

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра физики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 э.1

**ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ

Минск 2022

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2э.1

ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Цель работы:

1. Изучить основные характеристики электростатических полей.
2. Ознакомиться с методом моделирования электростатических полей.
3. Изучить строение некоторых электростатических полей.

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ

Решение ряда задач при конструировании конденсаторов, электрически перепрограммируемой памяти, фотоэлектронных умножителей и т.д. требует знания строения электростатического поля в пространстве между электродами сложной конфигурации.

Электростатическим полем называется электрическое поле неподвижных в выбранной системе отсчета зарядов. Основными характеристиками электростатического поля являются **вектор напряженности** и **потенциал**.

Вектором напряженности электрического поля \vec{E} в данной точке поля называется физическая величина, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в ту же точку: $\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q}$. Напряженность – *силовая* характеристика электростатического поля.

Вектор напряженности электрического поля точечного заряда q в точке с радиусом-вектором \vec{r} может быть определен на основе закона Кулона:

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^3} \vec{r}, \quad (1)$$

где k – размерная константа, $k = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \text{ Кл}^{-2}$.

Электростатическое поле может быть наглядно изображено с помощью линий напряженности (силовых линий). **Линиями напряженности** называются кривые, касательные к которым в каждой точке совпадают по направлению с вектором напряженности в той же точке поля (рис. 1).

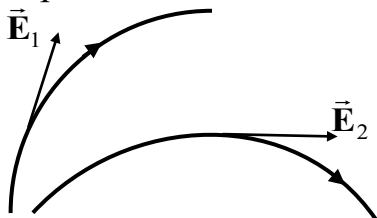


Рис. 1

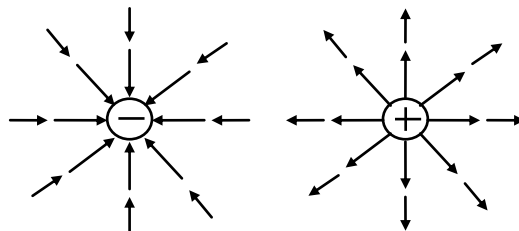


Рис. 2

Число линий, пронизывающих единицу поверхности перпендикулярной им площадки, прямо пропорционально величине напряженности электрического поля в данном месте. Линии напряженности начинаются на положительном заряде (или в бесконечности) и заканчиваются на отрицательном заряде (или в бесконечности) (рис. 2).

Линии напряженности не пересекаются, так как в каждой точке поля вектор \vec{E} может иметь лишь одно направление.

Напряженность поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности: $\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$. Данное соотношение выражает принцип суперпозиции для вектора напряженности электрических полей. В настоящий момент для визуализации силовых свойств электрического поля используются графики векторного поля. Ниже приведены графики для суперпозиций полей, которые соответствуют планшетам № III (разноименные заряды) и № II (одноименные заряды) на макете установки (рис. 8).

