на плоскости  $\omega$  (рис. 2) запишем в полярной системе координат:

$$\omega = r \cdot e^{j\beta}. \quad (10)$$

Свяжем переменные  $Z$  и  $\omega$  соотношением

$$z = x + jy = A \ln \frac{\omega}{r_0} = A \ln \frac{r \cdot e^{j\beta}}{r_0} = A \left( \ln \frac{r}{r_0} + e^{j\beta} \right), \quad (11)$$

где  $A$  и  $r_0$  – некоторые постоянные. Тогда

$$x = A \ln \frac{r}{r_0}; \quad y = A \cdot \beta. \quad (12)$$

На плоскости  $Z$  (рис. 2) показано равномерное поле, образованное двумя плоскими электродами. Один электрод совпадает с осью  $x$  и имеет потенциал  $\varphi_1 = 0$ . Второй электрод удален от оси  $x$  на расстояние  $d$  и имеет потенциал  $\varphi_2$ . Эквипотенциали – это прямые, параллельные оси  $x$ , а силовые линии параллельны оси  $y$ .

На плоскости  $\omega$  при использовании полярной системы координат линии равного потенциала (эквипотенциали) будут соответствовать линиям  $A\beta \neq const$ , т. е. будут являться лучами, проведенными из начала координат, а силовые линии – полуокружностями.

Положим, что эквипотенциаль  $y = d$  плоскости  $Z$  отображена на плоскости  $\omega$  отрицательной полуосью ( $-U$ ), а эквипотенциаль  $y = 0$  – положительной полуосью ( $+U$ ).

Точке  $\omega = 0$  соответствует  $x = -\infty$ . Определяем, исходя из этого, постоянную  $A$ . Согласно рис. 2, полуоси ( $-U$ ) соответствует угол  $\beta = \pi$  (по направлению от  $\varphi = 0$  до  $\varphi = \varphi_2$ ).

Поэтому  $y = d = A\beta = A\pi$ , т. е.  $A = \frac{d}{\pi}$ .

Найдем соответствие между силовыми линиями в плоскости  $Z$  и в плоскости  $\omega$ .

Силовой линии

$$x = 0 = A \ln \frac{r}{r_0} = \frac{d}{\pi} \ln \frac{r}{r_0} \quad (13)$$

соответствует полуокружность радиусом  $r = r_0$ , где  $r_0$  – произвольный радиус, играющий роль единицы измерения.

Силовой линии

$$x = b = A \ln \frac{r}{r_0} = \frac{d}{\pi} \ln \frac{r}{r_0} \quad (14)$$

соответствует полуокружность радиусом  $r = r_0 e^{\frac{b\pi}{d}}$ .

Силовой линии

$$x = 2b = A \ln \frac{r}{r_0} = \frac{d}{\pi} \ln \frac{r}{r_0} \quad (15)$$

соответствует полуокружность радиусом  $r = r_0 e^{\frac{2b\pi}{d}}$ .

Таким образом, поле в верхней полуплоскости  $\omega$ , конформно отображающее равномерное поле на плоскости  $Z$ , образовано двумя полупрямыми, совпадающими с осями  $(+U)$  и  $(-U)$ , которые отделены друг от друга в точках  $\varphi = 0$ , разность потенциалов между которыми равна  $\varphi_2$ .

### Пример 2. Применение интеграла Шварца–Кристоффеля

Рассмотрим картину поля на краю плоского конденсатора (рис. 3). Оси координат на плоскости  $Z$  расположим так, чтобы ось  $x$  совпала со средней линией конденсатора, а ее потенциал примем равным нулю. Верхний электрод, будучи параллелен оси  $x$ , удален от нее на расстояние  $h = d/2$ , простирается от точки  $b$  до  $-\infty$  и имеет потенциал  $\varphi_2$ .

На рис. 3, б ломаной линией  $z_0 - z_1 - z_2 \dots z_n$  в данном случае является линия, состоящая из трех участков.

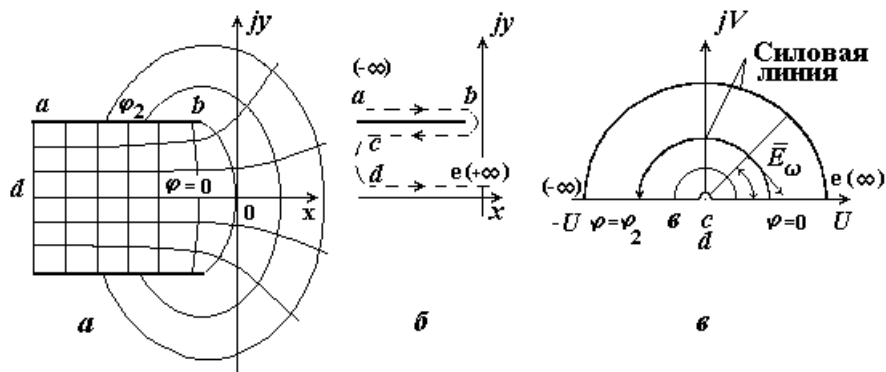


Рис. 3. Построение картины поля на краю плоского конденсатора

Первый участок идет по верхней части электрода из точки  $a(-\infty)$  до точки  $b$ . Участок расположен параллельно оси  $x$ , поэтому  $\gamma\pi = 0$ .

Второй участок идет от точки  $b$  до точки  $c(-\infty)$  и проходит по нижней части электрода. Так как угол между 1-м и 2-м участком вдается в поле и численно равен  $\pi$ , то  $\alpha_1 = 1$ .



Третий участок идет от точки  $c$  ( $-\infty$ ) до точки  $e$  вдоль положительного направления оси  $x$  ( $+\infty$ ). В данном случае при переходе от 2-го участка к 3-му электрическое поле вдается в электрод, поэтому  $\alpha_2 = -1$ . Запишем уравнение Шварца–Кристоффеля

$$dz = A(\omega - U_1)^{\alpha_1} (\omega - U_2)^{\alpha_2} \dots (\omega - U_n)^{\alpha_n} e^{j\gamma\pi} d\omega. \quad (16)$$

Здесь  $A$  – некоторая постоянная;  $U_1, U_2 \dots U_n$  – точки на оси  $U$ , соответствующие одноименным точкам  $z_1, z_2, z_3 \dots z_n$  (в нашем случае  $a, b, c, d, e$ ).

Линию  $ab$  плоскости  $Z$  отразим на отрицательную полуось ( $-U$ ) плоскости  $\omega$  так, чтобы точка  $a$  находилась в точке  $U = -\infty$ ; точка  $b \rightarrow$  в точке  $U = -r_0 = -1$ ; точка  $c$  и  $d \rightarrow$  в точке  $U = 0$ ; точка  $e \rightarrow$  в точке  $U = +\infty$ .

Тогда можно записать:

$$dz = A(\omega + 1)^1 (\omega - 0)^{-1} d\omega; \quad (17)$$

$$z = x + jy = A \int (\omega + 1) \omega^{-1} d\omega + C_1 + jC_2; \quad (18)$$

$$z = A(\omega + r_0 \ln \frac{\omega}{r_0}) + C_1 + jC_2. \quad (19)$$

На плоскости  $\omega$  будем пользоваться полярной системой координат  $\omega = r \cdot e^{j\beta}$ . Разделяя действительные и мнимые части, находим:

$$x = A(r \cos \beta + r_0 \ln \frac{r}{r_0}) + C_1; \quad (20)$$

$$y = A(r \sin \beta + r_0 \beta) + C_2. \quad (21)$$

Определяем постоянные интегрирования  $C_1, C_2$  и  $A$ .

Постоянную  $C_2$  найдем из условия, что для участка ( $dc$ ) плоскости  $Z$  имеем  $y = 0$ . Тогда, подставляя  $\beta = 0$  и  $y = 0$  в уравнение (21), получаем  $C_2 = 0$ .

Для нахождения  $A$  учтем, что для участка ( $ab$ ) плоскости  $Z$   $y = h$ , а на плоскости  $\omega$  этому участку соответствует  $\beta = \pi$ . Подставляя эти данные в уравнение (21), находим

$$h = A(r \sin \pi + r_0 \pi) + 0, \text{ т. е. } A = \frac{h}{\pi}. \quad (22)$$

Подставляя данные, соответствующие точке  $b$   $x = -h/\pi$  и  $\beta = \pi$ , в уравнение (20), находим  $C_1 = 0$ . Учитывая, что  $r_0 = 1$ , переписываем эти уравнения:

$$x = \frac{h}{\pi} \left( r \cos \beta + \ln \frac{r}{r_0} \right); \quad (23)$$

$$y = \frac{h}{\pi} (r \sin \beta + \beta). \quad (24)$$

Эквипотенциалами на плоскости  $\omega$  являются прямые  $\beta = const$ .

Для построения на плоскости  $Z$  эквипотенциалей  $\varphi = const$ , где  $\varphi_2 > \varphi > 0$ , поступаем следующим образом.

Находим угол  $\beta = \varphi \cdot \pi / \varphi_2$ , подставляем найденное значение  $\beta$  в уравнения (23) и (24) и, придавая отношению  $r/r_0$  различные значения, определяем координаты  $x$  и  $y$  точек искомой эквипотенциали.

Для построения силовой линии в формулах (23) и (24) следует положить, что  $r = const$ , и изменить угол  $\beta$  от  $0$  до  $\pi$ .

При условии, что  $\varphi_2 = \pi r E_\omega$ , найдем напряженность поля  $E_\omega$  на плоскости  $\omega$ :

$$\vec{E}_\omega = \frac{\varphi_2}{\pi r} e^{j\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)}. \quad (25)$$

Напряженность поля  $E_z$  на плоскости  $Z$  найдем из условия:

$$\vec{E}_z = \vec{E}_\omega \left( \frac{d\omega}{dz} \right). \quad (26)$$

Тогда

$$\vec{E}_z = -j \frac{\varphi_2}{rh} \left( \frac{\omega}{\omega + r_0} \right) e^{j\beta}. \quad (27)$$

## 2. Практическая часть

### 2.1. Цель работы

Изучить метод конформных отображений как способ расчета и построения картины электрического поля в конденсаторах.

### 2.2. Задачи работы

Освоить методику расчета силовых и эквипотенциальных линий электрического поля в конденсаторах на основе метода конформных отображений и построить картину электрического поля на краю его обкладок.

### 2.3. Порядок выполнения работы

Рассмотрим расчет силовых и эквипотенциальных линий электрического поля на примере плоского воздушного конденсатора. Проведение расчетов и построение графиков распределения электрического поля проведем на ЭВМ с использованием программы *Mathcad*.

**2.3.1.** Зададим исходные данные. Расстояние между обкладками конденсатора возьмем равным  $d$  (в см), расстояние от центра конденсатора вдоль обкладок зададим в виде матрицы  $b$  (в см). В соответствии с рис. 2 и рис. 3 зададим значения:  $r_0 = 1$  см,  $r = 1 \div 10$  см,  $\beta = 0 \div \pi$ . Конкретное значение угла  $\beta$  вычислим по уравнению

$$\beta_n = c_n n,$$

где  $c_n$  – коэффициент, заданный в виде матрицы  $c$ .

#### Исходные данные

$$\begin{array}{l} \text{ORIGIN} := 1 \qquad n := 1..10 \qquad i := 1..10 \qquad d := 5, \text{ см} \qquad r_4 := 2, \text{ см} \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad r_0 := 1, \text{ см} \qquad r_5 := 5, \text{ см} \\ b := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{pmatrix} \qquad c := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \end{pmatrix} \qquad r := r_0 \cdot e^{\frac{b \cdot \pi}{d}}, \text{ см} \qquad r_6 := 10, \text{ см} \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \beta_1 := \frac{\pi}{9} \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \beta_2 := \frac{\pi}{3} \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \beta_3 := \frac{\pi}{2} \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \beta_n := c_n \cdot \pi \end{array}$$

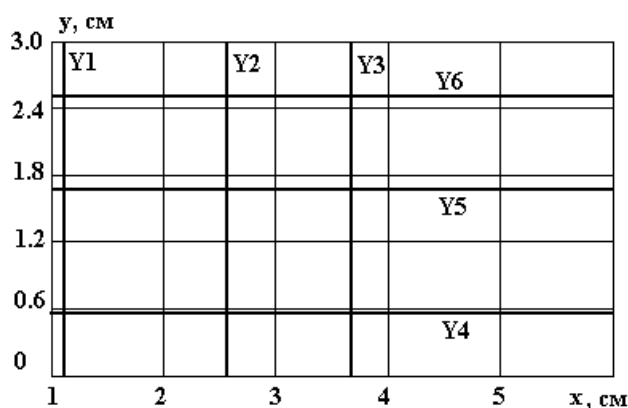
**2.3.2.** Произведем расчет значений координат точек  $x$  и  $y$  силовых и эквипотенциальных линий в соответствии с уравнениями (13, 14, 15) для примера 1, т. е. в средней части конденсатора.

$$x_n := \frac{d}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_n}{r_0}\right) \qquad y_n := \frac{d}{\pi} \cdot \beta_n$$

**2.3.3.** Для построения трех силовых линий произведем расчет координат  $X_{1_n}, Y_{1_n}$ ;  $X_{2_n}, Y_{2_n}$ ;  $X_{3_n}, Y_{3_n}$ , а координат  $X_{4_n}, Y_{4_n}$ ;  $X_{5_n}, Y_{5_n}$  и  $X_{6_n}, Y_{6_n}$  – для построения эквипотенциальных линий.

$$\begin{aligned}
X1_n &:= \frac{d}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{r4}{r0}\right) & Y1_n &:= \frac{d}{\pi} \cdot \beta_n & X4_n &:= \frac{d}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_n}{r0}\right) & Y4_n &:= \frac{d}{\pi} \cdot \beta_1 \\
X2_n &:= \frac{d}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{r5}{r0}\right) & Y2_n &:= \frac{d}{\pi} \cdot \beta_n & X5_n &:= \frac{d}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_n}{r0}\right) & Y5_n &:= \frac{d}{\pi} \cdot \beta_2 \\
X3_n &:= \frac{d}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{r6}{r0}\right) & Y3_n &:= \frac{d}{\pi} \cdot \beta_n & X6_n &:= \frac{d}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_n}{r0}\right) & Y6_n &:= \frac{d}{\pi} \cdot \beta_3
\end{aligned}$$

**2.3.4.** Построим график распределения силовых и эквипотенциальных линий между обкладками плоского конденсатора в средней его части в соответствии с примером 1.



*Рис. 4. График распределения силовых и эквипотенциальных линий в плоском конденсаторе*

**Примечание.** Значения величины  $r_n$  и угла  $\beta_n$  выбираются самостоятельно или по заданию преподавателя.

**2.3.5.** Произведем аналогичные расчеты координат силовых и эквипотенциальных линий на краю обкладок плоского конденсатора в соответствии с примером 2 по уравнениям (23, 24).

**Исходные данные**

	1
1	0
2	0.1
3	0.2
4	0.3
5	0.4
6	0.5
7	0.6
8	0.7
9	0.8
10	0.9

$$c =$$

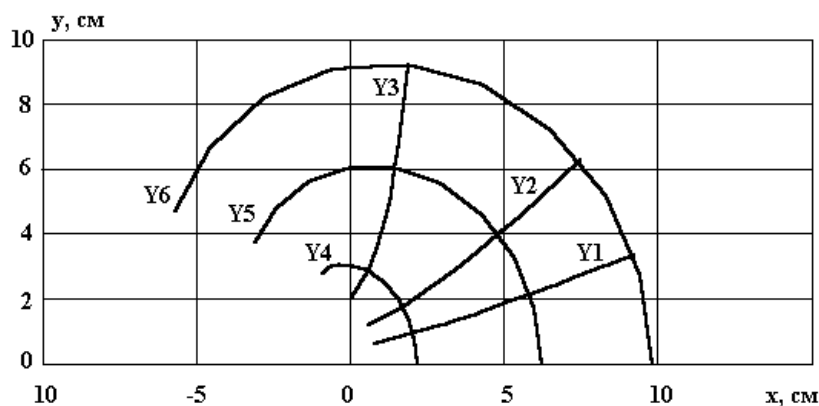
$$r1 := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\text{ORIGIN} &:= 1 & n &:= 1..10 & i &:= 1..10 \\
h &:= \frac{d}{2} & h &= 2.5 & \beta_1 &:= \frac{\pi}{8} \\
\beta_n &:= c_n \cdot \pi & r4 &:= 2 & \beta_2 &:= \frac{\pi}{4} \\
& & r5 &:= 6 & & \\
& & r6 &:= 10 & \beta_3 &:= \frac{\pi}{2}
\end{aligned}$$

**2.3.6.** Расчет координат  $x, y$  произведем также для трех эквипотенциальных линий ( $x_1, y_1; x_2, y_2; x_3, y_3$ ) и трех силовых линий ( $x_4, y_4; x_5, y_5; x_6, y_6$ ).

$$\begin{aligned} x_{1n} &:= \frac{h}{\pi} \cdot \left( r_{1n} \cdot \cos(\beta_1) + \ln\left(\frac{r_{1n}}{r_0}\right) \right) & y_{1n} &:= \frac{h}{\pi} \cdot \left( r_{1n} \cdot \sin(\beta_1) + \beta_1 \right) \\ x_{2n} &:= \frac{h}{\pi} \cdot \left( r_{1n} \cdot \cos(\beta_2) + \ln\left(\frac{r_{1n}}{r_0}\right) \right) & y_{2n} &:= \frac{h}{\pi} \cdot \left( r_{1n} \cdot \sin(\beta_2) + \beta_2 \right) \\ x_{3n} &:= \frac{h}{\pi} \cdot \left( r_{1n} \cdot \cos(\beta_3) + \ln\left(\frac{r_{1n}}{r_0}\right) \right) & y_{3n} &:= \frac{h}{\pi} \cdot \left( r_{1n} \cdot \sin(\beta_3) + \beta_3 \right) \\ \\ x_{4n} &:= \frac{h}{\pi} \cdot \left( r_4 \cdot \cos(\beta_n) + \ln\left(\frac{r_4}{r_0}\right) \right) & y_{4n} &:= \frac{h}{\pi} \cdot \left( r_4 \cdot \sin(\beta_n) + \beta_n \right) \\ x_{5n} &:= \frac{h}{\pi} \cdot \left( r_5 \cdot \cos(\beta_n) + \ln\left(\frac{r_5}{r_0}\right) \right) & y_{5n} &:= \frac{h}{\pi} \cdot \left( r_5 \cdot \sin(\beta_n) + \beta_n \right) \\ x_{6n} &:= \frac{h}{\pi} \cdot \left( r_6 \cdot \cos(\beta_n) + \ln\left(\frac{r_6}{r_0}\right) \right) & y_{6n} &:= \frac{h}{\pi} \cdot \left( r_6 \cdot \sin(\beta_n) + \beta_n \right) \end{aligned}$$

**2.3.7.** Согласно выполненным расчетам построим график распределения силовых и эквипотенциальных линий на краю обкладок плоского конденсатора.



*Рис. 5. График распределения силовых и эквипотенциальных линий на краю обкладок плоского конденсатора*

**2.3.8.** Объединяя полученные данные в примерах 1 и 2, построим обобщенный график распределения силовых и эквипотенциальных линий между обкладками плоского конденсатора.

**2.3.9.** Объясним полученные результаты.

### **3. Контрольные вопросы**

1. Что понимается под конформными отображениями?
2. Что такое силовая и эквипотенциальная линия?
3. Чем обусловлено изменение картины электрического поля в средней части конденсатора и на краю его обкладок?
4. Как определить величину напряженности электрического поля на основе картины силовых и эквипотенциальных линий?

### **4. Список литературы**

1. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: ГИФМЛ, 1958. – 907 с.
2. Техника высоких напряжений / под ред. Д.В. Разевига. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 617 с.
3. Резвых К.А. Расчет электростатических полей. – М.: Энергия, 1967. – 120 с.
4. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю.В. Корицкого и др. – М.: Энергия, 1974. – 615 с.

## Лабораторная работа № 2

### ВЫРАВНИВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ МЕТОДОМ ГРАДИРОВАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

#### 1. Общие сведения

Для регулирования (выравнивания) электрического поля в изоляции электротехнических конструкций применяют различные методы, одним из которых является метод градирования. Метод градирования основан на перераспределении напряженности электрического поля в различных слоях диэлектрика, обладающих различными значениями диэлектрической проницаемости или проводимости. Такой метод нашел широкое применение при изготовлении высоковольтных кабелей. Примером могут служить кабели с бумажно-масляной изоляцией, в которых внутренние слои изготавливаются из бумаги повышенной плотности, имеющей большее значение диэлектрической проницаемости, а наружные слои из бумаги нормальной плотности с меньшим значением диэлектрической проницаемости. Наилучшее градирование электрической изоляции получается при таком подборе электроизоляционных материалов, когда напряженность поля остается постоянной по всем слоям.

Действительно, согласно теореме Гаусса [1], если напряженность электрического поля и заряд постоянны, то условие наилучшего градирования имеет вид:

$$\oint_s E \varepsilon \varepsilon_0 dS = q = const. \quad (1)$$

В случае переменного напряжения можно записать:

$$D = \varepsilon_1 \varepsilon_0 E_1 = \varepsilon_2 \varepsilon_0 E_2 = \dots = const. \quad (2)$$

Отсюда следует, что  $\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2$ .

В случае постоянного тока можно показать, что выполняется соотношение  $\gamma_1 E_1 = \gamma_2 E_2$ .

