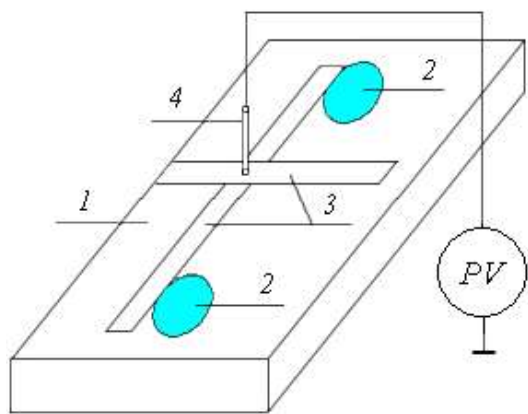


## Лабораторная работа 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Цели работы:* ознакомление с методикой моделирования электростатического поля в



токопроводящей среде; исследование электростатического поля, созданного системой из проводящих тел.

*Приборы и принадлежности:* лабораторный макет установки для моделирования электростатического поля (рис. 5.1). В работе используется планшет 1, покрытый проводящей бумагой, с нанесенными на него металлическими электродами 2. На планшете установлены

Рис. 5.1

две подвижные линейки 3, с помощью которых определяются координаты щупа 4, подключенного к вольтметру PV. Помещая щуп в различные точки планшета и измеряя потенциал данной точки, можно построить картину исследуемого поля.

### Исследуемые закономерности

**Модель электростатического поля.** В проводящей среде под действием приложенной к электродам разности потенциалов происходит направленное движение заряженных частиц и устанавливается стационарное распределение потенциала, подобное распределению потенциала в диэлектрической среде вокруг заряженных проводящих тел, если форма и взаимное расположение последних аналогичны соответствующим параметрам электродов проводящей модели.

Сопоставление свойств электростатического поля и поля электрического тока в проводящей среде показывает, что если в электростатическом поле на помещенный в поле заряд действует сила

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} = -q \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} \mathbf{n}, \quad (5.1)$$

где  $\mathbf{n}$  – единичный вектор в направлении максимального изменения потенциала, то в проводящей среде вектор плотности тока подчиняется вполне симметричному соотношению

$$\mathbf{j} = -\gamma \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} \mathbf{n} = \gamma \mathbf{E}, \quad (5.2)$$

где  $\gamma$  – электропроводность среды (величина, обратная удельному сопротивлению).

Из сопоставления двух соотношений видно, что во-первых, оба поля потенциальны, т. е. не образуют вихрей в пространстве окружающем электроды, а во-вторых, как линии напряженности электростатического поля, так и линии тока перпендикулярны линиям или поверхностям равного потенциала.

**Поле длинной двухпроводной линии.** На планшете моделируются так называемые плоские поля, т. е. такие поля, картина которых остается неизменной при параллельном переносе плоскости, в которой поле исследуется. Как правило, это электростатические поля объектов, бесконечно протяженных в направлении, перпендикулярном секущей плоскости. В данной работе исследуется поле двух длинных, параллельных, равномерно и разноименно заряженных проводящих цилиндров (двухпроводной линии).

Если абсолютное значение линейной плотности заряда на цилиндрах  $\tau$  (Кл/м), то напряженность электростатического поля в произвольной точке секущей плоскости будет определяться геометрической суммой напряженностей полей, создаваемых каждым цилиндром (принцип суперпозиции). Для каждого цилиндра абсолютное значение напряженности поля равно

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}, \quad (5.3)$$

а значение и направление результирующего вектора напряженности поля определяют по отношению к системе координат  $xOy$  (рис. 5.2), которую задает экспериментатор.

**Связь между потенциалом и напряженностью электростатического поля.** Для потенциальных полей справедливо дифференциальное соотношение между энергетической и силовой характеристиками поля. Для электростатического поля это соотношение имеет вид

$$\mathbf{E} = -\text{grad} \varphi, \quad (5.4)$$

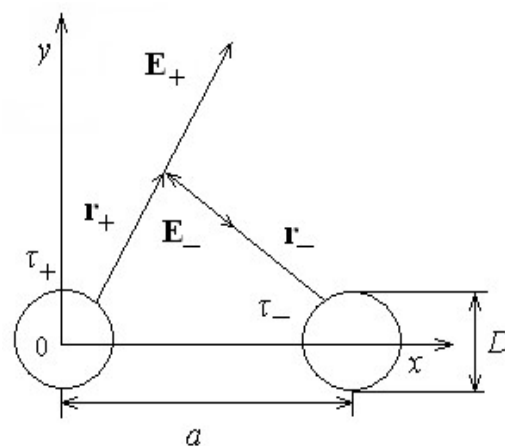


Рис. 5.2

т. е. проекции вектора напряженности на оси декартовой системы координат определяются следующим образом:

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}. \quad (5.5)$$

Физический смысл градиента легко понять, если учесть, что линии (или поверхности для объемной картины) равного потенциала и линии напряженности электростатического поля взаимно перпендикулярны. Тогда, рассматривая в произвольной точке эквипотенциальной поверхности систему декартовых координат из двух касательных и нормали к поверхности, можно видеть, что результирующий вектор напряженности поля располагается в направлении максимального изменения потенциала (в данном случае по нормали к поверхности). Поэтому выражение (5.4) часто заменяют эквивалентным ему соотношением

$$\mathbf{E} = -\frac{d\varphi}{dn} \mathbf{n}, \quad (5.6)$$

где  $\mathbf{n}$  – единичный вектор соответствующего направления.