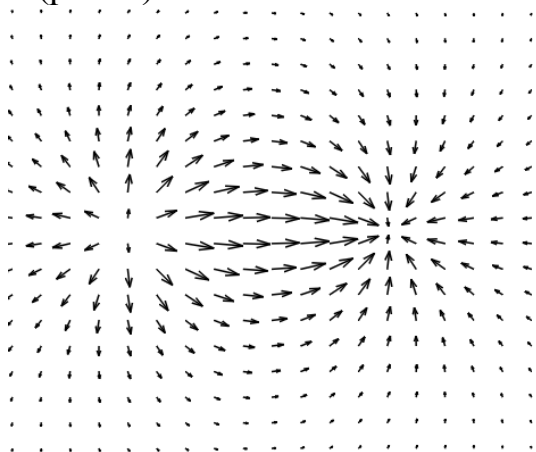


Рис. 3

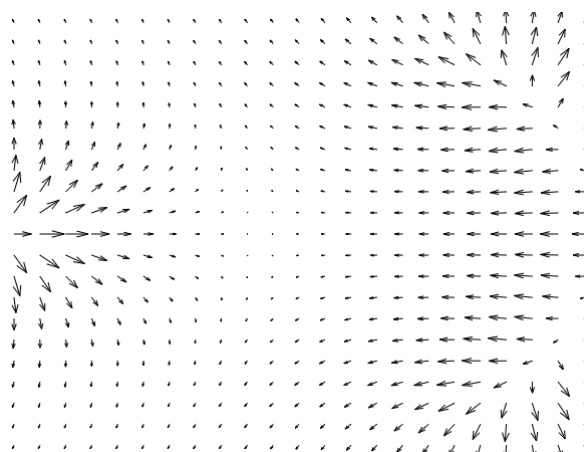


Рис. 4

Потенциалом φ в данной точке поля называется скалярная физическая величина, численно равная потенциальной энергии, которой обладал бы единичный положительный заряд, помещенный в ту же точку: $\varphi(r) = \frac{W(r)}{q}$.

Потенциал электрического поля точечного заряда q в точке с радиусом-вектором \vec{r} может быть определен на основе закона Кулона:

$$\varphi(r) = k \frac{q}{r}. \quad (2)$$

Потенциал – *энергетическая* характеристика электростатического поля. Если нулевой уровень потенциальной энергии системы зарядов условно выбрать на бесконечности, то выражение (2.1.2) представляет собой работу внешней силы по перемещению единичного положительного заряда из бесконечности в рассматриваемую точку B :

$$\varphi(r) = \frac{A_{\infty \rightarrow B}}{q}. \quad (3)$$

Геометрическое место точек в электрическом поле, которым соответствует одно и то же значение потенциала $\varphi(x, y, z) = const$, называется **эквипотенциальной поверхностью**.

Потенциал поля системы точечных зарядов равна алгебраической сумме потенциалов полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности: $\varphi = \sum_i \varphi_i$. Данное соотношение выражает принцип суперпозиции для потенциалов электрических полей.

В настоящий момент для визуализации скалярной характеристики электрического поля используются контурные графики, которые соответствуют эквипотенциальным линиям $\varphi(x, y) = const$. Ниже приведены графики для суперпозиций полей, которые соответствуют планшетам №III (разноименные заряды) и №II (одноименные заряды) на макете установки (рис. 8).