В цилиндрической системе координат (для цилиндрического конденсатора или кабеля) найдем максимальные значения напряженности электрического поля (рис. 1):

$$E_{\max 1} = \frac{U_1}{r_0 \ln(r_1/r_0)}; \quad E_{\max 2} = \frac{U_2}{r_1 \ln(r_2/r_1)}. \quad (3)$$

Минимальные напряженности поля:

$$E_{\min 1} = \frac{U_1}{r_1 \ln(r_1/r_0)}; \quad E_{\min 2} = \frac{U_2}{r_2 \ln(r_2/r_1)}. \quad (4)$$

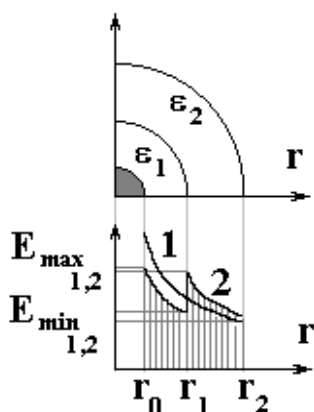


Рис. 1. Распределение напряженностей электрического поля в радиальном направлении в цилиндрической системе координат

Так как  $2\pi r_1 \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1 = 2\pi r_2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_2$ , то  $\varepsilon_1 r_1 = \varepsilon_2 r_2$ .

Для изотропной многослойной изоляции

$$E_{max_i} = \frac{U_i}{r_i \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}. \quad (5)$$

Представляя многослойную изоляцию схемой замещения в виде последовательно соединенных цилиндрических конденсаторов, найдем падение напряжения на слое:

$$U_i = \frac{UC}{C_i},$$

где  $C_i = \frac{2\pi\varepsilon_i\varepsilon_0}{\ln\frac{r_{i+1}}{r_i}}$  – емкость  $i$ -го слоя.

Общая емкость такого цилиндрического конденсатора

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\ln\frac{r_{i+1}}{r_i}}{\varepsilon_i} \right)}. \quad (6)$$

Решая совместно приведенные уравнения относительно напряженности электрического поля, находим

$$E_i = \frac{U}{r_i \varepsilon_i \sum_{i=1}^n \left( \frac{\ln\frac{r_{i+1}}{r_i}}{\varepsilon_i} \right)}. \quad (7)$$

В случае изотропной электрической изоляции можно показать, что минимальное значение максимальной напряженности поля  $E_{max_{min}}$  будет иметь место при условии, когда  $\frac{dE_{max}}{dr} = 0$ . Очевидно, что

$$E_{max} \rightarrow E_{max_{min}}, \text{ если } \frac{R}{r} = e.$$

Для одножильного кабеля значение внутреннего радиуса  $r$  находится из сечения токоведущей жилы, которое определяется токовой нагруз-



кой. Используя полученное соотношение, легко определить наружный радиус кабеля  $R$ .

Внешний радиус изоляции при ее градировании в два слоя можно найти из выражения (7).

$$r_3 = r_2 \exp\left(\frac{U_{раб}}{E_{дон} \cdot \eta_1} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{\eta_1}\right). \quad (8)$$

Использование метода градирования позволяет не только произвести выравнивание электрического поля в изоляции, но и уменьшить ее общую толщину. В случае двухслойной изоляции применение градирования позволяет уменьшить ее общую толщину примерно на 20 %, по сравнению с однослойной изоляцией. В случае трехслойной изоляции градирование позволяет уменьшить ее общую толщину почти в два раза [2].

Сложность метода градирования состоит в том, что очень сложно сделать подбор соответствующих электроизоляционных материалов, обладающих широким диапазоном изменения диэлектрической проницаемости.

## **2. Экспериментальная часть**

### **2.1. Цель работы**

Изучить характер распределения напряженности электрического поля по толщине изоляции при ее градировании.

### **2.2. Задачи работы**

Овладеть методом выравнивания электрического поля с помощью градирования изоляции. Научиться делать подбор электроизоляционных материалов для градирования, производить расчет напряженностей поля в слоях изоляции и определять ее оптимальные размеры.

### **2.3. Описание экспериментальной установки, принципиальная электрическая схема**

Измерения разности потенциалов на слоях градированной изоляции производится на установке, электрическая схема которой приведена на рис. 2.

Высокое напряжение, подаваемое на исследуемый образец, снимается со вторичной обмотки высоковольтного трансформатора ВТ через защитное (токоограничивающее) сопротивление  $R_{заш}$ . Для регулировки величины подаваемого напряжения служит автотрансформатор АТ, низкое напряжение с которого через катушку реле тока РТ подается на первичную обмотку высоковольтного трансформатора ВТ. Реле тока РТ служит для отключения установки в момент пробоя образца за счет размыкания контактов РТ. Подача низкого напряжения на установку осуществляется включением пакетного выключателя ПВ и контролируется зажиганием сигнальной лампы ЛН – «Низкое напряжение».

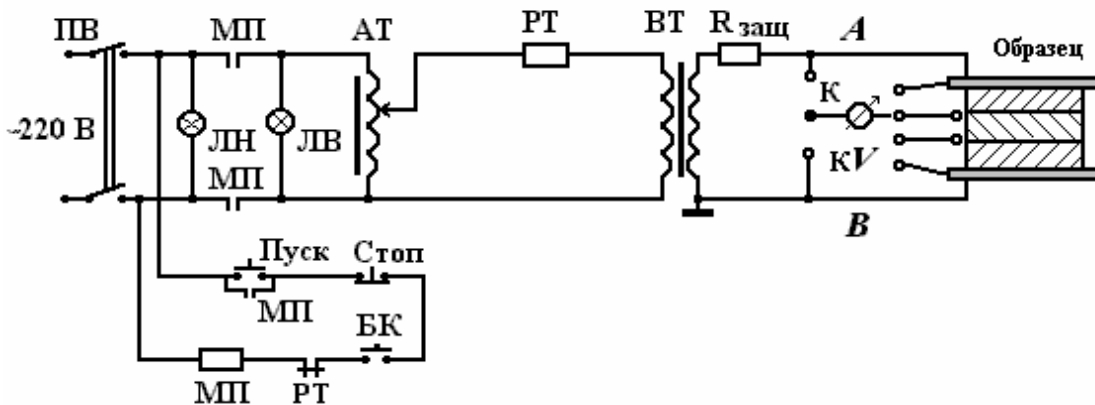


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема установки:  
 МП – магнитный пускатель; РТ – реле максимального тока; ЛН, ЛВ – сигнальные лампы низкого и высокого напряжения; ПВ – пакетный выключатель; АТ – автотрансформатор; ВТ – высоковольтный трансформатор;  $R_{защ}$  – токоограничивающее (защитное) сопротивление; кV – киловольтметр; С<sub>x</sub> – образец

При нажатии кнопки «Пуск» в цепи управления замыкается цепь питания катушки магнитного пускателя МП и, тем самым, замыкаются нормально разомкнутые контакты МП. В этом случае низкое напряжение через контакты МП подается на сигнальную лампу ЛВ – «Высокое напряжение» и на обмотку автотрансформатора АТ.

При пробое образца за счет броска тока срабатывает реле тока РТ, при размыкании нормально замкнутых контактов которого обесточивается цепь питания катушки магнитного пускателя МП. Таким образом, снимается низкое напряжение с автотрансформатора и первичной обмотки высоковольтного трансформатора, а высокое напряжение – с образца.

Для защиты от случайного поражения электрическим током служат блокировочные контакты БК, которые размыкают цепь питания катушки магнитного пускателя МП при открывании двери ограждения измерительной ячейки.

#### 2.4. Порядок выполнения работы

1. Приготовим для испытания макеты образцов с градированной изоляцией. Произведем измерение размеров изоляции и занесем данные измерений в табл. 1.
2. Поместим образец в испытательную ячейку и подадим на него заданное преподавателем напряжение.
3. Измерим разность потенциалов на слоях изоляции с помощью зондов (выводов от обкладок). Данные измерений занесем в табл. 1.

- Повторим измерения разности потенциалов при другой величине заданного напряжения.

Таблица 1

Радиальные размеры, м			Величина приложенного напряжения, В	Падение напряжения в слое, В		Напряженность электрического поля в слоях изоляции, В/м			
$r_0$	$r_1$	$r_2$	$U_{прил}$	$U_1$	$U_2$	$E_{max1}$	$E_{max2}$	$E_{min1}$	$E_{min2}$

- Вычислим максимальные и минимальные значения напряженности поля по результатам измерений.
- Исходя из схемы замещения, вычислим максимальные и минимальные значения напряженностей поля при заданных размерах и величинах диэлектрической проницаемости слоев градированной изоляции.
- Расчеты выполним в программе *Mathcad*, и построим по полученным данным график изменения напряженности электрического поля в радиальном направлении (Приложение).
- Объясним полученные результаты.

### 3. Контрольные вопросы

- За счет чего происходит выравнивание электрического поля при градировании изоляции?
- При каком условии проявляется эффект наилучшего градирования изоляции?
- Проявляется ли эффект градирования изоляции на постоянном токе?
- В чем заключается эффект градирования изоляции?

### 4. Список литературы

- Меркулов В.И. Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях: учебное пособие. – Томск: ИПФ ТПУ, 2001. – 152 с.
- Базуткин В.В. и др. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжение в электрических системах: учебник для вузов / под общ. ред. В.П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
- Дмитревский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
- Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М.: Издательство «Наука», 1971. – 576 с.

## Лабораторная работа № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНДЕНСАТОРНЫХ ОБКЛАДОК НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В СЛОИСТОЙ ИЗОЛЯЦИИ

#### 1. Общие сведения

Во многих электроизоляционных конструкциях широкое применение находят различные виды комбинированной изоляции, в качестве которой могут использоваться следующие сочетания диэлектриков: твердый диэлектрик – диэлектрическая жидкость, газ – твердый диэлектрик, комбинации различных твердых диэлектриков.

В комбинированной изоляции распределение напряженностей электрического поля по отдельным компонентам может существенно изменяться в зависимости от диэлектрических свойств, применяемых диэлектриков, вида приложенного напряжения, особенностей конструкций и т. д. Характер распределения напряженностей электрического поля и механических напряжений по отдельным компонентам может влиять на электрическую прочность и срок службы изоляции. Поэтому знание закономерностей распределения напряженностей электрического поля, умение правильно выбирать сочетание диэлектриков позволяет (уже на стадии проектирования) заложить основы высокой надежности электроизоляционной конструкции.

Если комбинированная изоляция представляет собой последовательно включенные слои электроизоляционных материалов, то для определения падений напряжения на отдельных слоях можно воспользоваться схемой замещения, представленной на рис. 1.

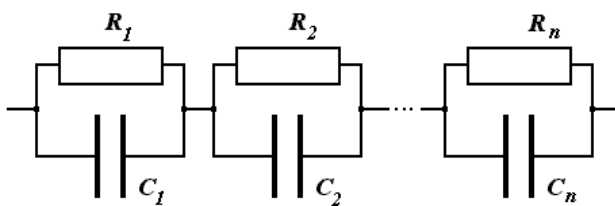


Рис. 1. Схема замещения многослойной изоляции

Ток, протекающий через изоляцию,

$$I = U \cdot y = U_1 y_1 = U_2 y_2 = \dots U_i y_i = \dots U_n y_n, \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;

$y$  – полная проводимость системы;

$y_i$  – полная проводимость отдельных слоев изоляции.

Полную проводимость системы можно найти из выражения:

$$y = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i}}. \quad (2)$$

Падение напряжения на любом слое

$$U_i = \frac{U}{y_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i}}. \quad (3)$$

Приложенное к системе напряжение равно сумме падений напряжений на отдельных слоях:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i. \quad (4)$$

Проводимость в комплексной форме для любого слоя с учетом потерь в нем определяется:

$$y_i = \left( \frac{1}{\rho_i} + j\omega\varepsilon_o\varepsilon_i \right) \frac{S}{\Delta_i} = \omega\varepsilon_o\varepsilon_i \frac{S}{\Delta_i} (j + tg\delta_i) = \omega C_i (j + tg\delta_i), \quad (5)$$

где  $\rho_i$  – удельное объемное электрическое сопротивление  $i$ -го слоя;

$\varepsilon_i$  – относительная диэлектрическая проницаемость  $i$ -го слоя;

$\omega$  – круговая частота переменного тока;

$S$  – площадь обкладок;

$\Delta_i$  – толщина  $i$ -го слоя.

Модуль полной проводимости для любого слоя

$$y_i = \omega C_i \sqrt{1 + tg^2 \delta_i}. \quad (6)$$

С учетом (6) выражение (3) примет вид:

$$U_i = \frac{U}{C_i \sqrt{1 + tg^2 \delta_i} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i \sqrt{1 + tg^2 \delta_i}}}. \quad (7)$$

При  $tg\delta_i$  много меньше единицы:

$$U_i = \frac{U}{C_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}}. \quad (8)$$

Емкость отдельного слоя изоляции при цилиндрической намотке

$$C_i = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_i l_i}{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}. \quad (9)$$

Максимальная напряженность в слое изоляции

$$E_{i_{max}} = \frac{U_i}{r_i \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}. \quad (10)$$

Одним из распространенных видов комбинированной изоляции в высоковольтных электроизоляционных конструкциях является бумажно-масляная изоляция. Бумажно-масляная изоляция широко применяется в кабелях, высоковольтных вводах на напряжение 100÷500 кВ и выше, а также в различных видах силовых, электротермических и высоковольтных конденсаторов.

Бумажно-масляная изоляция может быть представлена в виде последовательно включенных слоев клетчатки и пропитывающей жидкости. Диэлектрическая проницаемость пропитанной бумаги как двухкомпонентной изоляции, согласно [1], находится так:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_n}{1 + \frac{\gamma_b}{\gamma_k} k_3 \left( \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_k} - 1 \right)}. \quad (11)$$

где  $\gamma_k, \gamma_b$  – плотность клетчатки и бумаги, соответственно;

$\varepsilon_n, \varepsilon_k$  – диэлектрическая проницаемость пропитки и клетчатки, соответственно;

$k_3$  – коэффициент запрессовки.

Тангенс угла диэлектрических потерь пропитанной бумаги рассчитывается следующим образом:

$$tg\delta = \frac{tg\delta_k}{1 + \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_n} \left( \frac{\gamma_k - k_3\gamma_b}{k_3\gamma_b} \right)} + \frac{tg\delta_n}{1 + \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_k} \left( \frac{k_3\gamma_b}{\gamma_k - k_3\gamma_b} \right)}, \quad (12)$$

где  $tg\delta_n, tg\delta_k$  – тангенс угла диэлектрических потерь пропитки и бумаги, соответственно.

Падение напряжения на слое пропитки для последовательно включенных слоев клетчатки и пропитки найдем, решая совместно 7, 11 и 12.

$$U_n = U_0 \frac{1}{\frac{\varepsilon_n}{\gamma_K - k_3 \cdot \gamma_0} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_n} \cdot \left( \frac{\gamma_K - k_3 \cdot \gamma_0}{\varepsilon_n \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_K}} + \frac{k_3 \cdot \gamma_0}{\varepsilon_K \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_K}} \right)}. \quad (13)$$

Для выравнивания распределения потенциалов в слоистой изоляции применяют метод конденсаторных обкладок. В случае цилиндрической системы изоляции при обеспечении постоянства радиальной напряженности поля аксиальная напряженность поля может быть рассчитана:

$$E_a = \frac{U \cdot l_c \cdot l_\phi}{l_i^2 (l_c - l_\phi)}, \quad (14)$$

где  $l_c, l_\phi$  – длина обкладки у стержня и фланца, соответственно.

При обеспечении постоянства аксиальной напряженности поля радиальная напряженность

$$E_r = \frac{U}{2} \cdot \frac{l_c + l_\phi}{\ln \frac{r_\phi}{r_c}} \cdot \frac{1}{r_i l_i}. \quad (15)$$

Значения  $r_i$  и  $l_i$  связаны уравнением

$$\frac{l_i^2 - l_\phi^2}{l_c^2 - l_\phi^2} = \frac{\ln \frac{r_\phi}{r_i}}{\ln \frac{r_\phi}{r_c}}, \quad (16)$$

где  $r_c, r_\phi$  – радиус обкладки у стержня и фланца, соответственно.

Решая (16) относительно  $r_i$ , получим

$$r_i = e^{a - b \cdot l_i^2}, \quad (17)$$

где

$$a = \ln r_c + \ln \frac{r_\phi}{r_c} \left( \frac{l_c^2}{l_c^2 - l_\phi^2} \right), \quad (18)$$

$$b = \frac{\ln \frac{r_\phi}{r_c}}{l_c^2 - l_\phi^2}. \quad (19)$$

Если сохранять заданные длины обкладок, то из выражения 17 (из условия постоянства аксиальной напряженности поля) можно найти но-

вые значения радиусов обкладок, которые будут соответствовать более равномерному распределению потенциалов.

С другой стороны, если принять, что

$$\frac{r_{\phi}}{r_c} = \frac{\ell_c}{\ell_{\phi}} = z,$$

то

$$E_{r_{max}} = \frac{U(1+z)}{2r_c \ln z} = \frac{U(1+z)}{2r_{\phi} z \ln z}. \quad (20)$$

Из условия обеспечения минимального значения максимальной радиальной напряженности электрического поля значение  $Z$  составляет 3.6, а из условия минимального объема изоляции  $Z = 4.1$ . На практике при расчетах значение  $Z$  берут в пределах от 3.6 до 5.0.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Цель работы

Теоретическое и экспериментальное определение падений напряжений на отдельных слоях комбинированной изоляции. Анализ характера распределения напряженностей электрического поля в слоистой изоляции электроизоляционных конструкций.

### 2.2. Задача работы

Оценить влияние конденсаторных обкладок на характер распределения напряженностей электрического поля в слоистой изоляции.

### 2.3. Описание экспериментальной установки

В качестве модельного образца такой комбинированной изоляции можно рассмотреть макет изоляционного остова проходного изолятора на основе бумажно-масляной изоляции, представленного на рис. 2.

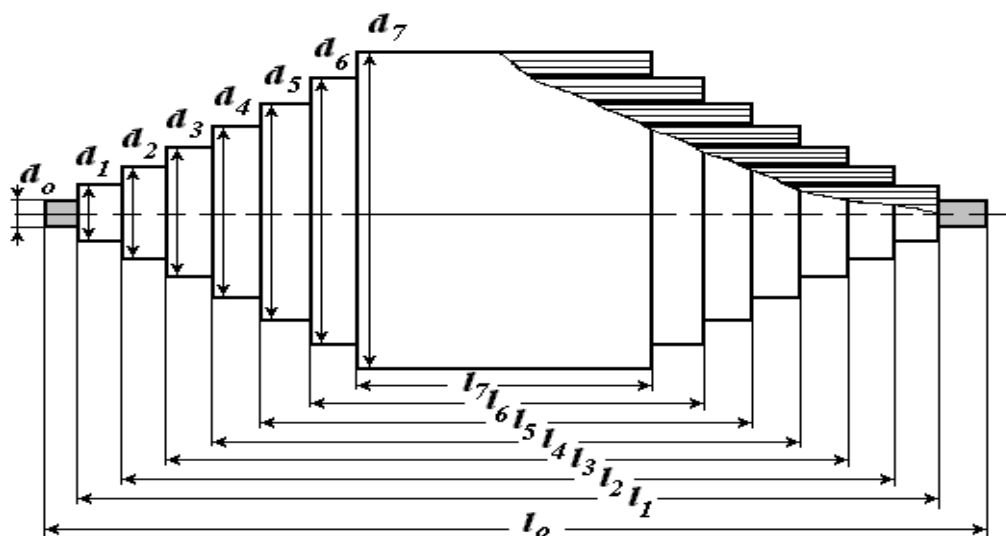


Рис. 2. Макет образца изоляционного остова проходного изолятора с конденсаторными обкладками



Схема экспериментальной установки для определения падений напряжений на отдельных слоях комбинированной изоляции представлена на рис. 3.

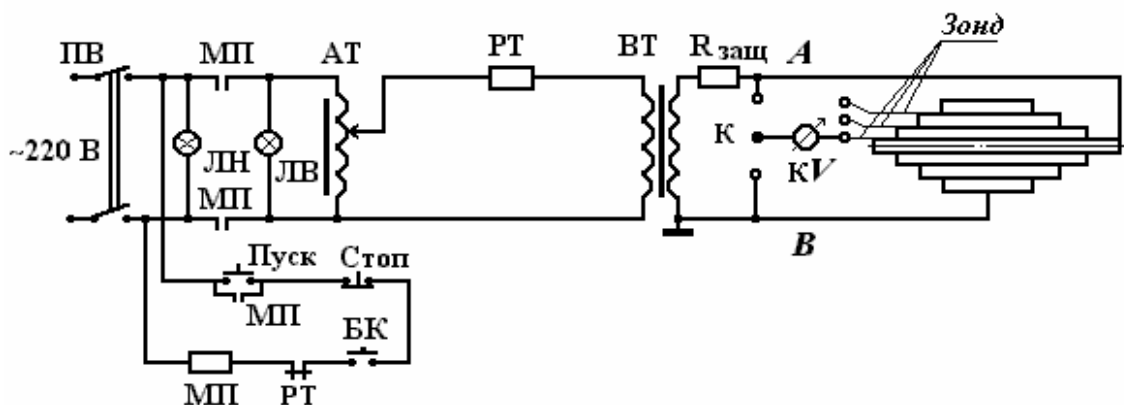


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для определения падений напряжений на отдельных слоях комбинированной изоляции

Согласно схеме на рис. 3 измерение потенциалов на конденсаторных обкладках производится с помощью электростатического киловольтметра  $kV$ , который должен быть изолирован от «земли». Измерение потенциалов на каждом зонде (обкладке) производится относительно точек  $A$  и  $B$ .

Истинное значение напряжения на зонде относительно точки  $B$  находится:

$$U_B = U \frac{U'_B}{U'_A + U'_B}, \quad (21)$$

где  $U$  – приложенное напряжение;

$U'_A, U'_B$  – измеренные разности потенциалов на зондах относительно точек  $A$  и  $B$ , соответственно.

Напряжение на установку подается при включении пакетного выключателя ПВ. При нажатии кнопки «Пуск» напряжение сети подводится к обмотке магнитного пускателя МП, а при его срабатывании замыкаются нормально разомкнутые контакты МП и, тем самым, замыкается цепь питания автотрансформатора АТ. Напряжение с автотрансформатора АТ через обмотку реле тока РТ подводится к первичной обмотке высоковольтного трансформатора ВТ. Высокое напряжение, снимаемое с высоковольтной обмотки трансформатора ВТ через токоограничивающее сопротивление  $R_{зашц}$ , подается на образец.