Выражение (5.6) часто бывает предпочтительно в экспериментальных исследованиях электрических полей.

Для определения приближенных значений проекций напряженности в некоторой точке по измеренным значениям потенциала вблизи этой точки можно воспользоваться соотношением

$$E_x = \frac{\varphi_{1x} - \varphi_{2x}}{x_2 - x_1}, \quad (5.7)$$

где числитель – разность потенциалов, измеренных в точках с соответствующими координатами, а знаменатель – разность координат этих точек.

### **Задание на подготовку к работе (оформить на отдельном листе)**

1. Сформулируйте цель работы.
2. Дайте определение потенциала электростатического поля.
3. Каким правилом следует руководствоваться при построении силовых и эквипотенциальных линий поля в точке их пересечения? Объяснить.
4. Как силовые линии электростатического поля могут характеризовать напряженность?
5. Напишите и прокомментируйте формулу для потенциальной энергии системы из  $N$  точечных зарядов.

6. Выведите выражение для напряженности, создаваемой равномерно заряженным стержнем длиной  $L$  с линейной плотностью заряда  $\tau$ , на оси стержня на некотором расстоянии от его конца (вне стержня).

### **Указания по выполнению наблюдений**

1. Выполнить эскиз модели. Для этого, пользуясь подвижными линейками планшета, определить координаты и размеры электродов модели. Далее нанести изображения электродов и оси координат на подготовленный бланк (лист миллиметровой бумаги формата А4), определить масштаб, в котором будет изображена исследуемая модель, оцифровать координатные оси.

2. Установить одну из линеек таким образом, чтобы щуп перемещался вдоль линии, соединяющей центры электродов. Перемещая другую линейку, измерить потенциал в различных точках модели вдоль этой линии. Измерения провести через примерно равные расстояния не менее чем в 10 точках между электродами и в 10 точках вне электродов с обеих сторон.

3. Сместить линейку с линии, соединяющей электроды примерно на 6...8 см. Установить вторую линейку так, чтобы она проходила между электродами, измерить потенциал в выбранной таким образом точке. Поочередно смещая линейки, измерить потенциалы на расстоянии примерно 0.5 см от выбранной точки вдоль каждой из осей координатной системы.

4. Выполнить аналогичные измерения в точке, расположенной симметрично относительно точки, выбранной в п. 3.

5. Выполнить аналогичные измерения еще для двух точек, расположенных за электродами.

### **Задание на подготовку к проведению работы**

1. Выполните индивидуальное домашнее задание.

2. Изучите описание лабораторной работы.

3. Подготовьте лист миллиметровой бумаги формата А4 для изображения электродов исследуемой модели, координатных осей и основных характеристик поля.

4. Подготовьте таблицы для записи результатов измерений, описанных в пп. 1–5 «Указаний по проведению наблюдений».

5. Выведите формулы для определения значений проекций и модуля напряженности поля, ориентируясь на подготовленные таблицы.

6. Выведите формулы для определения погрешностей проекций и модуля напряженности поля, основываясь на инструментальных погрешностях измерения потенциала и координат.

7. Подготовьте протокол наблюдений с соответствующими таблицами.

### **Задание по обработке результатов**

1. По формуле (5.7) рассчитайте экспериментальные значения напряженности поля в точках, расположенных вдоль линии, соединяющей электроды. Нанесите на график ход изменения напряженности электрического поля вдоль этой линии (только экспериментальные точки).

2. Считая диэлектрическую проницаемость моделируемой области  $\varepsilon = 1$ , определите по значению напряженности в одной из точек на линии между электродами моделируемый заряд (линейную плотность), рассчитайте и нанесите на график с экспериментальными точками теоретические кривые изменения напряженности электрического поля вдоль линии, соединяющей центры электродов. Сравните результаты.

3. Определите экспериментальные значения проекций на оси координат и модули напряженности поля в точках, где проводились измерения, как описано в пп. 3–5 «Указаний по проведению наблюдений».

4. Нанесите на эскиз модели (см. п. 1 «Указаний по проведению наблюдений») изображения нескольких векторов напряженности поля (6–8 точек на линии, соединяющей электроды и во всех точках в стороне от этой линии).

5. Рассчитайте для выбранных векторов напряженности погрешности их модулей, запишите полученные результаты в стандартном виде на эскизе, рядом с соответствующим вектором.

6. Сформулируйте выводы по проведенному исследованию.