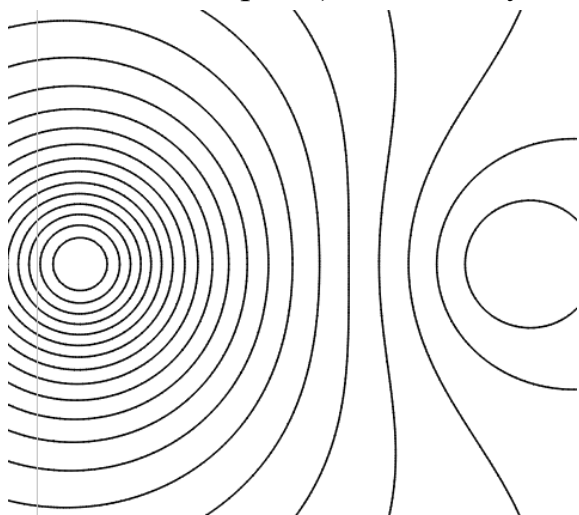


Рис. 5

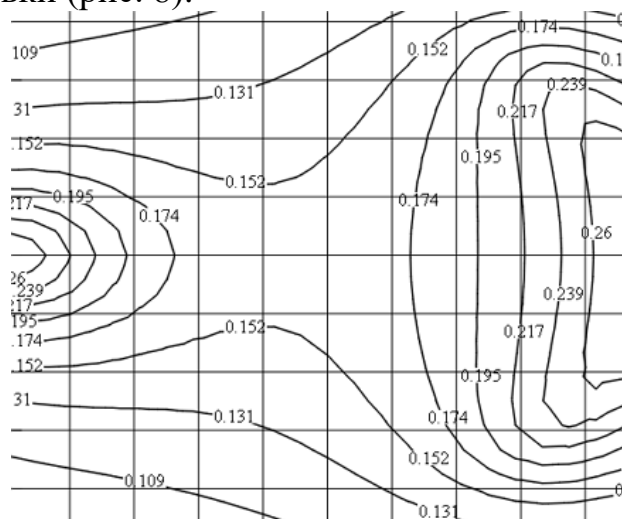


Рис. 6

Рассмотрим перемещение единичного заряда вдоль эквипотенциальной линии (рис.2.1.7): работа сил поля равна нулю: $\delta A = -d\varphi = 0$, так как нет изменения потенциальной энергии заряда. С другой стороны, работу по перемещению единичного заряда можно определить как $\delta A = \vec{E} \cdot d\vec{l} = Edl \cos(\alpha)$.

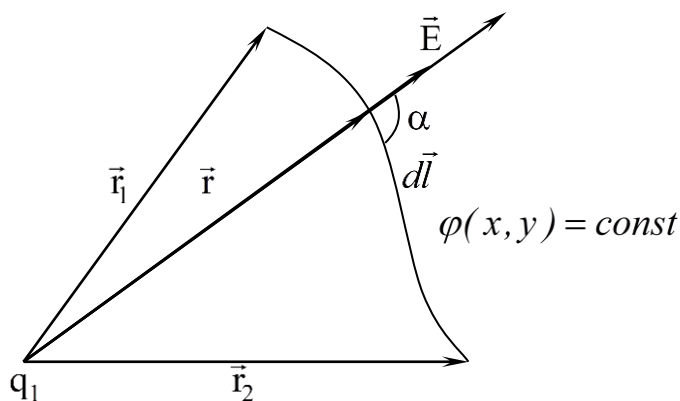


Рис. 7

Решая систему получаем, что $\cos(\alpha) = 0$, то есть сила, действующая на единичный заряд, все время перпендикулярна вектору перемещения $d\vec{l}$. Следовательно, вектор напряженности поля в каждой точке перпендикулярен эквипотенциальной поверхности.

Для произвольного перемещения $\partial \vec{s}$, проекция вектора \vec{E} на это направление находится из решения системы $E \cos(\alpha) \cdot \partial s = E_s \cdot \partial s = -\partial \varphi$, как

$$E_s = -\frac{\partial \varphi}{\partial s}, \quad (4)$$

то есть, равна взятому с обратным знаком приращению потенциала на единицу длины в направлении вектора $\partial \vec{s}$. В декартовой системе координат вектор напряженности \vec{E} может быть разложен по ортонормированному базису:

$$\vec{E} = \vec{i}E_x + \vec{j}E_y + \vec{k}E_z, \quad (5)$$

Подставляя в (5) проекции вектора \vec{E} в виде (4), получаем связь между напряженностью \vec{E} и потенциалом электрического поля φ :

$$\vec{E} = -grad \varphi = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k}\right). \quad (6)$$

Аналитический расчет поля удастся только в наиболее простых случаях. Сложные электростатические поля исследуются обычно экспериментально методом моделирования.

Метод изучения электростатического поля путем создания другого эквивалентного ему поля называется **моделированием**.

Прибегать к изучению эквивалентного поля приходится из-за того, что прямое изучение электростатического поля сопряжено с рядом технических трудностей.

В данной работе экспериментальное изучение строения электростатического поля заменяется простыми и более точными измерениями характеристик поля стационарных токов (постоянных во времени электрических токов). В качестве характеристики такого поля используется вектор плотности тока \vec{j} .

В соответствии с локальной формулировкой закона Ома: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, где σ – электропроводность среды. В этом случае векторы \vec{j} и \vec{E} являются коллинеарными. Электрическое поле стационарных токов, как и электростатическое, является потенциальным. Вектор напряженности \vec{E} электростатического поля всегда перпендикулярен поверхности проводника. Вектор \vec{E} поля стационарных токов также перпендикулярен поверхности электродов любой формы, если удельная электропроводность окружающей среды намного меньше удельной электропроводности вещества электродов.