При пробое изоляции образца или его перекрытии за счет броска тока срабатывает реле максимального тока, что вызывает размыкание его нормально замкнутых контактов РТ в цепи питания катушки магнитного

пускателя. В этом случае размыкаются контакты МП и, тем самым, снимается напряжение с автотрансформатора и высоковольтного трансформатора.

Контроль подачи низкого напряжения осуществляется загоранием сигнальной лампы низкого напряжения ЛН, а высокого напряжения загоранием сигнальной лампы высокого напряжения ЛВ, включенной параллельно автотрансформатору АТ.

#### 2.4. Порядок работы

1. Подготовить образец исследуемого макета изоляции и измерить его основные размеры (радиусы и длины выравнивающих обкладок).
2. С помощью моста переменного тока измерить значения  $C_i$  и  $tg\delta_i$  слоев изоляции, заключенных между соседними обкладками.
3. Поместить образец в измерительную ячейку и сделать необходимые соединения согласно рис. 3.
4. Подать напряжение на образец макета и измерить падение напряжения на всех зондах относительно точек  $A$  и  $B$ .
5. Данные измерений  $C$ ,  $tg\delta$ ,  $d$ ,  $l$  по слоям занести в табл. 1.
6. Провести расчет потенциала каждой обкладки (зонда) относительно точки  $B$  (фланца) согласно уравнениям (3) и (8).
7. Рассчитать максимальную напряженность поля в каждом слое изоляции согласно (10).
8. Построить графики зависимости  $U_i = f(r_i)$  и  $E_{i_{max}} = f(r_i)$  на основе расчетных и экспериментальных данных.
9. Ввести полученные данные в ЭВМ в виде матриц и выполнить расчет емкости, потенциалов и максимальной напряженности электрического поля во всех слоях с использованием программы *Mathcad*.

Таблица 1

№ п/п	$C$ , пФ	$tg\delta$	Диаметр $d$ , мм	Длина обкладки $l$ , мм	Падение напряжения $U$ , В	Потенциал $U_B$ , В	$E_{max}$ , В/м	$U_{расч}$ , В	$E_{расч}$ , В/м
1									
2									
...									

10. Про моделировать условия, обеспечивающие постоянство радиальной напряженности электрического поля в зависимости  $E_{r_{max}} = f(r_i)$ , изменяя радиусы обкладок, при тех же значениях длин обкладок модельного образца.
11. Сравнить расчетные и экспериментальные данные и объяснить полученные зависимости.

### **3. Контрольные вопросы**

1. Какие особенности распределения напряженности электрического поля имеют место в комбинированной изоляции?
2. С какой целью в слоистой изоляции применяют конденсаторные обкладки?
3. Чем отличаются радиальная и аксиальная напряженности поля в слоистой изоляции?
4. При каком условии имеет место наиболее равномерное распределение напряженностей электрического поля в слоистой изоляции?
5. Какие необходимо выполнить условия проверки, обеспечивающие нормальную работоспособность изоляции?

### **4. Список литературы**

1. Меркулов В.И. Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях: учебное пособие. – Томск: ИПФ ТПУ, 2001. – 152 с.
2. Дмитриевский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции. – М.: Энергоиздат, 1981. – 391 с.
3. Синявский В.Н. Расчет и конструирование электрокерамических конструкций. – М.: Энергия, 1977. – 190 с.

# Лабораторная работа № 4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗОЛЯТОРОВ В ВОЗДУХЕ

### 1. Общие сведения

Разряд по поверхности твердого диэлектрика в воздухе (поверхностное перекрытие) является разрядом на границе раздела двух сред. В отличие от пробоя обычного воздушного промежутка таких же размеров, разряд на границе раздела двух сред имеет свои особенности, обусловленные искажением электрического поля на этой границе.

На практике встречаются три случая, у которых имеет место различный характер распределения силовых линий электрического поля вдоль поверхности твердого диэлектрика, что видно из рис. 1.

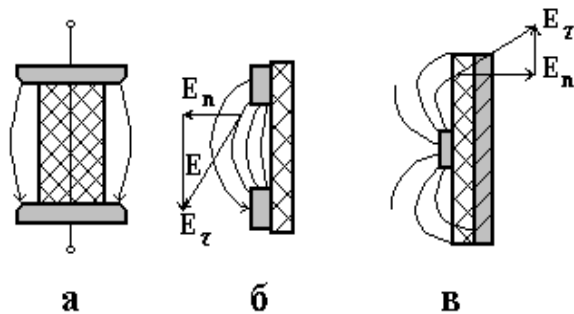


Рис. 1. Распределение поля на границе раздела двух сред:  
а) слабонервномерное поле;  
б) резконервномерное поле с малой величиной  $E_n$  на границе раздела;  
в) резконервномерное поле с большой величиной  $E_n$  на границе раздела

Более сильное искажение электрического поля на границе раздела имеет место в случаях б и в, где поле является резконервномерным. За счет искажения поля резко возрастает локальная напряженность поля, что может вызвать развитие коронного или поверхностного разряда с последующим перекрытием.

Как правило, развитие поверхностного разряда происходит при меньшем значении приложенного напряжения по сравнению с пробивным напряжением воздушного промежутка тех же размеров. Уже само наличие твердого диэлектрика в воздушном промежутке вызывает искажение электрического поля (рис. 1, а), степень неравномерности которого будет определяться видом диэлектрика, состоянием его поверхности и геометрией.

Как показывает опыт, развитие разряда по поверхности твердого диэлектрика зависит от многих факторов, в том числе определяется условиями окружающей среды (влажностью воздуха, его температурой и давлением, загрязненностью поверхности, воздействием дождя, тумана, росы и т. д.).

Наиболее резкое уменьшение напряжения поверхностного разряда наблюдается при сильном увлажнении загрязненной поверхности изолятора. Увлажнение загрязненной поверхности изолятора приводит за счет искажения поля к возникновению областей (участков) с весьма высокой локальной напряженностью электрического поля. В результате этого в этих областях начнут раньше развиваться искровые разряды, приводящие к образованию «дужек», т. е. частичных перекрытий поверхности изолятора. Образование «дужек» усиливает неравномерность электрического поля и при соответствующих условиях завершается полным перекрытием поверхности изолятора при более низком напряжении.

На рис. 2 показана зависимость напряжения перекрытия от вида диэлектрика и длины промежутка.

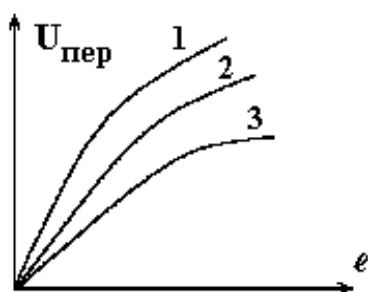


Рис. 2. Зависимость напряжения перекрытия  $U_{пер}$  от длины промежутка  $l$ :  
1 – воздух; 2 – парафин; 3 – фарфор, стекло

Как видно из рис. 2, более высокое напряжение перекрытия наблюдается для диэлектриков, которые не смачиваются (кривая 2). С ростом длины промежутка рост напряжения перекрытия замедляется за счет возрастания степени неравномерности поля.

Степень загрязнения и увлажнения поверхности изоляторов зависит от наличия ребер, их количества и конфигурации. Наличие ребер позволяет увеличить длину пути тока утечки по поверхности изолятора и, тем самым, повысить выдерживаемое напряжение при воздействии дождя.

Минимальное «влажноразрядное» напряжение может быть найдено из уравнения (3) при известных параметрах дуги, размерах изолятора и степени увлажнения поверхности.

$$U_{вр.мин} = A^{\frac{1}{n+1}} \left[ \frac{l_{\delta}}{(\pi \cdot \chi_n \cdot D_T)^{\frac{1}{n}}} + (\pi \cdot \chi_n \cdot D_T)^{\frac{1}{1+n}} - R_n(l_{\delta}) \right], \quad (1)$$

где  $U_{вр.мин}$  – минимальное значение «влажноразрядного» напряжения, В;

$l_{\delta}$  – длина дуги, см;

$\chi_n$  – средняя поверхностная проводимость (порядка 4 мкСим);

$D_T$  – диаметр тарелки изолятора, см;  
 $A, n$  – постоянные дуги ( $A \approx 100 \div 150 \text{ В} \cdot \text{А}^n / \text{см}$ ,  $n \approx 0,5$  при токе дуги до 10 А);  
 $R_n(l_\delta)$  – сопротивление перекрытий дугой части поверхности изолятора;

$$R_n(l_\delta) = \frac{l - l_\delta}{\pi \cdot \chi_n \cdot D_T}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина пути тока утечки, см.

При  $l_\delta = l$ ,  $R_n(l_\delta) \rightarrow 0$ , тогда

$$U_{вр. min} = A^{\frac{1}{n+1}} \left[ \frac{l_\delta}{(\pi \cdot \chi_n D_T)^{\frac{n}{n+1}}} \right]. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что с увеличением длины пути тока утечки напряжение поверхностного разряда возрастает, что согласуется с экспериментальными данными, приведенными на рис. 2.

С другой стороны, с увеличением степени загрязнения, т. е. с увеличением поверхностной проводимости  $\chi_n$ , напряжение поверхностного разряда уменьшается, что видно из рис. 3.

На рис. 3 видно, что наибольшее снижение «влажоразрядного» напряжения наблюдается в тех случаях, когда в составе загрязнений содержится большое количество растворимых в воде солей, а также когда загрязнения создают на поверхности изолятора более плотные осадения.

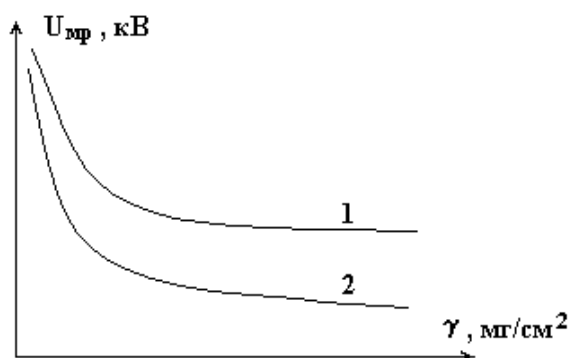


Рис. 3. Зависимость «влажоразрядного» напряжения изоляторов от плотности загрязнения:  
 1 – топочные уносы;  
 2 – пыль алюминиевого завода

На рис. 4 показана зависимость напряжения перекрытия изоляторов от удельной поверхностной проводимости при различном размере выле-

та ребра, из которого следует, что величина разрядного напряжения  $U_{сxp}$  уменьшается с ростом степени загрязнения поверхности.

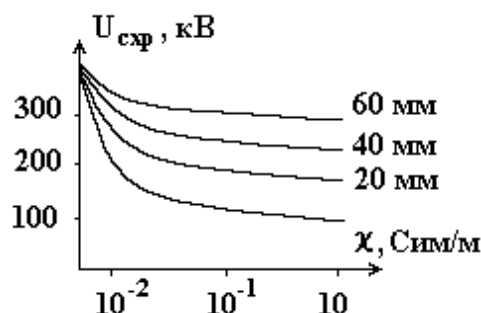


Рис. 4. Зависимость напряжения перекрытия от удельной поверхностной проводимости изолятора при различном размере вылета ребра

Для практических расчетов величины выдерживаемого напряжения под дождем различных типов изоляторов используют эмпирические выражения [1, 4]:

$$U_{мкр} = 2.50 \cdot l_c, \text{ кВ эфф} \text{ – для штыревых изоляторов;}$$

$$U_{мкр} = 2.96 \cdot l_c, \text{ кВ эфф} \text{ – для стержневых изоляторов;}$$

$$U_{мкр} = 2.25 \cdot l_c + 22, \text{ кВ эфф} \text{ – для опорных и проходных изоляторов,}$$

где  $l_c$  – «сухоразрядное» расстояние между электродами, см.

При расчете выдерживаемого напряжения в сухом состоянии можно воспользоваться эмпирическими формулами:

$$U_{сxp} = 15 + 3.95 \cdot l_c, \text{ кВ эфф} \text{ – для штыревых изоляторов;}$$

$$U_{сxp} = 24 + 3.78 \cdot l_c, \text{ кВ эфф} \text{ – для стержневых изоляторов;}$$

$$U_{сxp} = 6 + 2.5 \cdot l_c, \text{ кВ эфф} \text{ – для проходных изоляторов без ребер.}$$

Напряжение появления поверхностных разрядов зависит также от материала диэлектрика, из которого изготовлен изолятор (стекло, фарфор и др.), и может быть определено из уравнения [1].

$$U_p = E_0 \cdot \sqrt{\frac{k \varepsilon_\beta}{\varepsilon_\delta}} \cdot th \left( l \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_\delta}{k \cdot \varepsilon_\beta \cdot d}} \right), \quad (4)$$

где  $U_p$  – напряжение появления поверхностных разрядов;

$E_0$  – электрическая прочность наиболее слабой части диэлектрика на границе раздела;

$\varepsilon_\beta, \varepsilon_\delta$  – диэлектрическая проницаемость воздуха и твердого диэлектрика;

$k$  – коэффициент неоднородности электрического поля;

$l$  – расстояние между электродами по поверхности диэлектрика.

Для изоляторов, работающих на открытом воздухе, необходимо учитывать воздействие дождя, тумана, росы и различных загрязнений,

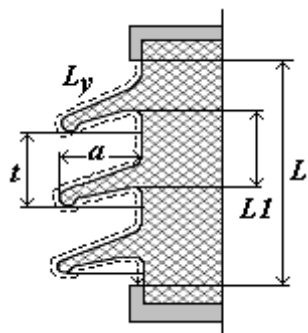
которые, оседая на поверхности изолятора, вызывают искажение электрического поля и снижение напряжения перекрытия.

Можно показать, что

$$U_{пер.д} = E_{доп.д} \cdot L_{ут}, \quad (5)$$

где  $L_{ут}$  – длина пути тока утечки;

$E_{доп.д}$  – допустимая напряженность поля при воздействии дождя ( $E_{доп.д} = 0.025 \div 0.06$  кВ/мм).



*Рис. 5. Эскиз опорного изолятора:  
 a – вылет ребра;  
 t – расстояние (шаг) между ребрами;  
 L – высота изолятора без учета фланцев;  
 $L_y$  – длина пути тока утечки*

При известных параметрах изоляторов (вылет ребра, шаг и др.) выдерживаемое напряжение под дождем можно определить [1]:

$$U_{д} = 124 \cdot l^{0.77} + 42 \cdot z \cdot t^{0.6} \frac{a_1}{a}, \quad (6)$$

где  $z$  – число ребер;

$a_1$  – кратчайшее расстояние до ребра;

$t$  – шаг ребер;

$l$  – длина (высота) изолятора.

Найденное значение выдерживаемого напряжения под дождем должно быть больше значения, определяемого по ГОСТ 1516–76 для изоляторов.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Цель работы

Изучить зависимость напряжения поверхностного разряда изоляторов от длины пути тока утечки и степени увлажнения их поверхности.

### 2.2. Задача работы

Овладеть методикой экспериментальной оценки напряжения перекрытия различных типов изоляторов и методами расчета их разрядных характеристик с учетом влияния длины пути тока утечки, формы и количества ребер, степени загрязнения и увлажнения поверхности.



### 2.3. Описание экспериментальной установки, принципиальная электрическая схема

Испытания изоляторов на напряжение перекрытия в сухом состоянии и при увлажнении их поверхности производится на установке, электрическая схема которой приведена на рис. 6.

Высокое напряжение, подаваемое на испытуемый изолятор, снимается с вторичной обмотки высоковольтного трансформатора ВТ. На его первичную обмотку напряжение подается с регулировочного автотрансформатора АТ через катушку реле тока РТ, которое служит для отключения установки в момент пробоя или перекрытия образца. Подача низкого напряжения на установку осуществляется включением пакетного выключателя ПВ и контролируется зажиганием сигнальной лампы ЛН – «Низкое напряжение».

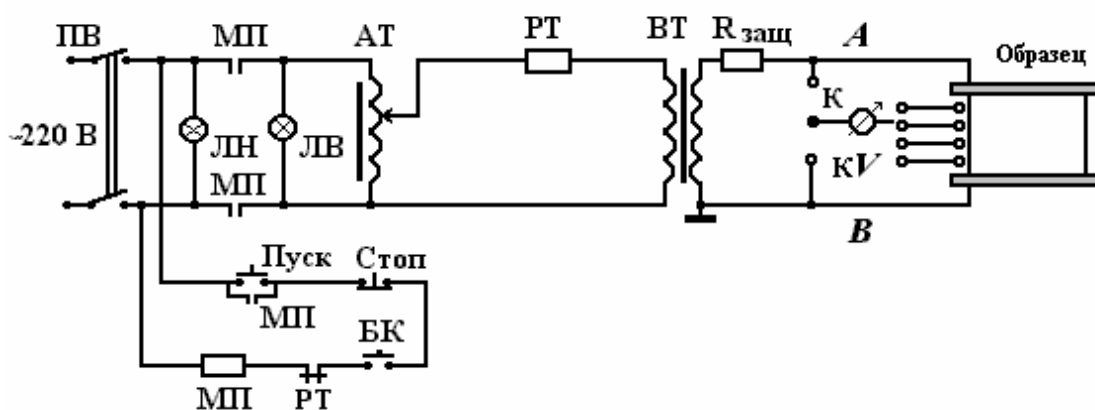


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема установки:

МП – магнитный пускатель; РТ – реле максимального тока; ЛН, ЛВ – сигнальные лампы низкого и высокого напряжения; ПВ – пакетный выключатель; АТ – автотрансформатор; ВТ – высоковольтный трансформатор;  $R_{защ}$  – токоограничивающее (защитное) сопротивление; кВ – киловольтметр

При нажатии кнопки «Пуск» включается цепь питания катушки магнитного пускателя МП. При его срабатывании замыкаются нормально разомкнутые контакты МП. В этом случае низкое напряжение через контакты МП подается на сигнальную лампу ЛВ – «Высокое напряжение» и на обмотку автотрансформатора АТ. При пробое образца или его перекрытии за счет броска тока срабатывает реле тока РТ, размыкаются нормально замкнутые контакты РТ этого реле и тем самым обесточивается цепь питания катушки магнитного пускателя МП. Таким образом, снимается низкое напряжение с автотрансформатора и первичной обмотки высоковольтного трансформатора, а высокое напряжение – с образца.

Для защиты от случайного поражения электрическим током служат блокировочные контакты БК, которые размыкают цепь питания катушки магнитного пускателя МП при открывании двери ограждения измерительной ячейки.

## 2.4. Порядок выполнения работы

2.4.1. Возьмем в качестве исследуемой модели подвесной стержневой изолятор типа ЛК, согласно ГОСТ 28856–90, с различным количеством элементов (тарелок). Размеры изолятора найдем из номенклатурного каталога завода-изготовителя (табл. 1).

Таблица 1

Тип изолятора	Длина изоляционной части всего изолятора $l$ , мм	Диаметр тарелки $D$ , мм	Длина изоляционной части одного элемента $l_1$ , мм	Количество элементов $n$	Значение 50%-го разрядного напряжения $U_p$ , кВ, при удельной проводимости слоя загрязнения 10 мкСим
ЛК7010-AIV	180	85	60	3	13

2.4.2. Произведем испытания изоляторов на напряжение перекрытия в сухом состоянии и при увлажнении их поверхности при различном количестве тарелок.

**ВНИМАНИЕ!** Все переключения в схеме производятся при снятом высоком напряжении, для чего необходимо сначала нажать кнопку «Стоп», а затем выключить установку пакетным выключателем ПВ.

2.4.3. Полученные результаты испытаний занесем в табл. 2.

Таблица 2

### Результаты испытаний

Тип изолятора	Количество элементов (номер)	Длина изоляционной части, мм	Расстояние между элементами, мм	Разрядное напряжение, кВ

2.4.4. Произведем расчет «влажноразрядного» напряжения по уравнению (3) при различной длине дуги  $l_d$ , определяемой числом элементов изолятора. Расчеты выполним в программе *Mathcad* (Приложение).

**2.4.5.** На основе проведенных расчетов построим графики зависимости выдерживаемых напряжений перекрытия изоляторов в сухом и увлажненном состоянии от длины пути тока утечки.

**2.4.6.** Объясним полученные зависимости с физической точки зрения.

### **3. Контрольные вопросы**

1. Что понимается под «мокроразрядным» и «сухоразрядным» напряжением изоляторов?
2. Какова причина того, что напряжение поверхностного разряда ниже пробивного напряжения воздушного промежутка тех же размеров?
3. В чем заключается влияние влаги и загрязнений на напряжение поверхностного разряда?
4. Какова роль ребер в развитии разряда по поверхности изолятора?

### **4. Список литературы**

1. Меркулов В. И. Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях: учебное пособие. – Томск: ИПФ ТПУ, 2001. – 152 с.
2. Базуткин В. В. и др. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжение в электрических системах: учебник для вузов / под общ. ред. В.П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
3. Синявский В. Н. Расчет и конструирование электрокерамических конструкций. – М.: Энергия, 1977. – 190 с.

## Лабораторная работа № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРоятНОСТЕЙ ПРОБИВНЫХ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ПОЛЯ

#### 1. Общие сведения

При проведении электрического расчета электроизоляционных конструкций для обеспечения их надежности и определения оптимальных размеров большое значение имеет правильный выбор рабочей напряженности электрического поля и толщины изоляции. Величина рабочей напряженности электрического поля зависит от электрической прочности выбранного диэлектрика и статистического разброса ее величины, связанного с неоднородностью диэлектрика, его размерами и условиями испытания.

Разброс значений пробивных напряженностей электрического поля может быть описан различными законами распределения. Согласно термодинамической теории разрушения диэлектриков [1], функция распределения вероятностей пробивных напряженностей поля имеет вид:

$$Q(E_{np}) = 1 - \exp \left[ - \frac{dS_{мин}}{\eta \nu_o y} \exp \left( - y \ln \frac{0.65}{p^{5/3}} \right) \right], \quad (1)$$

где  $Q(E_{np})$  – вероятность пробоя изоляции при средней напряженности поля, равной  $E_{np}$  или меньше;

$d$  – толщина изоляции;

$S_{мин}$  – поверхность электрода меньших размеров;

$\eta$  – коэффициент неравномерности электрического поля, создаваемого электродной системой;

$\nu_o$  – объем материала, в котором находится хотя бы одна элементарная неоднородность;

$p$  – концентрация неоднородностей.

Если неоднородность в диэлектрике представить в виде эллипсоида вращения, то величина  $y$  является отношением большей полуоси эллипсоида к меньшей. Наибольшая напряженность поля имеет место у неоднородностей, вытянутых в направлении силовых линий электрического поля при максимальных значениях  $y$ .

Величина  $y$  связана с пробивной напряженностью электрического поля следующим соотношением:

$$\beta = \frac{E_T}{\eta E_{np}} = \frac{\nu(y^2 - 1)}{y^2 - \nu + \frac{y(\nu - 1)}{\sqrt{y^2 - 1}} \cdot \ln\left(y + \sqrt{y^2 - 1}\right)}, \quad (2)$$

где  $E_{np}$  – средняя пробивная напряженность поля;

$E_T$  – предельная электрическая прочность диэлектрика;

$\nu$  – относительная проводимость неоднородности;

$\beta$  – коэффициент неоднородности электроизоляционного материала, численно равный отношению наибольшей напряженности поля (имеет место у неоднородности) к средней напряженности для условий равномерного поля.

Связь между  $y$  и  $\beta$  может быть описана выражением

$$y = \frac{0.482}{\left(\ln \frac{1 - \frac{1}{\beta}}{1 - \frac{1}{\nu}}\right)^{0.82}}. \quad (3)$$

Преобразуя выражение (1), получим

$$\ln\{-\ln[1 - Q(E_{np})]\} + \ln y = \ln \frac{dS_{min}}{\eta \nu_o} - y \ln \frac{0.65}{p^{5/3}}. \quad (4)$$

Обозначим:

$$Z = \ln\{-\ln[1 - Q(E_{np})]\} + \ln y, \quad (5)$$

$$a = \ln \frac{dS_{min}}{\eta \nu_o}, \quad (6)$$

$$b = \ln \frac{0.65}{p^{5/3}}. \quad (7)$$

На основании (4, 5, 6, 7) запишем:

$$Z = a - b \cdot y. \quad (8)$$

Полученное выражение отражает функцию распределения пробивных напряженностей электрического поля и, по сути, является двойным логарифмическим законом распределения.

Принимая для описания функции распределения пробивных напряженностей электрического поля выражения (1, 8), можно определить параметры изоляции  $p, \nu_o, \nu, E_T$ .

Для описания функции распределения пробивных напряженностей поля могут быть также использованы и другие законы распределения, такие как нормальный, экспоненциальный, Вейбулла и др. В этом случае применяются вероятностные бумаги соответствующих законов распределения. Для проверки сходимости распределения пробивных напряженностей электрического поля тому или иному закону используются различные критерии согласия. Наиболее широкое применение для оценки сходимости нашел критерий Пирсона. Применение критерия Пирсона  $P(\chi^2)$  сводится к вычислению  $\chi^2$  по уравнению

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(n_j - \tilde{n}_j)^2}{\tilde{n}_j}, \quad (9)$$

где  $n_j$  – наблюдаемые частоты,

$\tilde{n}_j$  – выравнивающие частоты,

$k$  – число разрядов.

Расчет производится по схеме, приведенной в табл. 1.

Таблица 1

Границы разрядов $x_{j-1}, x_j$	Наблюдаемые частоты $n_j$	Выравнивающие частоты $\tilde{n}_j$	$n_j - \tilde{n}_j$	$(n_j - \tilde{n}_j)^2$	$\frac{(n_j - \tilde{n}_j)^2}{\tilde{n}_j}$
1					
...					
k					
	$\Sigma =$	$\Sigma =$	–	–	$\Sigma = \chi^2$

При употреблении критерия согласия Пирсона важное значение имеет правильный подсчет числа степеней свободы, которое находится как

$$\nu = k - q, \quad (10)$$

где  $k$  – число разрядов,

$q$  – число параметров (связей) закона распределения.

Для нормального распределения такими параметрами являются: среднее значение, среднеквадратическое отклонение и фиксированная сумма наблюдаемых частот, т. е.  $\nu = k - 3$ .

Для найденных значений  $\nu$  и  $\chi^2$  определяют величину  $P(\chi^2)$  из стандартных таблиц [2] при заданной вероятности  $P$ . Расхождения считаются существенными, если  $\frac{|\chi^2 - \nu|}{\sqrt{2\nu}} \geq 3$ , и случайными, если  $\frac{|\chi^2 - \nu|}{\sqrt{2\nu}} < 3$ .

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Цель работы

Определить параметры функции распределения пробивных напряженностей электрического поля в диэлектриках.

### 2.2. Задача работы

Оценить законы распределения значений пробивных напряженностей электрического поля. Выбрать испытательную напряженность электрического поля.

### 2.3. Экспериментальная установка

Испытания диэлектриков на пробой обычно проводят на образцах, обеспечивающих создание равномерного электрического поля и исключающих образование поверхностного перекрытия. Чаще всего для этого применяют плоские или цилиндрические образцы. Для проведения испытаний на пробой используют установки, электрическая схема которых представлена на рис. 1.

Включение установки производится пакетным выключателем ПВ. В этом случае напряжение сети через блокировочные контакты БК и нормально замкнутые контакты реле тока РТ после нажатия кнопки «Пуск» подводится к обмотке магнитного пускателя МП. При его срабатывании замыкаются нормально разомкнутые контакты МП и напряжение сети подводится к регулировочному автотрансформатору АТ и к сигнальной лампе ЛВ – «Высокое напряжение».

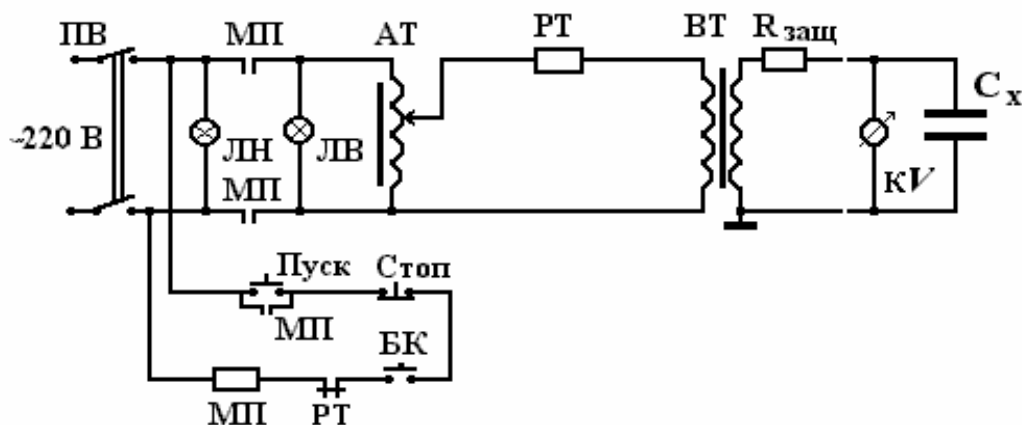


Рис. 1. Электрическая схема установки для испытания на пробой

Напряжение с автотрансформатора через катушку реле тока РТ подается на первичную обмотку высоковольтного трансформатора ВТ. Высокое напряжение, снимаемое с вторичной обмотки высоковольтного транс-

форматора, через защитное сопротивление  $R_{заш}$  подается на образец  $C_x$  и измеряется киловольтметром КВ. При пробое образца или его перекрытии срабатывает реле тока РТ и своим контактом РТ размыкает цепь питания катушки магнитного пускателя МП и, тем самым, снимает высокое напряжение с образца. Для обеспечения безопасности при проведении испытаний на пробой испытательная камера с образцом снабжена блокировкой БК, которая за счет размыкания своих контактов в цепи питания катушки магнитного пускателя МП отключает высокое напряжение.

Контроль подачи напряжения на установку осуществляется сигнальной лампой ЛН – «Низкое напряжение» в схеме управления.

**ВНИМАНИЕ! Работа с образцом в измерительной камере должна производиться только при снятом высоком напряжении и выключенной установке!**

#### **2.4. Порядок работы**

1. Подготовьте партию из 20–30 образцов. Материал, размеры и количество образцов в партии указываются преподавателем.

2. Установите образец в измерительную ячейку и произведите включение установки пакетным выключателем ПВ и кнопкой «Пуск». Перед включением установки необходимо убедиться, что ручка автотрансформатора установлена в положение «0».

3. Произведите пробой образца при плавном подъеме напряжения. Для каждого образца фиксируется  $U_{пр}$  и определяется место пробоя.

**Примечание.** В расчет принимаются только образцы, пробой которых произошел под электродом.

4. Для каждого образца вычислите  $E_{пр}$ , и их значения расположите в вариационный ряд в порядке возрастания.

5. Определите значение  $E_T$  из соотношения

$$E_T \geq 3\eta E_{пр.макс}, \quad (11)$$

где  $E_{пр.макс}$  – наибольшее значение пробивной напряженности электрического поля в вариационном ряду.

6. Рассчитайте  $\nu$  по соотношению

$$\nu \geq 2^{E_T/\eta E_{пр}}. \quad (12)$$

**Примечание.** Каждому члену бригады руководителем указывается свое значение  $\nu$ .

7. Для всех значений  $E_{пр}$  вариационного ряда рассчитайте величину

$$\beta_i = \frac{E_T}{\eta E_{пр.i}}. \quad (13)$$



8. Для всех значений  $E_{np}$  вариационного ряда определите величину  $y$  по уравнению (3) и  $Q(E_{np})$  по выражению

$$Q(E_{np.i}) = \frac{n_i}{N + 0.5}, \quad (14)$$

где  $n_i$  – число образцов, пробитых при напряженности поля  $E_{np.i}$  и меньше;

$N$  – общее число испытываемых образцов.

9. Введите полученные значения  $E_{np.i}$  в ЭВМ в виде матрицы и проведите последующую обработку данных с использованием программы **Mathcad**.

10. Вычислив значения  $Z$  по уравнениям (5, 6, 7, 8) для каждого значения  $E_{np.i}$ , постройте зависимость  $Z = f(y)$  по экспериментальным данным.

Для нахождения экстраполяционной кривой зависимость  $Z = f(y)$  в программе **Mathcad** преобразуется в зависимость вида  $f(x) = \text{intercept}(y,z) + \text{slope}(y,z)x$ . Решение данного уравнения позволяет графически найти постоянные коэффициенты  $a$  и  $b$  линейного уравнения (8).

**Примечание.** Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  уравнения (8) можно также найти методом наименьших квадратов. Для этого необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N Z_i y_i - b \cdot \sum_{i=1}^N y_i^2 - a \sum_{i=1}^N y_i = 0 \\ \sum_{i=1}^N Z_i - b \cdot \sum_{i=1}^N y_i - N \cdot a = 0 \end{cases}. \quad (15)$$

11. По найденным значениям  $a$  и  $b$  и выражениям (6) и (7) определите  $v_o$  и  $p$ . Результаты расчета занесите в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	$E_{np.i}$ , В/м	$\beta_i$	$v_i$	$\ln y_i$	$Q(E_{np})$	$\ln\{-\ln[1-Q(E_{np_i})]\}$	$Z_i$
1							
2							
...							

12. Проведите обработку полученных экспериментальных данных на вероятностных бумагах Вейбулловского и двойного показательного законов распределения.

13. Проверьте выполнимость того или иного закона распределения с использованием критерия согласия Пирсона. Результаты расчетов представьте в виде таблицы (табл. 1).

14. Объясните полученные результаты.

### **3. Контрольные вопросы**

1. Какова причина разброса значений пробивных напряженностей электрической прочности диэлектриков?
2. Что понимается под локальной напряженностью электрического поля и чем определяется ее величина?
3. Какими законами описывается распределение пробивных напряженностей электрического поля диэлектриков?
4. Как связаны между собой характеристики неоднородности и величины пробивной напряженности электрического поля диэлектриков?

### **4. Список литературы**

1. Дмитревский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции. – М.: Энергоиздат, 1981. – 391 с.
2. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М.: Изд-во «Наука», 1971. – 576 с.
3. Синявский В.Н. Расчет и конструирование электрокерамических конструкций. – М.: Энергия, 1977. – 190 с.
4. Меркулов В.И. Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях: учебное пособие. – Томск: ИПФ ТПУ, 2001. – 152 с.

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕКИНГОСТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### 1. Общие сведения

При помещении диэлектрика в сильное электрическое поле наблюдается появление отдельных искровых разрядов вдоль его поверхности. При повышении напряжения эти искровые разряды сливаются, образуя частичные дужки, которые при дальнейшем повышении напряжения перерастают в сплошной поверхностный разряд, соединяющий оба электрода. В случае испытания изоляторов это явление часто называют перекрытием. При достаточной мощности источника напряжения поверхностный разряд обычно переходит в электрическую дугу. Образование электрической дуги является нежелательным (опасным) явлением, т. к. может привести к разрушению изолятора.

Поверхностный разряд диэлектрика, находящегося в воздухе, представляет собой пробой воздуха, протекающий, однако, в специфических условиях, обусловленных присутствием диэлектрика, который оказывает существенное влияние на развитие процесса пробоя воздуха. В связи с этим закономерности поверхностного разряда не могут быть полностью сведены к закономерностям обычного пробоя воздуха.

Это связано с тем, что присутствие в разрядном промежутке диэлектрика вызывает искажение электрического поля за счет различия диэлектрических проницаемостей и проводимостей воздуха и диэлектрика. Кроме того, на поверхности диэлектрика могут осаждаться поверхностные заряды, которые будут оказывать влияние как на форму электрического поля, так и на объемную ионизацию воздуха. При высокой частоте электрического поля и большой диэлектрической проницаемости материала существенное влияние на процесс поверхностного разряда оказывают емкостные токи, протекающие на границе *диэлектрик – воздух*. Поэтому напряжение, при котором происходит поверхностный разряд, может значительно отличаться от напряжения пробоя воздуха при тех же условиях, но в случае отсутствия диэлектрика. На величину напряжения поверхностного разряда значительное влияние оказывает состояние поверхности диэлектрика (степень загрязнения, увлажненность и т. д.).

Изучение закономерностей поверхностного разряда, в зависимости от ряда факторов (температура, влажность, плотность воздуха, частота, форма приложенного электрического поля, величина диэлектрической проницаемости материала), весьма важно не только для установления физической сущности описываемого явления, но и для практических целей.

Установление закономерностей рассматриваемого явления в однородном поле позволяет вскрыть физическую сущность явления поверхностного разряда вообще, а также помогает разобраться в более сложных случаях поверхностного разряда в неоднородных полях.

С развитием поверхностных разрядов тесно связано явление трекингообразования, т. е. образование на поверхности диэлектрика трека – науглероженного проводящего следа. Развитие трека связано с наличием загрязнения на поверхности материала (пыль, растворенные соли, сернистые соединения, дым и др.) и влаги из окружающей атмосферы. В этом случае пленка влаги с растворенными в ней солями имеет высокую электрическую проводимость. Возникающий под воздействием напряжения ток утечки распределяется неравномерно, вследствие чего пленка влаги в отдельных местах испаряется, происходит разрыв проводящей пленки и возникновение мощной искры. Эти искры возникают в разных местах, вызывая образование в материале проводящих каналов – треков.

Некоторые авторы связывают образование трека с термической деструкцией изоляционного материала вследствие разогрева поверхностными частичными разрядами. Другие доказывают второстепенную роль нагрева поверхности, считая основной причиной разрушения полимерных изоляторов создание химически активной среды в результате комплексного воздействия газового разряда и влаги на поверхность изолятора. Они считают, что при относительно высоких напряжениях, но при малых плотностях тока утечки по поверхности основную роль играют не тепловые, а эрозионные и химические процессы. Эти процессы сопровождаются местным разрушением изоляции и появлением токопроводящих низкоомных путей или каналов (треков).

Косвенным подтверждением этого являются результаты исследований полимеров на основе циклоалифатических эпоксидных соединений методами масс-спектрометрии. Данные исследования показали, что под воздействием дуговых поверхностных разрядов происходит деструкция таких полимеров. При этом наиболее вероятна термоокислительная деструкция. Предполагаемая при этом температура поверхности изоляционного материала под воздействием трека составляет 573÷673 К.

Данные масс-спектрометрического анализа подтверждаются термогравиметрическими кривыми, полученными на дериватографе системы Ф. Паулик. Согласно дериватограммам процесс разложения для полимеров на основе УП-612 начинается при температуре 503 К, а для УП-632 – при 493 К. Это дополнительно свидетельствует о частичном разложении при трекинге и подтверждает предположение о нагреве поверхности изоляционного материала до температуры выше 493 К.

Обычно термическую стойкость полимеров связывают с энергией активации термического разложения, являющейся одной из кинетических характе-

ристик процесса деструкции. Можно предположить, что величина энергии активации косвенно характеризует и трекинговость полимеров.

Это согласуется с тем, что полимеры на основе ЦАЭС, обладающие более высокой энергией активации разложения, более устойчивы к термоокислению и воздействию поверхностных частичных разрядов. В значительной степени стойкость полимеров к поверхностным частичным разрядам характеризуют потери в массе и способность к коксуемости, определяемой коксовым остатком, с уменьшением которого снижается вероятность образования токопроводящей науглероженной дорожки. Данные трекинговости полимеров согласуются с рассчитанной энергией активации и коксовым остатком. Таким образом, значения эффективной энергии активации процесса разложения в сочетании с данными о коксуемости можно рекомендовать в качестве априорного показателя стойкости полимера к поверхностным частичным разрядам.

Исследования материалов на основе резин показали, что их трекинговость в основном зависит от типа каучука, являющегося основным компонентом, и состава рецептурной смеси. Так, резины на основе изопренового каучука СКИ-3, в зависимости от рецептуры добавок смеси, могут быть как трекинговыми, так и нетрекинговыми. С другой стороны, смеси с различными каучуками имеют различную трекинговость (от 3 до 50 ч) при одной и той же рецептуре.

## **2. Экспериментальная часть**

### **2.1. Цель работы**

Определить трекинговость различных электроизоляционных материалов.

### **2.2. Задача работы**

Изучить методику проведения испытаний на трекинговость. Оценить влияние состояния поверхности на трекинговость.

### **2.3. Методика проведения испытаний.**

#### **Описание экспериментальной установки**

Для испытания на трекинговость материалов могут использоваться различные методы, к которым относятся:

- 1) метод пыли и тумана;
- 2) метод периодического смачивания;
- 3) метод каплепадения;
- 4) метод стекающей пленки жидкости.

На практике для исследования трекинговости наиболее широкое применение нашли метод каплепадения и метод стекающей пленки жидкости. Эти методы достаточно просты в реализации, не требуют специ-

ального оборудования и могут использовать обычные установки высокого напряжения переменного тока частотой 50 Гц.

В качестве экспериментальной установки в данной работе использована установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Напряжение от сети через блокировочные контакты БК подводится к пакетному выключателю ПВ, к сигнальной лампе ЛН («Низкое напряжение») и на схему управления. При включении кнопки «пуск» срабатывает магнитный пускатель МП, и напряжение через его контакты подводится к сигнальной лампе ЛВ («Высокое напряжение») и к регулировочному автотрансформатору АТ. Напряжение, снимаемое с автотрансформатора, подводится к высоковольтному трансформатору ВТ, а с его вторичной обмотки к образцу  $C_x$ . Вращая рукоятку автотрансформатора, повышают напряжение на образце. Величина напряжения контролируется киловольтметром КV непосредственно на образце. При возникновении перекрытия или пробое образца  $C_x$ , во вторичной и первичной обмотках высоковольтного трансформатора возникает бросок тока, за счет чего срабатывает реле максимального тока  $P_{\max}$ , которое своим контактом разрывает цепь питания магнитного пускателя МП. За счет этого происходит размыкание его нормально разомкнутых контактов и разрывается цепь подачи напряжения на автотрансформатор и первичную обмотку высоковольтного трансформатора.

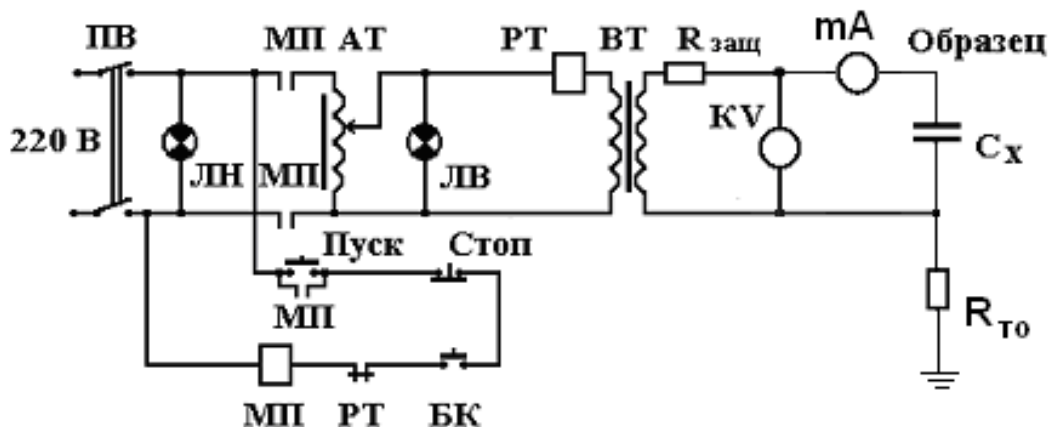


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема установки:

БК – блокировочные контакты двери ограждения;

ПВ – пакетный выключатель;

ЛН, ЛВ – сигнальные лампы «низкого» и «высокого» напряжения;

КV – киловольтметр для измерения напряжения;

АТ, ВТ – автотрансформатор и высоковольтный трансформатор;

$R_{\text{защ}}$  – защитное (токоограничивающее) сопротивление;

МП – контакты и обмотка магнитного пускателя;

PT – контакты и обмотка реле максимального тока;

$R_m$  – токоограничивающее сопротивление на образце

### Внимание!

Учитывая, что установка является высоковольтной, при выполнении данной работы нужно соблюдать меры техники безопасности при работе на установках высокого напряжения. Чтобы исключить случайное попадание под высокое напряжение, установка должна иметь блокировочные контакты двери ограждения и обеспечивать автоматическое отключение установки в момент пробоя, перекрытия или образования трека.