При моделировании эквивалентных векторных полей \vec{j} и \vec{E} форма и расположение электродов модели и электрических зарядов совпадают. Пространство между электродами заполняется однородной слабо проводящей средой (электропроводная бумага). Измерения потенциалов между электродами осуществляется с помощью зонда (3) (рис. 8). Искажения, связанные с размерами зонда, оказываются незначительными при измерениях на модели, изготовленной в сильно увеличенном масштабе.

Особенно удобно исследовать с помощью зондов плоские поля, то есть поля, в которых векторы \vec{E} лежат в параллельных плоскостях, а потенциал и напряженность зависят от двух координат. Исследование такого поля требует измерения потенциала или напряженности только в одной из плоскостей. К рассматриваемым полям относятся поле плоского цилиндрического конденсатора, поле системы параллельных проводников и другие.

Используемые в лабораторной работе макеты (рис. 8) являются плоским аналогом полей однородного, радиального и поля линейного диполя в вакууме.

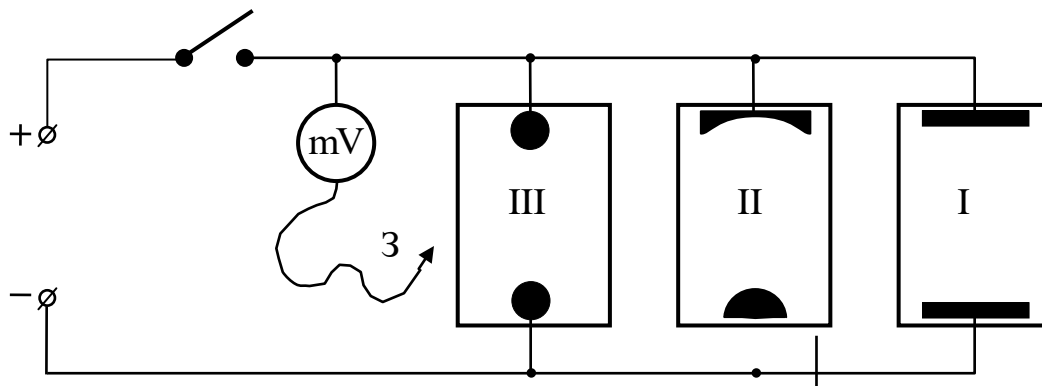


Рис.2.1.8

Макеты I, II, III представляют собой листы электропроводной бумаги, на которой закреплены плоские металлические электроды, подсоединенные к источнику постоянного тока. Электропроводная бумага – это обычная бумага, в составе которой имеются соприкасающиеся друг с другом частицы графита или сажи. Поле стационарных токов в электропроводной бумаге является плоским полем вектора \vec{J} , следовательно, изучение этого поля достаточно проводить на поверхности бумаги. Разность потенциалов между произвольными точками поля измеряется с помощью зонда (3), соединенного с вольтметром или другим измерительным прибором.

ЗАДАНИЕ

1. Исследовать распределение потенциала между электродами изучаемых полей.
2. Построить картину эквипотенциальных и силовых линий этих полей.
3. Построить график функции потенциала $\varphi(x)$ при выбранном значении $y = const$ для исследуемых полей.
4. Рассчитать приближенно модуль напряженности электрического поля в указанной точке на макете.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение основных характеристик электростатического поля.
2. Доказать ортогональность эквипотенциальных поверхностей и линий напряженности.
3. Показать, что линейный интеграл $\int_L \vec{E} \cdot d\vec{l}$ зависит от формы кривой, соединяющей две точки поля. Записать условие потенциальности поля.
4. Получить в общем виде связь между напряженностью \vec{E} и потенциалом φ .
5. Обосновать справедливость использования полей стационарных токов для исследования электростатических полей.
6. Пояснить принцип работы используемых макетов. Нарисовать картины электрических полей: однородного, радиального и диполя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2,- М.:Наука, 1988, § 5-9.
2. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. – М.: Высшая школа, 1983, §1.1, 1.5, 1.6.