### 2.4. Подготовка образцов

По методу стекающей пленки жидкости образец в форме пластинки размером 120x50 мм (рис. 2) снабжается двумя плоскими электродами из нержавеющей стали по концам. Расстояние между электродами составляет 50 мм.

Форма и размеры электродов указаны на рис. 3–5. Пластинку закрепляют в наклонном положении под углом  $45^\circ$  к горизонтали, а под верхний электрод подкладывают сложенную в несколько слоев фильтровальную бумагу. На нее по каплям подается электролит (с объемом капли порядка  $25 \text{ мм}^3$ ), содержащий 0.1 % по массе  $\text{NH}_4\text{Cl}$  и 0.02 % по массе вещества, способствующего смачиванию.

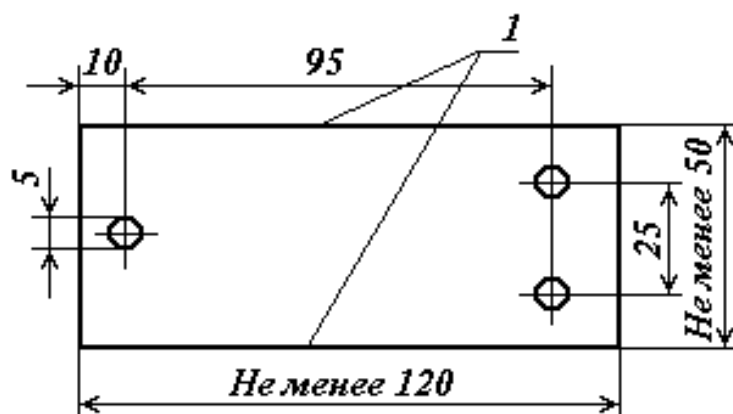


Рис. 2. Испытуемый образец с отверстиями для крепления электродов

После подачи электролита на наклонной поверхности образца через некоторое время образуется пленка жидкости, медленно стекающей в установленную под образцом ванночку. Последовательно с электродами включается токоограничивающее сопротивление  $R$ , которое выбирается из табл. 2.

Таблица 2

Условия испытания при определении времени трекообразования  $\tau_{тр}$   
методом стекающей жидкости

Степень напряжения, кВ	Расход электролита, мл/мин	Число капель в минуту	Сопротивление $R$ , кОм
От 1 до 1.75	0.075	3	1
2–2.75	0.15	6	10
3–3.75	0.30	12	22
4–4.75	0.60	24	33
5–6	0.90	36	50

Согласно ГОСТ 27474–87 рассматриваются два метода оценки трекинговости материала, как при воздействии постоянной величины приложенного напряжения (метод 1), так и при ступенчатом повышении напряжения (метод 2).

Конец испытаний оценивается по двум критериям:

- 1) испытание считается оконченным (критерий *A*), когда ток, протекающий через образец, превышает 60 мА или когда предохранитель, включенный последовательно с образцом, перегорает и размыкает цепь. Такой метод позволяет использовать автоматическую аппаратуру для одновременного испытания нескольких образцов;
- 2) испытание считается оконченным (критерий *B*), когда токопроводящий мостик доходит до отметки, нанесенной на поверхности образца на расстоянии 25 мм от нижнего электрода. Данный критерий предполагает визуальное наблюдение.

Если нет других указаний, испытание на трекинговость проводят при температуре окружающей среды  $23 \pm 2$  °С на комплектах из пяти образцов для каждого материала. Образец с плоской испытываемой поверхностью устанавливают на нижней стороне под углом  $45^\circ$ , как показано на рис. 3. Расстояние между электродами  $50 \pm 0.5$  мм. Размеры электродов показаны на рис. 4 и рис. 5.

Загрязняющий раствор впрыскивают в фильтрованную бумагу так, чтобы фильтр как следует пропитался. Скорость подачи загрязняющего раствора должна соответствовать значениям, приведенным в табл. 2. При подготовке к испытаниям наблюдают за потоком жидкости в течение 10 мин и следят за тем, чтобы раствор равномерно растекался по поверхности испытываемого образца между электродами. Загрязняющий раствор должен вытекать из отверстия верхнего электрода, не затекая за края или верх фильтрованной бумаги.



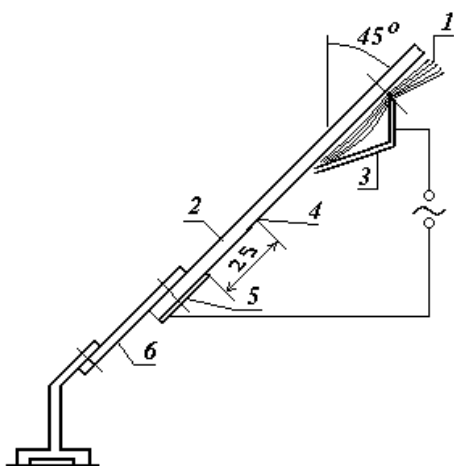


Рис. 3. Испытательная сборка:  
 1 – верхний электрод;  
 2 – пластинка испытуемого образца;  
 3 – зажим с фильтром; 4 – метка;  
 5 – нижний электрод;  
 6 – изоляционная подставка для образца

После регулировки подачи жидкости приступают к испытаниям, которые могут проводиться как при постоянном уровне напряжения (по методу 1), так и ступенчатом поднятии напряжения (по методу 2).

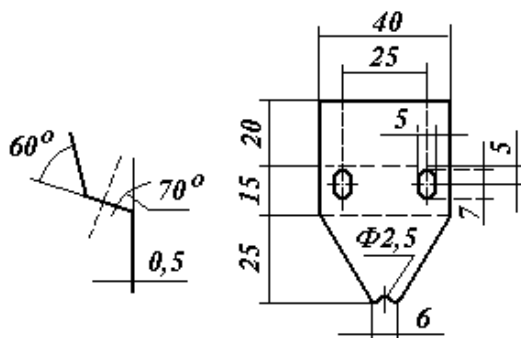


Рис. 4. Верхний электрод (нержавеющая сталь толщиной 0.5 мм)

По методу 1 при равномерном потоке загрязняющего раствора, в соответствии с табл. 2, включают напряжение и поднимают его до одного из предпочтительных значений. Затем включают устройство отсчета времени. Напряжение поддерживают неизменным в течение 6 ч.

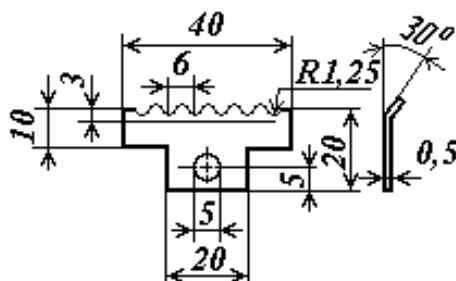


Рис. 5. Нижний электрод (нержавеющая сталь толщиной 0.5 мм). Шесть полусфер диаметром 2.5 мм

Если испытание нужно повторить при более высоком или более низком напряжении, для каждого выбранного напряжения испытывают новый комплект из пяти образцов.

Постоянное напряжение трекинга – это максимальное напряжение, которое все пять образцов выдерживают в течение 6 ч без образования трека.

По методу 2 выбирают начальное напряжение, кратное 250 В, так, чтобы выход из строя, в соответствии с критерием А (ток выше 60 мА), происходил не ранее третьей ступени напряжения (могут понадобиться предварительные испытания). При заданном равномерном потоке загрязняющего раствора включают напряжение и поднимают его до выбранного значения. Поддерживают это напряжение в течение 1 ч, а затем поднимают напряжение на ступень, кратную 250 В (1–2 кВ), каждый последующий час до выхода из строя образца по критерию В. Расход загрязняющего раствора и сопротивление резистора увеличивают по мере повышения напряжения (в соответствии с табл. 2).

Мерой трекинга является время образования токопроводящей дорожки до отметки длиной 25 мм.

### **2.5. Порядок выполнения работы**

1. Подготовьте образцы исследуемых материалов (согласно рис. 2).
2. Установите образцы в электродное устройство (согласно рис. 3).
3. Подготовьте раствор увлажняющей жидкости согласно рецептуре, задаваемой преподавателем (согласно ГОСТу).
4. Отрегулируйте уровень подачи увлажняющего раствора по числу падающих капель (3–5 капель в минуту) для образования на поверхности образца пленки жидкости.
5. Включите установку пакетным выключателем ПВ и кнопкой «Пуск». С помощью автотрансформатора АТ задайте необходимое значение высокого напряжения (величина напряжения задается преподавателем).
6. Измерьте с помощью секундомера общее время развития трека. Снимите зависимость длины пути трека от времени.
7. Данные измерений занесите в табл. 2.

Таблица 2

#### *Результаты измерений*

Образец № 1		Образец № 2		Образец № 3	
Время, с	Длина пути трека, мм	Время, с	Длина пути трека, мм	Время, с	Длина пути трека, мм

8. Постройте график изменения длины трекового пути от времени испытания.
9. Рассчитайте скорость развития трека.

### **3. Контрольные вопросы**

1. Что такое трекингостойкость? Дайте определение.
2. Какова причина развития треков на поверхности диэлектрика?
3. Как влияет материал диэлектрика на трекингостойкость?
4. Какое влияние оказывает состояние поверхности диэлектрика на развитие трека?

### **4. Список литературы**

1. Дмитревский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции. – М.: Энергоиздат, 1981. – 391 с.
2. Меркулов В.И. Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях: учебное пособие. – Томск: ИПФ ТПУ, 2001. – 152 с.
3. ГОСТ 27474–87. Материалы электроизоляционные. Методы испытания на сопротивление образованию токопроводящих мостиков и эрозии в жестких условиях окружающей среды.

## Лабораторная работа № 7

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

#### 1. Общие сведения

Отказы электрической изоляции в электроизоляционных конструкциях имеют сложную физическую природу, что затрудняет разработку математической модели, позволяющей производить расчет срока службы для конкретных конструкций.

В настоящее время при оценке срока службы электрической изоляции используются различные эмпирические уравнения, основанные на экспериментальных зависимостях времени жизни от напряженности электрического поля, температуры и др. факторов. Однако ими не всегда можно воспользоваться, так как в большинстве случаев не известны значения параметров, входящих в эти уравнения.

Если воспользоваться термофлуктуационной теорией разрушения диэлектриков, описанной в [1], то уравнение «кривой жизни» при отсутствии частичных разрядов имеет вид

$$\frac{2kT}{D} \ln \frac{\tau}{\tau_0} = \varphi(x), \quad (1)$$

где

$$\varphi(x) = \sqrt{1-2x} - x \ln \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{x} \sqrt{1-2x} - 1 \right), \quad (2)$$

$$x = \frac{1}{D} \sqrt{\left( A e^{-bT} \beta \eta E \right)^2 + \gamma^2 \sigma^2}. \quad (3)$$

При отсутствии механических нагрузок

$$x = \frac{A e^{-bT} \beta \eta E}{D}. \quad (4)$$

Уравнение надежности электрической изоляции:

$$P(\tau) = \exp \left[ - \frac{dS_m}{y \nu_0 \eta} \cdot \exp(1.67 y \cdot \ln 1.3 p) \right], \quad (5)$$

где

$$y = \frac{0.482}{\left( \ln \frac{1 - \frac{1}{\nu}}{1 - \frac{1}{\beta}} \right)^{0.82}}; \quad (6)$$

$D, p, A, b, \nu_o, \nu, \gamma$  – параметры, характеризующие материал изоляции;

$K$  – постоянная Больцмана, равная  $1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/св. град;

$T$  – температура изоляции в К;

$E$  – средняя напряженность электрического поля;

$\beta$  – коэффициент превышения местной напряженности поля над средней;

$\eta$  – коэффициент неоднородности электрического поля, создаваемого электродами;

$$\eta = \frac{E_{max}}{E_{cp}};$$

$\sigma$  – механическое напряжение;

$d$  – толщина диэлектрика;

$S_m$  – площадь меньшего электрода.

Некоторые параметры практически постоянны для полимерных диэлектриков. Так, например, энергия диссоциации  $D$  для связи  $-C-C-$ , характерная для большинства полимерных диэлектриков, может быть принята равной  $5.5 \cdot 10^{-19}$  Дж. Другие параметры заметно меняются от партии к партии и зависят от состава и технологии изготовления электроизоляционных материалов.

В данной работе показывается возможность определения параметров  $b, p, A, \nu$  и  $\nu_o$  по результатам экспериментов.

## 2. Методика определения параметров уравнения надежности электрической изоляции по результатам экспериментов

При специально поставленных опытах параметры можно оценить приближенно, используя свойства уравнений (1) и (5).

Так, если  $d, S_m, \eta, p$  и  $P(t)$  постоянны, то  $y$  и  $\beta$  тоже будут постоянны и не зависят от действующей на изоляцию нагрузки.

Для определения параметров  $A, p, b, \nu, \nu_o$  подбирается группа изделий или образцов, имеющих одинаковые размеры ( $dS_m / \eta = const$ ) и

изготовленных из одного материала по одной и той же технологии, обеспечивающей постоянство параметров при испытании разных партий из этой группы образцов. Подобранный таким образом группа изделий или образцов разбивается на две партии. Каждая партия испытывается нагрузкой, программа которой приведена в табл. 1.

Таблица 1

N партии образцов	Нагрузка на образцы при испытаниях	
	Температура, $T$	Напряженность поля, $E$
I	$T_I$	$E_I$
II	$T_{II}$	$E_{II}$

В процессе испытаний фиксируется время до пробоя образцов  $\tau$ .

### 2.1. Определение параметра $b$

Параметр  $b$  определяется по результатам испытаний образцов I и II партии. Согласно уравнению (1) для каждого образца I и II партий можно, соответственно, записать:

$$\frac{2kT_I}{D} \ln \frac{\tau_I}{\tau_o} = \varphi(X_I), \quad (7)$$

$$\frac{2kT_{II}}{D} \ln \frac{\tau_{II}}{\tau_o} = \varphi(X_{II}). \quad (8)$$

Используя полученные в результате эксперимента значения  $\tau_I$  и  $\tau_{II}$ , можно найти из (7) и (8) величины  $\varphi(X_I)$  и  $\varphi(X_{II})$  для каждого образца I и II партий. По найденным значениям  $\varphi(X_I)$  и  $\varphi(X_{II})$  из уравнения (2) рассчитываются значения  $X_I$  и  $X_{II}$  для каждого образца обеих партий.

С учетом (4), при  $E_I = E_{II}$ , запишем:

$$\frac{X_I}{X_{II}} = \frac{Ae^{-bT_I} \eta \beta_I E_I}{Ae^{-bT_{II}} \eta \beta_{II} E_{II}} = \frac{e^{-bT_I}}{e^{-bT_{II}}} \cdot \frac{\beta_I}{\beta_{II}}. \quad (9)$$

Если  $\varphi(X_I)$  и  $\varphi(X_{II})$  (соответственно,  $X_I$  и  $X_{II}$ ) определены при  $\tau_I$  и  $\tau_{II}$  для образцов, имеющих одинаковую вероятность безотказной работы, то  $\beta_I = \beta_{II}$ . В этом случае уравнение (9) примет вид

$$\frac{X_I}{X_{II}} = e^{b(T_{II} - T_I)}. \quad (10)$$

Откуда

$$b = \frac{1}{T_{II} - T_I} \ln \frac{X_I}{X_{II}}. \quad (11)$$

Для повышения достоверности расчетов величина  $b$  находится для каждой пары образцов, имеющих одинаковую вероятность безотказной работы. За значение  $b$  принимается его математическое ожидание:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n}. \quad (12)$$

## 2.2. Определение параметров $A$ и $\nu$

**2.2.1.** При известных значениях  $D$  и  $b$  параметр  $A$  можно найти из выражения (4) при условии, что известно значение  $X$  и  $\beta$ . Как показано в п. 2.1, значение  $X$  можно найти по результатам эксперимента для любого образца в партии.

Из уравнений (5) и (6) следует, что при  $P(\tau) \rightarrow 0$ ,  $y \rightarrow 0$ , а  $\beta \rightarrow 1$ .

Вероятность безотказной работы находится из выражения

$$P(\tau) = \frac{n-i+0.5}{n+0.5}, \quad (13)$$

где  $n$  – число образцов, используемых в партии;

$i$  – число образцов, пробитых к моменту времени  $\tau$ .

Следовательно,  $P(\tau) \rightarrow 0$ , а  $\beta \rightarrow 1$  для последнего образца в партии, если  $n \rightarrow \infty$ . Для гипотетической партии, состоящей из  $(n = \infty)$ -образцов, величину  $A$  можно найти из выражения

$$\beta_{\tau_n} = \frac{X\tau_n}{\frac{1}{D} A e^{-bT} \eta E}, \quad (14)$$

где  $X\tau_n$  – значение  $X$ , подсчитанное при времени отказа последнего образца партии.

При реальных исследованиях  $n$ , как правило, не превышает 50. Следовательно,  $P(\tau) \neq 0$ , а  $\beta \neq 1$ . Анализ показывает, что при  $n = 50$   $\beta_{\tau_n} = 2.0 \div 2.5$ . Поэтому значение  $A$  находится из выражения

$$\beta_{\tau_n} = \frac{X\tau_n}{\frac{1}{D} A e^{-bT} \eta E}. \quad (15)$$

**2.2.2.** Значение  $\nu$  оценивается из условия, что при  $P(\tau) \rightarrow 1$   $y \rightarrow \infty$ ,  $\nu \rightarrow \beta$  для первого образца в партии, если  $n \rightarrow \infty$ . Для гипоте-

тической партии, состоящей из  $(n \rightarrow \infty)$ -образцов,  $V$  можно найти из выражения

$$\beta_{\tau_1} = \frac{X\tau_1}{\frac{1}{D} A e^{-bT} \eta E} = \nu, \quad (16)$$

где  $X\tau_1$  – значение  $X$ , подсчитанное при времени отказа первого образца в партии.

При испытании 50 образцов можно принять:

$$\nu = [1.2 \div 2] \beta. \quad (17)$$

### 2.3. Определение параметров $p$ и $\nu_0$

Для определения  $p$  и  $\nu_0$  преобразуем выражение (5) следующим образом:

$$\ln[-\ln P(\tau)] + \ln y = \ln \frac{dS_m}{\eta \nu_0} - y \ln \frac{0.65}{p^{5/3}}. \quad (18)$$

Обозначим

$$Z = \ln[-\ln P(\tau)] + \ln y, \quad (19)$$

$$a' = \ln \frac{dS_m}{\eta \nu_0}, \quad (20)$$

$$b' = \ln \frac{0.65}{p^{5/3}}. \quad (21)$$

Тогда

$$Z = a' - b'y. \quad (22)$$

Вычислив значение  $Z$  для каждого образца, построим зависимость  $Z = f(y)$ , из которой найдём постоянные коэффициенты линейного уравнения (22)  $a'$  и  $b'$ .

По найденным значениям  $a'$  и  $b'$  и выражениям (20) и (21) определяют  $\nu_0$  и  $p$ .



## 2. Расчет параметров уравнения надежности

### 3.1. Общие указания

**3.1.1.** Расчеты проводятся в системе СИ.

**3.1.2.** Расчет параметров удобнее проводить, заполняя табл. 2.

**3.1.3.** Пояснения, необходимые для заполнения табл. 2 и вычисления параметров, даны в п. 3.1÷3.5.

**3.1.4.** Те столбцы табл. 2, которые нужно заполнить, даются в пояснениях в скобках, например (С – 2.3).

**3.1.5.** Расчеты проводят до третьей значащей цифры после запятой.

**Примечание.** Все расчеты и обработку полученных результатов можно выполнить на ЭВМ, используя программу *Mathcad* в соответствии с примером, приведенным в Приложении.

### 3.2. Обработка результатов испытаний

**3.2.1.** Запишем времена жизни образцов каждой партии в порядке их возрастания в табл. 2 (С – 2.3).

**3.2.2.** Рассчитаем вероятность безотказной работы образцов (С – 4) в соответствии с уравнением (13).

**3.2.3.** Найдем значения  $\ln \frac{\tau}{\tau_0}$  для всех образцов каждой партии, (С – 5.6), где  $\tau_0 = 1 \cdot 10^{-13}$  с.

Таблица 2

№ п/п	$\tau_1$	$\tau_2$	$P(\tau)$	$\ln \frac{\tau_I}{\tau_0}$	$\ln \frac{\tau_{II}}{\tau_0}$	$\phi(x_I)$	$\phi(x_{II})$	$X_I$	$X_{II}$	$b$	$\beta_I$	$\beta_{II}$	$y_I$	$y_{II}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1														
2														
...														

### 3.3. Определение $b$

**3.3.1.** Рассчитываем численные значения  $\phi(x_I)$  и  $\phi(x_{II})$ , согласно выражениям (7, 8), для всех образцов I и II партий (С – 7.8), где  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/св. град.

**3.3.2.** По найденным значениям  $\phi(x_I)$  и  $\phi(x_{II})$  находим, используя табл. 3, значения  $X_I$  и  $X_{II}$  (С – 9.10).

Таблица 3

Зависимость  $\frac{2KT}{D} \ln \frac{\tau}{\tau_0} = \phi(X)$  от  $X$

$X$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,00	0,0000	0,9914	0,9842	0,9775	0,9712	0,9651	0,9592	0,9534	0,9479	0,9424
0,01	0,9370	0,9318	0,9267	0,9216	0,9166	0,9117	0,9069	0,9022	0,8975	0,8928
0,02	0,8882	0,8836	0,8791	0,8746	0,8702	0,8658	0,8614	0,8571	0,8528	0,8486
0,03	0,8444	0,8403	0,8362	0,8321	0,8281	0,8241	0,8201	0,8161	0,8122	0,8083
0,04	0,8044	0,8006	0,7968	0,7930	0,7892	0,7854	0,7817	0,7780	0,7743	0,7706
0,05	0,7669	0,7633	0,7597	0,7561	0,7525	0,7490	0,7455	0,7420	0,7385	0,7350
0,06	0,7315	0,7281	0,7247	0,7213	0,7179	0,7145	0,7111	0,7078	0,7045	0,7012
0,07	0,6979	0,6946	0,6913	0,6881	0,6849	0,6817	0,6785	0,6753	0,6721	0,6689
0,08	0,6658	0,6627	0,6596	0,6565	0,6534	0,6503	0,6472	0,6441	0,6411	0,6381
0,09	0,6351	0,6321	0,6291	0,6261	0,6231	0,6202	0,6173	0,6144	0,6115	0,6086
0,10	0,6057	0,6028	0,5999	0,5970	0,5942	0,5914	0,5886	0,5858	0,5830	0,5802
0,11	0,5774	0,5746	0,5718	0,5690	0,5663	0,5636	0,5609	0,5582	0,5555	0,5528
0,12	0,5501	0,5474	0,5447	0,5420	0,5393	0,5367	0,5341	0,5315	0,5290	0,5263
0,13	0,5237	0,5211	0,5185	0,5159	0,5133	0,5108	0,5083	0,5058	0,5033	0,5008
0,14	0,4983	0,4958	0,4933	0,4908	0,4883	0,4858	0,4833	0,4809	0,4785	0,4761
0,15	0,4787	0,4713	0,4689	0,4665	0,4661	0,4617	0,4593	0,4569	0,4545	0,4521
0,16	0,4498	0,4475	0,4452	0,4429	0,4406	0,4383	0,4360	0,4337	0,4314	0,4291
0,17	0,4268	0,4245	0,4222	0,4199	0,4177	0,4155	0,4133	0,4111	0,4089	0,4067

В программе *Mathcad* (Приложение) для нахождения  $X_I$  и  $X_{II}$  используется функция **root**:

$$X_I = (Z1_i) = \text{root}[V1(x1, t1_i), x1],$$

$$X_{II} = (Z2_i) = \text{root}[V2(x2, t2_i), x2],$$

где

$$V1(x1, t1_i) = f1(x1) - 2K \frac{T1}{D} \cdot \ln \left( \frac{t1}{t0} \right) = \phi(X_I) - 2K \frac{T1}{D} \cdot \ln \left( \frac{t1}{t0} \right),$$

$$V2(x2, t2_i) = f2(x2) - 2K \frac{T2}{D} \cdot \ln \left( \frac{t2}{t0} \right) = \phi(X_{II}) - 2K \frac{T2}{D} \cdot \ln \left( \frac{t2}{t0} \right).$$

Значения  $f_1(x_1)$  и  $f_2(x_2)$  соответствуют уравнению (2).

При каждой вероятности пробоа находим из уравнения (11) значение  $b$  (С – 11) и в соответствии с уравнением (12) его математическое ожидание.

**Примечание.** В дальнейших расчетах значение  $b$  заменяем его математическим ожиданием.

### 3.4. Определение $A$ и $\nu$

3.4.1. По результатам испытаний I партии находим параметр

$$A = \frac{X\tau_n \cdot D}{e^{-bT_1} \eta E_1 \beta \tau_n},$$

где  $X\tau_n$  – значение  $X$ , подсчитанное при времени отказа последнего образца данной партии.

3.4.2. Согласно п. 2.2.1 принимаем  $\beta \tau_n = 2.0 \div 2.5$

3.4.3. Значение  $\beta \tau_1$  находим из выражения (14)

$$\beta \tau_1 = \frac{X\tau_1 \cdot D}{A e^{-bT_1} \eta E_1},$$

где  $X\tau_1$  – значение  $X$ , подсчитанного при времени отказа первого образца данной партии.

3.4.4. Зная значение  $\beta \tau_1$ , согласно п. 2.2.2 находим  $\nu$  из выражения  $\nu = \beta \tau_1 \approx 2.0 \div 2.5$ .

*Примечание.* Значения  $X\tau_n$  и  $X\tau_1$  берем из столбцов (9, 10) табл. 2.

### 3.5. Определение $\rho$ и $\nu_0$

3.5.1. Используя рассчитанные ранее значения параметров  $A$ ,  $b$  и значения  $X$ , находим значение  $\beta_i$  для каждого значения времени отказа образцов I и II партий (С – 12, 13) по уравнению

$$\beta_i = \frac{X_i \cdot D}{A e^{-bT} \eta E}.$$

3.5.2. Зная значение  $\beta_i$ , находим численное значение  $y_i$  (С – 14, 15) из уравнения (6).

3.5.3. Рассчитаем значения  $Z = \ln[-\ln P(\tau)] + y$  для каждого значения времени отказа образцов I и II партий.

3.5.4. На основании полученных данных строим зависимость  $Z = f(y)$  для образцов I, II партий и находим постоянные коэффициенты линейного уравнения (22). В программе *Mathcad* (Приложение) зависимость  $Z = f(y)$  интерполируется функцией вида:

$$f1(x) = \text{int except}(Y1, Z3) + \text{slope}(Y1, Z3) \cdot x,$$

$$f2(x) = \text{int except}(Y2, Z4) + \text{slope}(Y2, Z4) \cdot x,$$

принимая  $t = 1.25, 1.26 \dots 1.65$ .

**Примечание.** Значения коэффициентов  $a'$  и  $b'$  уравнения (22) можно также найти методом наименьших квадратов. Для этого необходимо решить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n Z_i y_i - b' \sum_{i=1}^n y_i^2 - a' \sum_{i=1}^n y_i &= 0 \\ \sum_{i=1}^n Z_i - b' \sum_{i=1}^n y_i - na' &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

**3.5.5.** Находим значение  $v_o$  из выражения

$$a' = \ln \frac{dS_M}{\eta \cdot v_o}.$$

**3.5.6.** Находим значение  $p$  из выражения

$$b' = \ln \frac{0.65}{p^{5/3}}.$$

## 4. Экспериментальная часть

### 4.1. Цель работы

Определить параметры уравнения надежности электрической изоляции по результатам эксперимента.

### 4.2. Задачи работы

Изучить зависимость длительной электрической прочности диэлектриков в функции от температуры и напряженности приложенного электрического поля.

Рассчитать параметры изоляции, входящие в уравнение надежности, на основе полученных результатов эксперимента.

### 4.3. Описание экспериментальной установки

Для испытания диэлектриков на пробой обычно используют плоские или цилиндрические образцы, обеспечивающие создание равномерного электрического поля и исключающие возможность поверхностного перекрытия. Проведение испытаний на пробой проводят на установках, электрическая схема которых представлена на рис. 1.

Включение установки производится пакетным выключателем ПВ. В этом случае напряжение сети через блокировочные контакты БК и нормально замкнутые контакты реле тока РТ после нажатия кнопки «Пуск» подводится к обмотке магнитного пускателя МП. При срабатывании магнитного пускателя замыкаются его нормально разомкнутые контакты МП и напряжение сети подводится к регулировочному автотрансформатору АТ и к сигнальной лампе ЛВ – «Высокое напряжение».

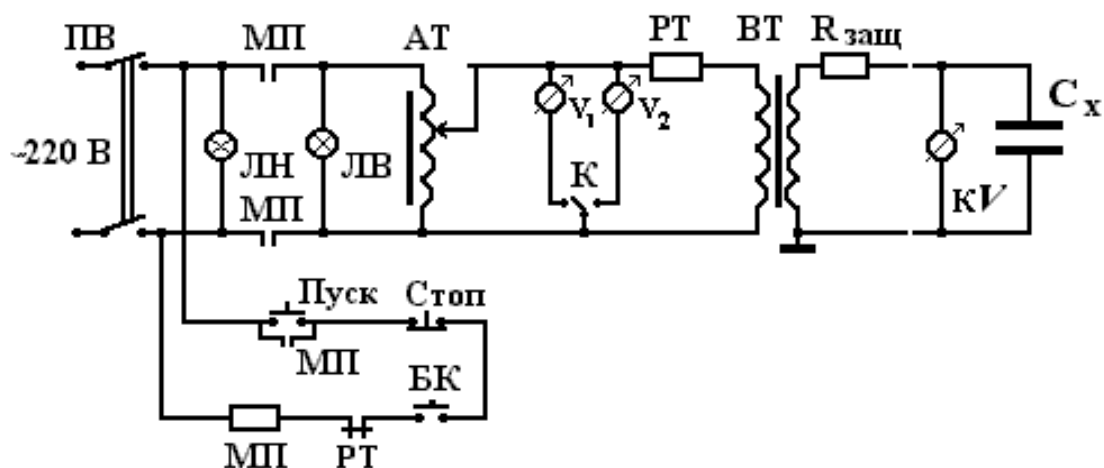


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема установки для испытания на пробой

Напряжение с автотрансформатора АТ через катушку реле тока РТ подается на первичную обмотку высоковольтного трансформатора ВТ. Высокое напряжение, снимаемое с вторичной обмотки высоковольтного трансформатора, через защитное сопротивление  $R_{защ}$  подается на образец  $C_x$  и измеряется киловольтметром КВ.

При пробое образца или его перекрытии срабатывает реле тока РТ и своим контактом РТ размыкает цепь питания катушки магнитного пускателя МП и, тем самым, снимает высокое напряжение с образца.

Для обеспечения безопасности при проведении испытаний на пробой испытательная камера с образцом снабжена блокировкой БК, которая за счет размыкания своих контактов в цепи питания катушки магнитного пускателя МП отключает высокое напряжение. Контроль за работой установки осуществляется загоранием сигнальных ламп ЛН («Низкое напряжение») и ЛВ («Высокое напряжение») в схеме управления.

**ВНИМАНИЕ!** Работа с образцом в измерительной камере должна производиться только при снятом высоком напряжении и выключенной установке!

#### 4.4. Порядок работы

**4.4.1.** Подготовить две партии образцов. Материал образцов, размеры и количество образцов в партии указываются преподавателем.

**4.4.2.** Поместить образцы в измерительную ячейку (термошкаф) и установить заданную преподавателем температуру  $T_I$  и  $T_{II}$ .

**4.4.3.** Включить установку пакетным выключателем ПВ и нажав кнопку «Пуск» подать напряжение на регулировочный автотрансформатор АТ.

**4.4.4.** Вращая ручку автотрансформатора АТ, подать на образцы заданное преподавателем напряжение, соответствующее напряженностям электрического поля  $E_I$  и  $E_{II}$ . В процессе испытаний фиксируется время до пробоя каждого образца.

**ВНИМАНИЕ!** Замена образца или какие-либо переключения в процессе работы должны проводиться при выключенной установке. Для этого необходимо снять высокое напряжение кнопкой «Стоп» и отключить установку пакетным выключателем ПВ.

**4.4.5.** Испытать каждую партию образцов нагрузкой, программа которой приведена в табл. 1.

**4.4.6.** Полученные данные занести в таблицу наблюдений, а при выполнении расчетов на ЭВМ занести эти данные в массив.

**4.4.7.** Выполнить расчеты согласно разделу 3 (при использовании ЭВМ сделать примеры расчетов), и объяснить полученные результаты и графики.

## **5. Контрольные вопросы**

1. Что понимается под длительной электрической прочностью?
2. От чего зависит значение длительной электрической прочности?
3. Какая связь между временем до пробоя, температурой и напряженностью приложенного электрического поля?
4. Какие параметры входят в уравнение надежности электрической изоляции и их физический смысл?

## **6. Список литературы**

1. Дмитревский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции. – М.: Энергоиздат, 1981. – 391 с.
2. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М.: Изд-во «Наука», 1971. – 576 с.
3. Синявский В.Н. Расчет и конструирование электрокерамических конструкций. – М.: Энергия, 1977. – 190 с.

## **Требования к оформлению отчета по лабораторной работе**

В отчете по лабораторной работе приводятся:

1. Титульный лист с указанием фамилии студента, выполнившего работу.
2. Цель работы.
3. Электрическая схема испытательной установки.
4. Расчетные формулы, примеры расчета с указанием размерности определяемых величин.
5. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
6. Графические зависимости.
7. Анализ результатов и физическое объяснение полученных зависимостей.

**Форма отчета по лабораторной работе**

**Томский политехнический университет**

**Кафедра ЭИКТ**

**Отчет по лабораторной работе № 1**

**Влияние внутреннего экрана на распределение потенциалов по поверхности изолятора**

**Выполнил студент гр. 7А78**

\_\_\_\_\_

**А.И. Петров**

**Проверил преподаватель**

\_\_\_\_\_

**Т.И. Иванов**

**Томск – 2008**



### **Цель работы**

Изучить характер распределения потенциала по поверхности изолятора и влияние внутреннего экрана на величину напряженности электрического поля.

### **Задание**

1. Подготовить образец испытуемого изолятора и произвести измерение габаритных размеров и расположения проволочных электродов (зондов) на его поверхности.

2. Установить внутренний экран на необходимую глубину –  $g$  и с помощью электростатического вольтметра измерить распределение потенциалов на проволочных электродах (зондах).

3. Произвести расчет потенциалов и напряженности электрического поля при различной глубине погружения экрана, используя программу расчета на ЭВМ, и сравнить с опытными данными.

4. Построить графики распределения потенциалов  $U = f(x)$  и напряженности электрического поля  $E = f(x)$  в зависимости от расстояния от верхнего фланца при различной глубине погружения экрана и объяснить полученные результаты и зависимости.

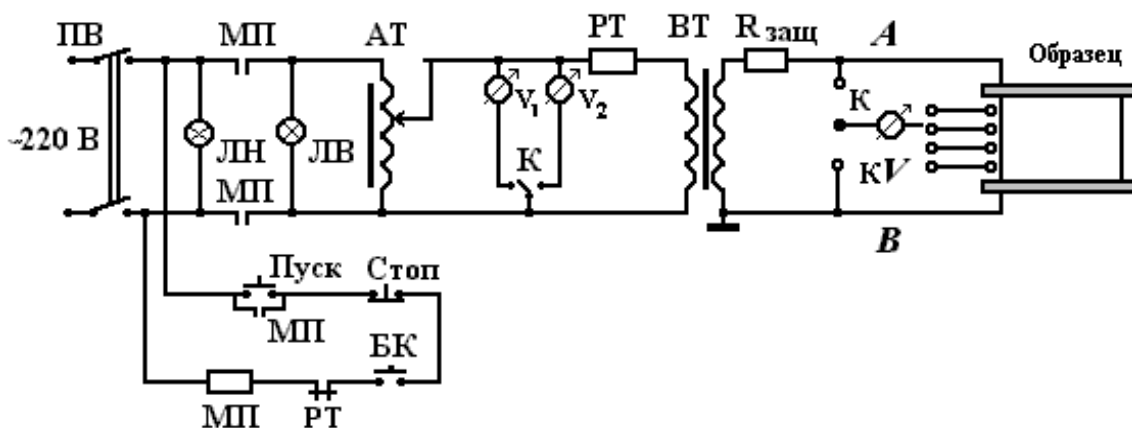


Рис. 2. Принципиальная схема установки

### **Результаты расчета и эксперимента.**

### **Объяснение полученных результатов и выводы по работе.**

**Приложение № 1**  
**к лабораторной работе**

**«Градирование изоляции как метод выравнивания электрического поля в электротехнических конструкциях»**

1. Введем необходимые данные для расчета и постоянные.

	Постоянные	
$r1 := \begin{pmatrix} 5 \\ 7 \\ 9 \\ 12 \end{pmatrix}$	$\varepsilon1 := \begin{pmatrix} 3.7 \\ 3.5 \\ 3.2 \end{pmatrix}$	$\varepsilon0 := 8.85 \cdot 10^{-12}$ ORIGIN:= 1 $U5 := 10$ , кВ      n := 1..3 $l1 := 1$ , м      i := 0..3  $U2 := U5 \cdot 10^3$ , В

2. Произведем расчет емкостей  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$ , падений напряжений по слоям  $U1$ , максимальных и минимальных напряженностей электрического поля  $E1$  и  $E2$ .

$C1_n := 2 \cdot 3.14 \cdot \varepsilon1_n \cdot \varepsilon0 \cdot \frac{l1}{\ln\left(\frac{r1_{n+1}}{r1_n}\right)}$	$C1_n =$ <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td><math>6.112 \cdot 10^{-10}</math></td></tr> <tr><td><math>7.74 \cdot 10^{-10}</math></td></tr> <tr><td><math>6.182 \cdot 10^{-10}</math></td></tr> </table>	$6.112 \cdot 10^{-10}$	$7.74 \cdot 10^{-10}$	$6.182 \cdot 10^{-10}$
$6.112 \cdot 10^{-10}$				
$7.74 \cdot 10^{-10}$				
$6.182 \cdot 10^{-10}$				
$U1_n := U5 \cdot \frac{10^3}{C1_n \cdot \sum_n \left(\frac{1}{C1_n}\right)}$	$E1_n := \frac{U1_n}{r1_n \cdot \ln\left(\frac{r1_{n+1}}{r1_n}\right)}$	$E2_n := \frac{U1_n}{r1_{n+1} \cdot \ln\left(\frac{r1_{n+1}}{r1_n}\right)}$		

3. Результаты расчета представим в программе *Mathcad* в виде матриц  $r1_n$ ,  $C1_n$ ,  $U1_n$ ,  $E1_n$  и  $E2_n$ .

n =	r1 <sub>n</sub> =	C1 <sub>n</sub> =	U1 <sub>n</sub> =	E1 <sub>n</sub> =	E2 <sub>n</sub> =
1	5	$6.112 \cdot 10^{-10}$	$3.599 \cdot 10^3$	$2.14 \cdot 10^3$	$1.528 \cdot 10^3$
2	7	$7.74 \cdot 10^{-10}$	$2.842 \cdot 10^3$	$1.616 \cdot 10^3$	$1.257 \cdot 10^3$
3	9	$6.182 \cdot 10^{-10}$	$3.558 \cdot 10^3$	$1.374 \cdot 10^3$	$1.031 \cdot 10^3$

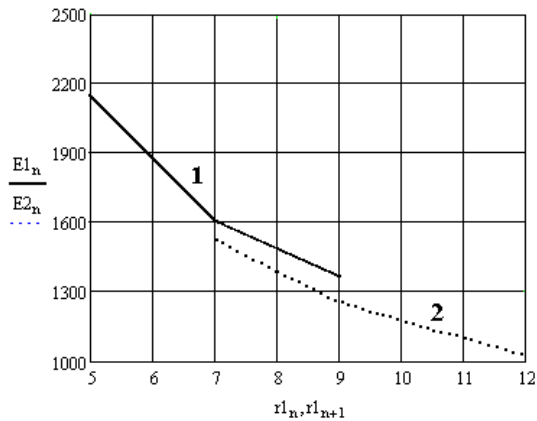


Рис. 1. Зависимость максимальной  $E1$  (1) и минимальной  $E2$  (2) напряженностей поля от радиуса слоев

4. На основе расчетных данных построим график зависимости максимальной и минимальной напряженностей поля от радиуса слоев.

5. Рассчитаем напряженность поля  $E4$  в изоляции данного кабеля при условии, что нет градирования, т. е. когда изоляция изготовлена в виде одного однородного слоя.

Для построения обобщенной кривой зависимости напряженности поля от толщины изоляции значения максимальной и минимальной напряженностей поля  $E1$  и  $E2$  сведем в одну матрицу в виде напряженности  $E3$ , а радиальные размеры представим в виде матрицы  $r3$ .

$$r3 := \begin{pmatrix} 5 \\ 7 \\ 7 \\ 9 \\ 9 \\ 12 \end{pmatrix} \quad E3 := \begin{pmatrix} 2.14 \cdot 10^3 \\ 1.528 \cdot 10^3 \\ 1.616 \cdot 10^3 \\ 1.257 \cdot 10^3 \\ 1.374 \cdot 10^3 \\ 1.031 \cdot 10^3 \end{pmatrix} \quad k := 1..6$$

$$E4_k := \frac{U2}{r3_k \cdot \ln\left(\frac{r3_6}{r3_1}\right)}$$

$2.284 \cdot 10^3$
$1.632 \cdot 10^3$
$1.632 \cdot 10^3$
$1.269 \cdot 10^3$
$1.269 \cdot 10^3$
951.871

6. Чтобы оценить роль градирования, построим и сравним графики распределения напряженностей поля по отдельным слоям в градированной ( $E3$ ) и неградированной ( $E4$ ) изоляции (рис. 2).

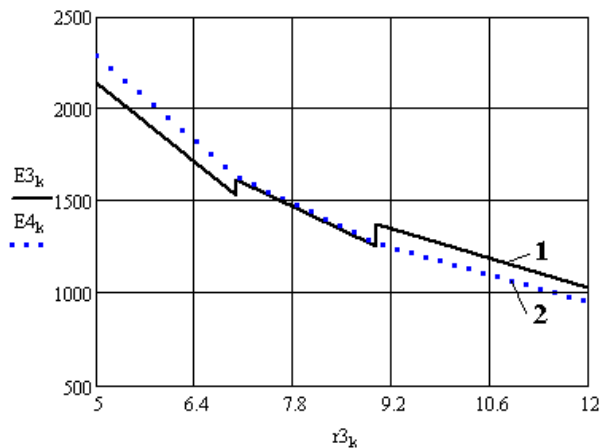


Рис. 2. Зависимость напряженности поля от радиуса слоев изоляции кабеля с градированием (1) и без градирования (2)

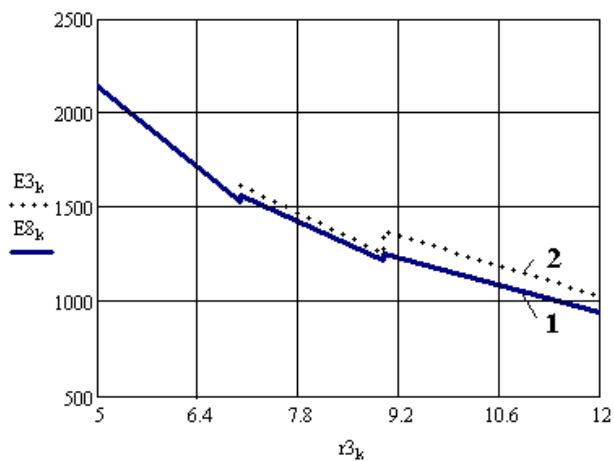
7. Проведем измерение падений напряжений на каждом слое при заданном напряжении источника питания. Результаты измерений представим в виде матрицы напряжений  $U3$ , рассчитаем напряженности поля  $E6$  и  $E7$  и сведем их в матрицу  $E8$ .

$$U3 := \begin{pmatrix} 3.6 \cdot 10^3 \\ 2.75 \cdot 10^3 \\ 3.25 \cdot 10^3 \end{pmatrix} \quad E6_n := \frac{U3_n}{r1_n \cdot \ln\left(\frac{r1_{n+1}}{r1_n}\right)} \quad E7_n := \frac{U3_n}{r1_{n+1} \cdot \ln\left(\frac{r1_{n+1}}{r1_n}\right)}$$

$n =$	$r1_n =$	$U3_n =$	$E6_n =$	$E7_n =$
1	5	$3.6 \cdot 10^3$	$2.14 \cdot 10^3$	$1.528 \cdot 10^3$
2	7	$2.75 \cdot 10^3$	$1.563 \cdot 10^3$	$1.216 \cdot 10^3$
3	9	$3.25 \cdot 10^3$	$1.255 \cdot 10^3$	941.433

$$r3 := \begin{pmatrix} 5 \\ 7 \\ 7 \\ 9 \\ 9 \\ 12 \end{pmatrix} \quad E8 := \begin{pmatrix} 2.14 \cdot 10^3 \\ 1.528 \cdot 10^3 \\ 1.563 \cdot 10^3 \\ 1.216 \cdot 10^3 \\ 1.255 \cdot 10^3 \\ 941.433 \end{pmatrix}$$

8. Построим график зависимости напряженности поля от радиуса слоев изоляции кабеля с градированной изоляцией по экспериментальным ( $E_8$ ) и расчетным ( $E_3$ ) данным.



*Рис. 3. Зависимость напряженности поля от радиуса слоев изоляции кабеля с градированием по экспериментальным (1) и расчетным (2) данным*

9. Сравним полученные зависимости, дадим им объяснение.

**Приложение № 2**  
**к лабораторной работе**

**«Исследование влияния конденсаторных обкладок  
на распределение напряженностей  
электрического поля в слоистой изоляции»**

1. Внесем исходные данные и результаты эксперимента в виде матриц.

Распределение потенциалов	Длины обкладок	Диаметр уступов	Постоянные	
$U := \begin{pmatrix} 10 \\ 6.9 \\ 5.3 \\ 4 \\ 2.9 \\ 1.8 \\ 0 \end{pmatrix}$	$l := \begin{pmatrix} 213 \\ 188 \\ 156 \\ 134 \\ 108 \\ 79 \\ 65 \end{pmatrix}$	$d := \begin{pmatrix} 24 \\ 37 \\ 49 \\ 63 \\ 75 \\ 89 \\ 103 \end{pmatrix}$	$\epsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-12}$	$ORIGIN = 0$
			$U5 := 10$	$l_0 := 213$
			$d_0 := 24$	$n := 1..6$
			$E := 3.6$	$i := 0..6$
			$U2 := U \cdot 10^3$	$r_i := \frac{d_i}{2}$

2. Произведем расчет емкости  $C1$ , падений напряжения по слоям  $U_i$  и максимальных напряженностей электрического поля  $E1$  и  $E2$ .

$$C_n := 2 \cdot 3.14 \cdot E \cdot \epsilon_0 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{l_n}{\ln\left(\frac{r_n}{r_{n-1}}\right)}$$

$$U1_n := U5 \cdot \frac{10^3}{C_n \cdot \sum_n \frac{1}{C_n}}$$

$$E1_n := \frac{U1_n}{r_{n-1} \cdot \ln\left(\frac{r_n}{r_{n-1}}\right)}$$

$$E2_n := \frac{U2_{n-1} - U2_n}{r_{n-1} \cdot \ln\left(\frac{r_n}{r_{n-1}}\right)}$$

3. Занесем полученные результаты в таблицу в виде матриц.

n	r <sub>n</sub>	l <sub>n</sub>	E1 <sub>n</sub>	E2 <sub>n</sub>	U1 <sub>n</sub>	C <sub>n</sub>	U2 <sub>i</sub>
1	18.5	188	3.568·10 <sup>6</sup>	5.767·10 <sup>6</sup>	1.853·10 <sup>7</sup>	8.69·10 <sup>-11</sup>	9.664·10 <sup>7</sup>
2	24.5	156	2.789·10 <sup>6</sup>	2.975·10 <sup>6</sup>	1.449·10 <sup>7</sup>	1.111·10 <sup>-10</sup>	6.668·10 <sup>7</sup>
3	31.5	134	2.452·10 <sup>6</sup>	2.04·10 <sup>6</sup>	1.509·10 <sup>7</sup>	1.067·10 <sup>-10</sup>	5.122·10 <sup>7</sup>
4	37.5	108	2.366·10 <sup>6</sup>	1.935·10 <sup>6</sup>	1.299·10 <sup>7</sup>	1.239·10 <sup>-10</sup>	3.865·10 <sup>7</sup>
5	44.5	79	2.717·10 <sup>6</sup>	1.656·10 <sup>6</sup>	1.744·10 <sup>7</sup>	9.235·10 <sup>-11</sup>	2.802·10 <sup>7</sup>
6	51.5	65	2.782·10 <sup>6</sup>	2.676·10 <sup>6</sup>	1.809·10 <sup>7</sup>	8.902·10 <sup>-11</sup>	1.739·10 <sup>7</sup>
							0

4. Построим график зависимости максимальной напряженности электрического поля от радиуса расположения обкладок, оценим возможность выравнивания радиальной напряженности поля с помощью конденсаторных обкладок из условия  $Er1 = const$ .

Для этого примем те же длины обкладок, а радиусы обкладок найдем из уравнения огибающей, подбирая значение  $z$  в пределах от 3.6 до 5.0.

$$k := 0..6 \quad r_0 := 20 \quad r_6 := 72 \quad z_5 := \frac{r_6}{r_0} \quad z_5 = 3.6$$

5. Найдем коэффициенты уравнения огибающей  $a$  и  $b$ .

$$b_5 := \frac{\ln\left(\frac{r_6}{r_0}\right)}{(l_0)^2 - 16^2} \quad b_5 = 2.839 \cdot 10^{-5}$$

$$a_5 := \ln(r_0) + \ln\left(\frac{r_6}{r_0}\right) \cdot \left[ \frac{(l_0)^2}{(l_0)^2 - 16^2} \right] \quad a_5 = 4.284$$

6. Зная коэффициенты  $a$  и  $b$ , найдем значения радиусов выравнивающих обкладок  $r_{8i}$  и емкости  $C_{5i}$ .

$$r_{8k} := e^{[a_5 - b_5 \cdot (l_k)^2]}$$

$$C_{5n} := 2 \cdot 3.14 \cdot E \cdot \varepsilon_0 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{l_n}{\ln\left(\frac{r_{8n}}{r_{8n-1}}\right)}$$

7. Найдем значения падений напряжения  $U_5$  и напряженности поля  $E_5$  по слоям изоляции.

$$U_{5n} := U_5 \cdot \frac{10^3}{C_{5n} \cdot \sum_n \frac{1}{C_{5n}}}$$

$$E_{5n} := \frac{U_{5n}}{r_{8n-1} \cdot \ln\left(\frac{r_{8n}}{r_{8n-1}}\right)}$$

$r_{8k} =$	$r_i =$	$E_{5n} =$	$C_{5i} =$
20	20	284.339	0
26.586	18.5	257.779	$1.321 \cdot 10^{-10}$
36.341	24.5	219.546	$9.986 \cdot 10^{-11}$
43.558	31.5	227.265	$1.48 \cdot 10^{-10}$
52.078	37.5	259.86	$1.21 \cdot 10^{-10}$
60.748	44.5	270.758	$1.027 \cdot 10^{-10}$
64.326	51.5		$2.272 \cdot 10^{-10}$

8. Построим график распределения напряженностей поля по слоям, дадим объяснение полученным зависимостям.

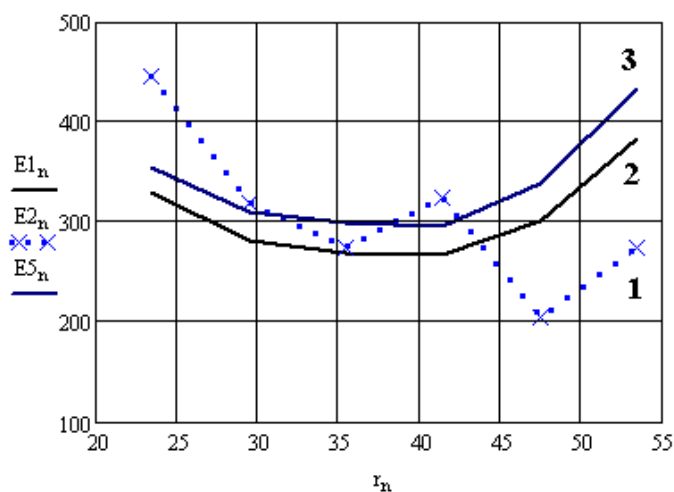


График распределения напряженностей электрического поля в радиальном направлении:  
 1 – по экспериментальным данным;  
 2 – по расчетным данным;  
 3 – при выравнивании электрического поля подбором значения



**Приложение № 3  
к лабораторной работе**

**«Исследование поверхностного перекрытия изоляторов  
в воздухе»**

1. Введем для расчета исходные данные и постоянные.

ORIGIN := 1      i := 1..5

$$l := \begin{pmatrix} 0.04 \\ 0.08 \\ 0.120 \\ 1.16 \\ 0.2 \end{pmatrix}$$

Исходные данные:

$$\begin{aligned} n &:= 0.5 \\ D &:= 0.085 \\ \chi_1 &:= 10 \cdot 10^{-6} \\ \chi_2 &:= 30 \cdot 10^{-6} \\ A &:= 10000 \end{aligned}$$

2. Произведем расчет выдерживаемого напряжения изолятора в сухом состоянии ( $u3_i$ ) в зависимости от длины пути тока утечки.

3. Произведем расчет выдерживаемого напряжения изолятора ( $u1_i$  и  $u2_i$ ) при различной степени увлажнения его поверхности  $\chi_1$  и  $\chi_2$  в зависимости от длины пути тока утечки.

$$u1_i := A^{\frac{1}{n+1}} \cdot \left[ \frac{l_i}{(\pi \cdot \chi_1 \cdot D)^{\frac{n}{n+1}}} \right]$$

$$u2_i := A^{\frac{1}{n+1}} \cdot \left[ \frac{l_i}{(\pi \cdot \chi_2 \cdot D)^{\frac{n}{n+1}}} \right]$$

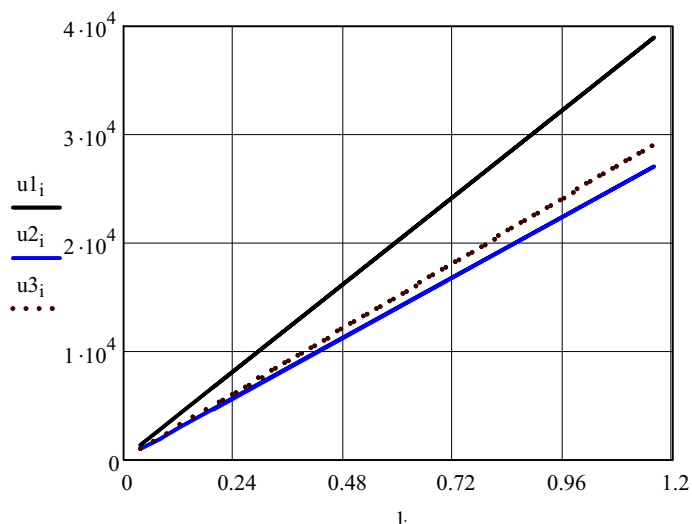
$$u3_i := 2.5 \cdot 10^4 \cdot l_i$$

$$u4_i := (24 + 3.78 \cdot 10 \cdot l_i) \cdot 10^3$$

4. Представим полученные результаты расчета выдерживаемых напряжений в виде матриц  $u1$ ,  $u2$ ,  $u3$ ,  $u4$ .

$l_i =$	$u1_i =$	$u2_i =$	$u3_i =$	$u4_i =$
0.04	$1.338 \cdot 10^3$	927.89	$1 \cdot 10^3$	$2.551 \cdot 10^4$
0.08	$2.676 \cdot 10^3$	$1.856 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$2.702 \cdot 10^4$
0.12	$4.015 \cdot 10^3$	$2.784 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$2.854 \cdot 10^4$
1.16	$3.881 \cdot 10^4$	$2.691 \cdot 10^4$	$2.9 \cdot 10^4$	$6.785 \cdot 10^4$
0.2	$6.691 \cdot 10^3$	$4.639 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$3.156 \cdot 10^4$

5. Построим график зависимостей выдерживаемого напряжения перекрытия изолятора в сухом ( $u3_i$ ) и увлажненном ( $u1_i$  и  $u2_i$ ) состоянии от длины пути тока утечки.



*Рис.1. Зависимость выдерживаемого напряжения перекрытия изолятора в сухом ( $u3$ ) и увлажненном ( $u1, u2$ ) состоянии*

6. Дадим объяснение полученным зависимостям с физической точки зрения.

**Приложение № 4  
к лабораторной работе**

**«Определение параметров функции распределения пробивных напряженностей электрического поля»**

1. Создадим матрицу, введем в нее исходные данные по пробивным напряжениям электрического поля  $E_{пр}$ , кВ/мм, в порядке возрастания.

```

211
227
239
251
267
280
297.1
306
317
331
342
349
352
359
371.5
388
395
408
413
425
431
447
455
462
471
482
497
506
521
540
E :=
2. Введем исходные данные и постоянные.
Постоянные
t0 := 1·10-13 [сек] ORIGIN:= 1
K := 1.38·10-23 [Дж/св.град]
D := 5.5·10-19 [Дж/св.]
Толщина изоляции d := 20·10-6 [м]
Диаметр электродов d2 := 25·10-3 [м^2]
Коэф. неоднородности N := 1
Количество образцов n := 30
i := 1.. 30 v := 8
S := π ·  $\frac{d2^2}{4}$  S = 4.909·10-4
3. Найдем значения теоретической прочности ET, коэффициента Bi, вероятности QEi и параметра Yi.
ET := max(E)·3·106 ET = 1.62× 109
Bi :=  $\frac{ET}{N \cdot E_i \cdot 10^6}$  Yi :=  $\frac{.482}{\ln\left(\frac{1 - \frac{1}{v}}{1 - \frac{1}{B_i}}\right)^{0.82}}$ 
QEi :=  $\frac{i}{n + .5}$ 

```

4. Построим график зависимости  $z = f(Y)$  по экспериментальным данным и интерполирующей функции  $f(x)$ .

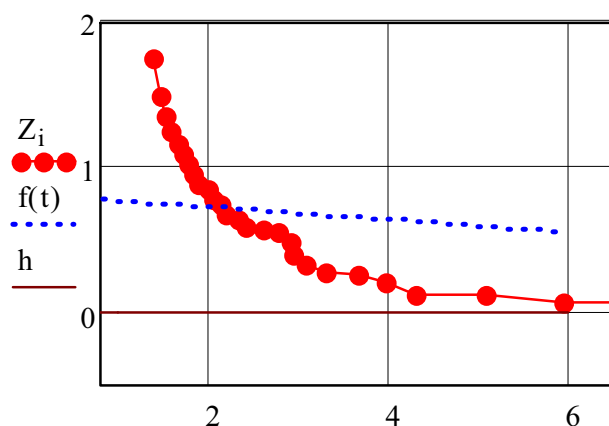
$$Z_i := \ln(-\ln(1 - QE_i)) + \ln(Y_i) \quad f(x) := \text{intercept}(Y, Z) + \text{slope}(Y, Z) \cdot x$$

5. Параметры интерполирующей прямой найдем, используя следующие функции:

$$\begin{aligned} b1 &:= \text{slope}(Y, Z) & b1 &= -0.043 & t &= 0.5, 1 \dots 6 & h &:= 0 & b2 &:= -b1 \\ a1 &:= \text{intercept}(Y, Z) & a1 &= 0.806 & & & & & & \text{минус означает} \\ & & & & & & & & & \text{уменьшение функции} \end{aligned}$$

Разность экспериментальных и теоретических значений

$$S1_i := Z_i - f(Y_i)$$



Относительная погрешность

$$\frac{\text{stdev}(S1)}{\max(Z)} = 0.234$$

6. Определим параметры уравнения надежности изоляции исходя из интерполирующей зависимости  $Z = f(Y)$ .

$$V0 := \frac{d \cdot S}{e^{a1}} \quad V0 = 4.383 \cdot 10^{-9} \quad [M^3] \quad p := \left( \frac{0.65}{e^{b2}} \right)^5 \quad p = 0.094$$

7. Проведем оценку, каким законом распределения можно описать полученные значения пробивных напряженностей электрического поля. Проверку выполнимости выбранного закона распределения проведем согласно критерию согласия Пирсона.

8. Занесем полученные и расчетные данные в таблицу в виде матриц.

$i$	$E_i$	$B_i$	$QE_i$	$Y_i$	$S1_i$	$f(Y_i)$	$Z_i$
1	211	7.678	0.033	31.923	0.626	-0.564	0.062
2	227	7.137	0.066	13.338	-0.334	0.234	-0.1
3	239	6.778	0.098	9.585	-0.403	0.395	$-7.617 \cdot 10^{-3}$
4	251	6.454	0.131	7.565	-0.42	0.482	0.062
5	267	6.067	0.164	5.959	-0.486	0.551	0.065
6	280	5.786	0.197	5.106	-0.475	0.587	0.112
7	297.1	5.453	0.23	4.314	-0.504	0.621	0.117
8	306	5.294	0.262	3.996	-0.44	0.635	0.195
9	317	5.11	0.295	3.666	-0.401	0.649	0.248
10	331	4.894	0.328	3.321	-0.387	0.664	0.277
11	342	4.737	0.361	3.094	-0.349	0.674	0.325
12	349	4.642	0.393	2.965	-0.285	0.679	0.394
13	352	4.602	0.426	2.914	-0.2	0.681	0.482
14	359	4.513	0.459	2.8	-0.144	0.686	0.542
15	371.5	4.361	0.492	2.619	-0.122	0.694	0.572
16	388	4.175	0.525	2.413	-0.118	0.703	0.585
17	395	4.101	0.557	2.336	-0.062	0.706	0.644
18	408	3.971	0.59	2.204	-0.036	0.712	0.676
19	413	3.923	0.623	2.158	0.03	0.714	0.744
20	425	3.812	0.656	2.054	0.066	0.718	0.784
21	431	3.759	0.689	2.005	0.129	0.72	0.85
22	447	3.624	0.721	1.887	0.155	0.725	0.88
23	455	3.56	0.754	1.833	0.217	0.728	0.944
24	462	3.506	0.787	1.788	0.287	0.73	1.017
25	471	3.439	0.82	1.733	0.356	0.732	1.088
26	482	3.361	0.852	1.671	0.428	0.735	1.162
27	497	3.26	0.885	1.592	0.499	0.738	1.237
28	506	3.202	0.918	1.548	0.614	0.74	1.354
29	521	3.109	0.951	1.48	0.752	0.743	1.495
30	540	3	0.984	1.402	1.005	0.746	1.752

9. В качестве примера возьмем вероятностные бумаги двойного показательного и Вейбулловского законов распределения. На этих бумагах построим зависимость  $Q(E_i) = f(E_i)$ .

10. Зададим количество интервалов –  $\nu$  и шаг интервалов –  $\kappa l$ .

$$\nu := 1.. 8 \quad \kappa := 1.. 9 \quad \kappa l := -2.2, -1.7.. 1.8$$

11. Нанесем на вероятностных бумагах границы интервалов, определим количество экспериментальных ( $z$ ) и теоретических ( $f(x)$ ) точек, попавших в эти интервалы, и занесем их в матрицы  $z1$  и  $z2$ .

12. Произведем расчет критерия  $\chi^2$  согласно приведенным ниже уравнениям для двойного показательного закона распределения.

$$z1 := \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \\ 4 \\ 6 \\ 7 \\ 9 \\ 0.1 \end{pmatrix} \quad z2 := \begin{pmatrix} 0.42 \\ 0.84 \\ 3.45 \\ 1.8 \\ 6 \\ 8.1 \\ 6.9 \\ 0.05 \end{pmatrix} \quad z5_v := z1_v - z2_v \quad z6_v := (z5_v)^2$$

$$z7_v := \frac{(z5_v)^2}{z2_v} \quad \chi := \sum_v z7_v \quad \chi = 12.051$$

13. Полученные данные занесем в таблицу в виде матриц и определим число степеней свободы  $\nu_5$ .

$\nu$	$z1_v$	$z2_v$	$z5_v$	$z6_v$	$z7_v$
1	1	1	0	0	0
2	1	1	0	0	0
3	3	2	1	1	0.5
4	4	1	3	9	9
5	5	9	-4	16	1.778
6	8	9	-1	1	0.111
7	5	6	-1	1	0.167
8	3	1	2	4	4

$k5 := 8$

$q5 := 3$

$\nu_5 := k5 - q5 - 1 \quad \nu_5 = 4$

14. Проверим сходимость распределения значений пробивных напряженностей электрического поля с двойным показательным законом по рассчитанному значению  $\chi^2$ , равного  $z8$ , согласно статистическим таблицам.

15. Произведем аналогичные расчеты для Вейбулловского закона распределения.

$$z1 := \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \\ 4 \\ 6 \\ 7 \\ 9 \\ 0.1 \end{pmatrix} \quad z2 := \begin{pmatrix} 0.3 \\ 1.71 \\ 1.5 \\ 5.1 \\ 6.9 \\ 4.5 \\ 9 \\ 0.1 \end{pmatrix}$$

$$q5 := 3 \quad k5 := 8$$

$$v5 := k5 - q5 - 1 \quad v5 = 4$$

$$z5_v := z1_v - z2_v \quad z6_v := (z5_v)^2$$

$$z7_v := \frac{(z5_v)^2}{z2_v} \quad \chi := \sum_v z7_v \quad \chi = 13.254$$

$$v = \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 2 \\ \hline 3 \\ \hline 4 \\ \hline 5 \\ \hline 6 \\ \hline 7 \\ \hline 8 \\ \hline \end{array}$$

$$z5_v = \begin{array}{|c|} \hline 1.7 \\ \hline -1.71 \\ \hline -0.5 \\ \hline -1.1 \\ \hline -0.9 \\ \hline 2.5 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}$$

$$z6_v = \begin{array}{|c|} \hline 2.89 \\ \hline 2.924 \\ \hline 0.25 \\ \hline 1.21 \\ \hline 0.81 \\ \hline 6.25 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}$$

$$z7_v = \begin{array}{|c|} \hline 9.633 \\ \hline 1.71 \\ \hline 0.167 \\ \hline 0.237 \\ \hline 0.117 \\ \hline 1.389 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}$$

16. Проверим сходимость распределения значений пробивных напряженностей электрического поля с Вейбулловским законом по рассчитанному значению  $\chi^2$ , равного  $z8$ , согласно статистическим таблицам.

17. Оценим, каким законом распределения лучше описываются полученные значения пробивных напряженностей электрического поля.

**Приложение № 5**  
к лабораторной работе

**«Определение параметров уравнения надежности  
электрической изоляции»**

1	1	1. Введем исходные данные и постоянные.
1	1	
1	1	Температура [град] T1 := 20
2	1	Температура [град] T2 := 60
3	2	Напряженность поля E1 [кВ/мм] E1 := 175
5	2	Напряженность поля E2 [кВ/мм] E2 := 175
7	4	Количество образцов в партии n := 30
8	6	<b>Постоянные</b>
9	6	t0 := 1·10 <sup>-13</sup> [сек]
11	6	k := 1.38·10 <sup>-23</sup> [Дж/св.град]
14	7	D := 5.5·10 <sup>-19</sup>
15	7	ORIGIN:= 1
17	9	
22	9	2. Создадим матрицы t1 и t2 и введем в них время до пробоя образцов.
24	12	
29	13	3. Рассчитаем вероятность безотказной работы P(t).
34	15	
41	16	
47	18	$P_i := \frac{n - i + .5}{n + .5}$
51	20	
56	21	4. Значения x найдем из условия равенства функции F(x) и f(x).
60	27	
63	28	$F1_i := 2 \cdot k \cdot \frac{T1}{D} \cdot \ln\left(\frac{t1_i}{t0}\right) \quad F2_i := 2 \cdot k \cdot \frac{T2}{D} \cdot \ln\left(\frac{t2_i}{t0}\right)$
67	29	
68	31	
73	42	$f1(x1) := \sqrt{1 - 2 \cdot x1} - x1 \cdot \ln\left(\frac{1}{x1} + \frac{1}{x1} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x1} - 1\right)$
79	44	
93	75	
109	78	$f2(x2) := \sqrt{1 - 2 \cdot x2} - x2 \cdot \ln\left(\frac{1}{x2} + \frac{1}{x2} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x2} - 1\right)$
124	101	



5. Для нахождения значений  $x$  при известной величине  $f(x)$  воспользуемся функцией вида  $V1(x1, t1)$  и  $V2(x2, t2)$ , соответственно, при начальных значениях.

$$x1 := .1 \quad x2 := .1$$

$$V1(x1, t1) := f1(x1) - 2 \cdot k \cdot \frac{T1}{D} \cdot \ln\left(\frac{t1}{t0}\right) \quad V2(x2, t2) := f2(x2) - 2 \cdot k \cdot \frac{T2}{D} \cdot \ln\left(\frac{t2}{t0}\right)$$

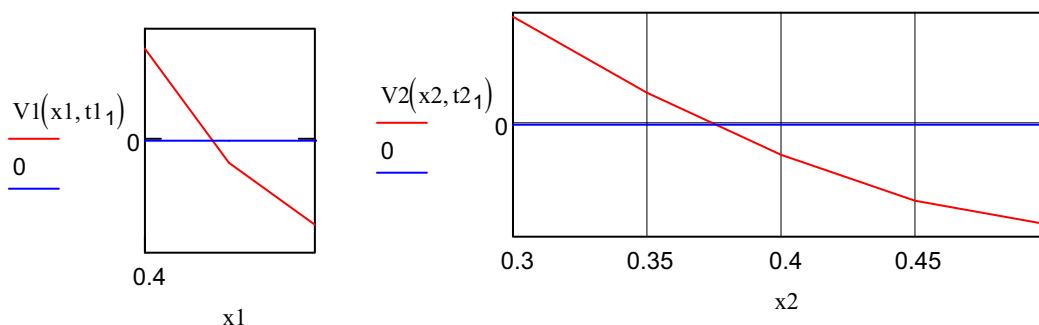
6. Тогда значение  $x$  найдем как функцию  $Z1$  и  $Z2$ , соответственно:

$$Z1_i := \text{root}\left(V1(x1, t1_i), x1\right) \quad Z2_i := \text{root}\left(V2(x2, t2_i), x2\right)$$

7. Зададим пределы изменения значений  $x1$  и  $x2$ .

$$x1 := .4, .45.. 5 \quad x2 := .3, .35.. 5$$

8. Изменение функции  $V1(x1, t1)$  и  $V2(x2, t2)$  можно представить в виде графиков.



9. Найдем параметры уравнения надежности изоляции, учитывая, что в случае однородного электрического поля  $N = 1$ . Тогда при  $E1 = E2$  значение  $B1 = B2$ .

$$B1 := 2.2$$

$$v := B1 \cdot 1.5$$

10. При каждой вероятности пробоя найдем значение  $b$  и его математическое ожидание.

$$b_i := \frac{1}{T2 - T1} \cdot \ln\left(\frac{Z1_i}{Z2_i}\right) \quad b := \frac{\sum_i b_i}{n} \quad b = 4.194 \cdot 10^{-3}$$

11. Найдем параметр  $A$  по результатам испытаний первой партии и, соответственно, значение  $b1$  при  $t1$ .

$$A := \frac{Z1_{30}}{\frac{1}{D} \cdot e^{-b \cdot T1} \cdot N \cdot E1 \cdot B1} \quad A = 6.702 \cdot 10^{-22} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$$

$$B1 := \frac{Z1_1}{\frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T1} \cdot N \cdot E1} \quad B1 = 2.233$$

12. При известных величинах  $A$  и  $b$  рассчитаем значения  $b_i$  и  $Y_i$  для обеих партий.

$$B1_i := \frac{Z1_i}{\frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T1} \cdot N \cdot E1} \quad B2_i := \frac{Z2_i}{\frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T2} \cdot N \cdot E2}$$

$$Y1_i := \frac{.482}{\left[ \ln \left[ \frac{1 - \frac{1}{v}}{1 - \frac{1}{B1_i}} \right] \right]^{.82}} \quad Y2_i := \frac{.482}{\left[ \ln \left[ \frac{1 - \frac{1}{v}}{1 - \frac{1}{B2_i}} \right] \right]^{.82}}$$

13. Найдем значения  $Z$  из следующих выражений и занесем все данные в таблицу в виде матриц.

$$Z3_i := \ln(-\ln(P_i)) + \ln(Y1_i) \quad Z4_i := \ln(-\ln(P_i)) + \ln(Y2_i)$$

14. Найдем интерполирующие функции исходя из следующих уравнений:

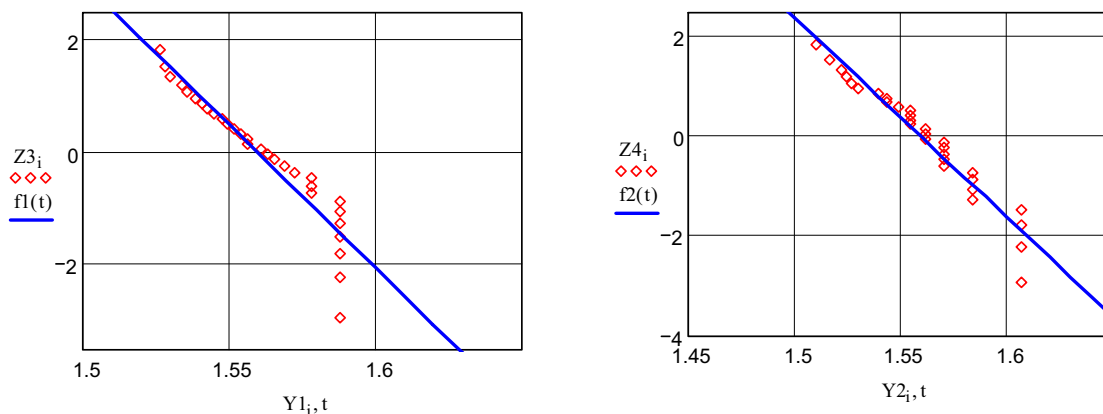
$$f1(x) := \text{intercept}(Y1, Z3) + \text{slope}(Y1, Z3) \cdot x$$

$$f2(x) := \text{intercept}(Y2, Z4) + \text{slope}(Y2, Z4) \cdot x$$

$$t := 1.25, 1.26.. 1.65$$

P(t)	f(x1)	f(x2)	x1	x2	z1	y1
P <sub>i</sub>	F1 <sub>i</sub>	F2 <sub>i</sub>	Z1 <sub>i</sub>	Z2 <sub>i</sub>	Z3 <sub>i</sub>	Y1 <sub>i</sub>
0.967	0.03	0.09	0.438	0.373	-2.937	1.591
0.934	0.03	0.09	0.438	0.373	-2.226	1.591
0.902	0.03	0.09	0.438	0.373	-1.803	1.591
0.869	0.031	0.09	0.437	0.373	-1.504	1.582
0.836	0.031	0.092	0.436	0.371	-1.265	1.576
0.803	0.032	0.092	0.436	0.371	-1.068	1.569
0.77	0.032	0.094	0.435	0.369	-0.897	1.564
0.738	0.032	0.096	0.435	0.368	-0.744	1.563
0.705	0.032	0.096	0.435	0.368	-0.605	1.561
0.672	0.032	0.096	0.435	0.368	-0.479	1.558
0.639	0.033	0.096	0.434	0.368	-0.363	1.555
0.607	0.033	0.096	0.434	0.368	-0.252	1.554
0.574	0.033	0.097	0.434	0.367	-0.148	1.553
0.541	0.033	0.097	0.434	0.367	-0.049	1.549
0.508	0.033	0.098	0.434	0.366	0.047	1.548
0.475	0.033	0.098	0.433	0.366	0.139	1.545
0.443	0.034	0.098	0.433	0.366	0.229	1.543
0.41	0.034	0.098	0.433	0.366	0.318	1.541
0.377	0.034	0.099	0.433	0.365	0.406	1.539
0.344	0.034	0.099	0.433	0.365	0.495	1.538
0.311	0.034	0.099	0.432	0.365	0.584	1.537
0.279	0.034	0.1	0.432	0.364	0.674	1.536
0.246	0.034	0.1	0.432	0.364	0.767	1.535
0.213	0.034	0.1	0.432	0.364	0.864	1.535
0.18	0.034	0.1	0.432	0.364	0.966	1.534
0.148	0.034	0.101	0.432	0.363	1.077	1.533
0.115	0.034	0.102	0.432	0.363	1.199	1.532
0.082	0.035	0.103	0.432	0.362	1.342	1.53
0.049	0.035	0.103	0.432	0.362	1.527	1.528
0.016	0.035	0.104	0.431	0.361	1.837	1.527

15. Построим графики зависимости  $Z = f(Y)$  и интерполирующей функции.

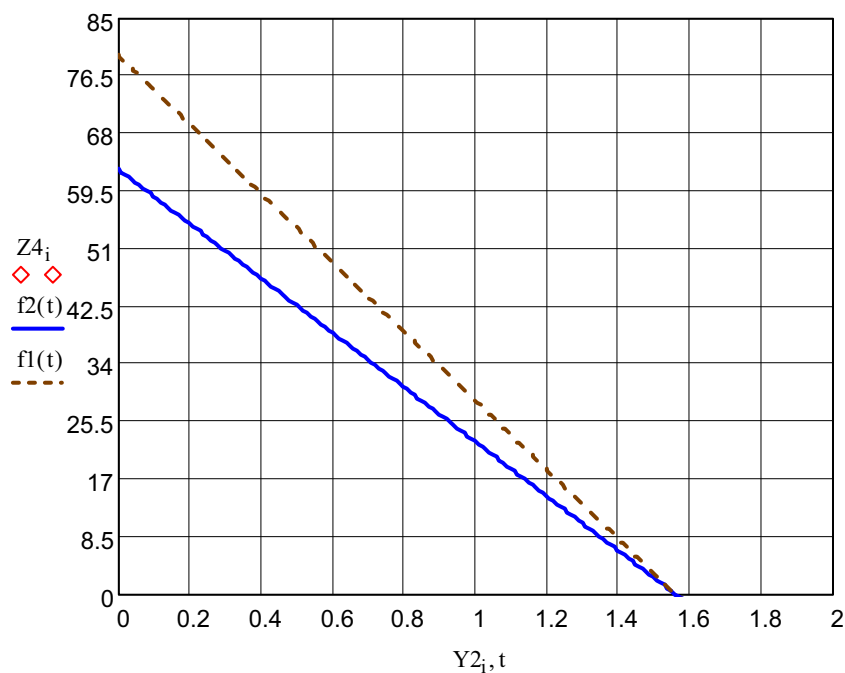


16. Найдем погрешность между экспериментальной и интерполирующей функциями.

$$S2_i := Z3_i - f1(Y1_i)$$

$$\frac{\text{stdev}(S2)}{\max(Z3)} = 0.121$$

17. Определим коэффициенты  $a''$  и  $b''$ , входящие в уравнение  $Z = a'' + b'' \cdot y$ , из графиков зависимостей  $Z = f(y)$ ,  $f2(t)$  и  $f1(t)$  при значениях  $Z = 0$  и  $Y = 0$  и заданных размерах образцов.



$$\begin{aligned}
Y1 &:= 0 & Y2 &:= 0 & f1(0) &= 79.503 & f2(0) &= 62.663 \\
d &:= 8 \cdot 10^{-3} & r &:= \frac{d}{2} & l &:= 10 \cdot 10^{-3} & S &:= 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l & S &= 2.513 \times 10^{-4} \\
p &:= \left( \frac{0.65}{e^{1.56}} \right)^{\frac{3}{5}} & p &= 0.303 & u0 &:= \frac{d \cdot S}{\eta_1 \cdot e^{f2(0)}} & u0 &= 1.228 \times 10^{-33}
\end{aligned}$$

18. Рассчитаем время до пробоя  $\tau_5$  на основе найденных параметров уравнения надежности изоляции при заданных значениях температуры  $T_1$  и напряженности электрического поля  $E_1$ .

$$\begin{aligned}
k &= 1.38 \times 10^{-23} & b &= 4.099 \times 10^{-3} & \eta_1 &= 1 & T_1 &= 20 \text{ , } ^\circ\text{C} \\
t_0 &= 1 \times 10^{-13} & A &= 5.206 \times 10^{-22} & \beta_2 &:= 2.2 & E_1 &= 225 \text{ , } \text{кВ/мм} \\
D &= 5.5 \times 10^{-19} & T_3 &:= 20 + 273
\end{aligned}$$

$$x_5 := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_3} \cdot \beta_2 \cdot \eta_1 \cdot E_1 \quad x_5 = 0.141$$

$$\phi_5 := \sqrt{1 - 2 \cdot x_5} - x_5 \cdot \ln \left( \frac{1}{x_5} + \frac{1}{x_5} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x_5} - 1 \right) \quad \phi_5 = 0.496$$

$$\tau_5 := t_0 \cdot \exp \left( \frac{D \cdot \phi_5}{2 \cdot k \cdot T_3} \right) \quad \tau_5 = 44.294 \text{ года}$$

19. Используя найденные параметры уравнения надежности, проанализируем зависимость времени до пробоя от температуры при заданной напряженности электрического поля  $E_1$ .

$$\text{ORIGIN} := 1$$

$$l := 1..5$$

$$T_5 := \begin{pmatrix} 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \end{pmatrix}$$

$$T_{6_1} := T_{5_1} + 273$$

$$x_{\phi_1} := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_{\phi_1}} \cdot \beta \cdot 2 \cdot \eta \cdot E_1$$

$$T_{\phi_1} =$$

$$\phi_{\phi_1} := \sqrt{1 - 2 \cdot x_{\phi_1}} - x_{\phi_1} \cdot \ln \left( \frac{1}{x_{\phi_1}} + \frac{1}{x_{\phi_1}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x_{\phi_1}} - 1 \right)$$

293
313
333
353
373

$$\tau_{\phi_1} := t_0 \cdot \exp \left( \frac{D \cdot \phi_{\phi_1}}{2 \cdot k \cdot T_{\phi_1}} \right)$$

$$T_{\phi_1} =$$

293
313
333
353
373

$$x_{\phi_1} =$$

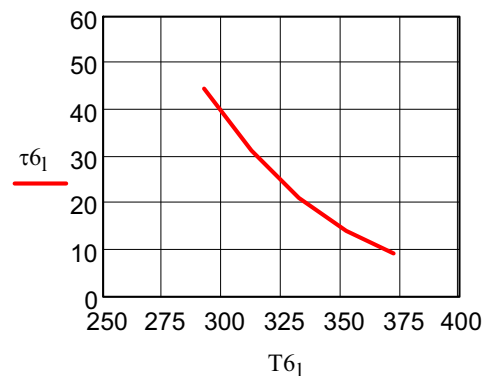
0.141
0.13
0.12
0.11
0.102

$$\phi_{\phi_1} =$$

0.496
0.524
0.551
0.577
0.601

$$\tau_{\phi_1} =$$

44.294
30.912
20.908
13.786
8.906



20. Используя найденные параметры уравнения надежности, проанализируем зависимость времени до пробоя от напряженности электрического поля при заданном значении температуры окружающей среды.

$$T_5 := 20$$

$$E_1 := \begin{pmatrix} 180 \\ 190 \\ 200 \\ 225 \\ 250 \end{pmatrix}$$

$$T_6 := T_5 + 273 \quad T_6 = 293$$

$$x_{\phi_1} := \frac{1}{D} \cdot A \cdot e^{-b \cdot T_6} \cdot \beta \cdot 2 \cdot \eta \cdot E_1$$

$$\phi_{\phi_1} := \sqrt{1 - 2 \cdot x_{\phi_1}} - x_{\phi_1} \cdot \ln \left( \frac{1}{x_{\phi_1}} + \frac{1}{x_{\phi_1}} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot x_{\phi_1}} - 1 \right)$$

$$\tau_{\phi_1} := t_0 \cdot \exp \left( \frac{D \cdot \phi_{\phi_1}}{2 \cdot k \cdot T_6} \right)$$

$x_1 =$

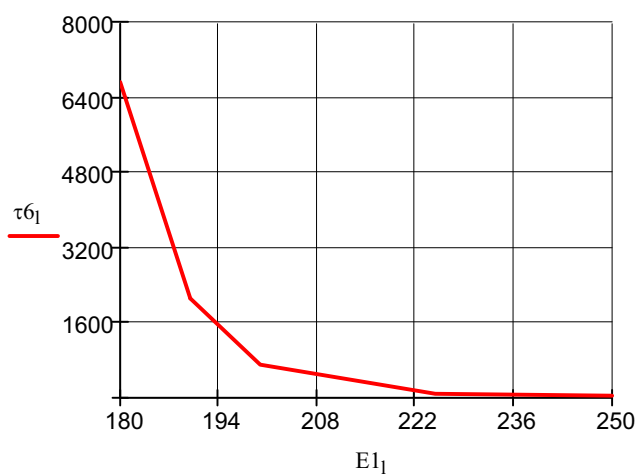
0.113
0.119
0.125
0.141
0.157

$\phi_1 =$

0.57
0.553
0.536
0.496
0.458

$\tau_1 =$

$6.716 \cdot 10^3$
$2.107 \cdot 10^3$
678.121
44.294
3.328



21. Дадим объяснение полученным зависимостям с физической точки зрения.

## Содержание

Предисловие.....	3
Лабораторная работа № 1 «Исследование электрического поля электроизоляционных конструкций методом конформных отображений» .....	4
Лабораторная работа № 2 «Градирование изоляции, как метод выравнивания электрического поля в силовых и высоковольтных кабелях».....	14
Лабораторная работа № 3 «Исследование влияния конденсаторных обкладок на распределение напряженностей электрического поля в слоистой изоляции» .....	19
Лабораторная работа № 4 «Исследование поверхностного перекрытия изоляторов в воздухе»..	27
Лабораторная работа № 5 «Определение параметров функции распределения вероятностей пробивных напряженностей поля».....	35
Лабораторная работа № 6 «Исследование трекинговости электроизоляционных материалов» .....	42
Лабораторная работа № 7 «Определение параметров уравнения надежности электрической изоляции».....	50
Требования к оформлению отчета по лабораторной работе .....	61
Форма отчета по лабораторной работе .....	62
Приложение 1 .....	64
Приложение 2 .....	67
Приложение 3 .....	71
Приложение 4 .....	73
Приложение 5 .....	78



Учебное издание

МЕРКУЛОВ Валерий Иванович

## **РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Расчет и конструирование электроизоляционных систем и электротехнических изделий» для студентов IV курса, обучающихся по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», специальности 140611 «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника»

Научный редактор  
кандидат технических наук,  
доцент

*В.М. Анিকেенко*

Редактор

*М.В. Пересторонина*

Верстка

*Д.В. Сотникова*

Дизайн обложки

*О.Ю. Аршинова*

Подписано к печати 27.11.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 5,05. Уч.-изд. л. 4,57.

Заказ 782. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.