Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра физики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

№ 2э.1

ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Минск 2022

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2э.1

ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

2.1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

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

2.1.2. 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**.

Напряженность $\vec{E}$ электрического поля в некоторой его точке – векторная физическая величина, являющаяся силовой характеристикой электрического поля и равная отношению силы $\vec{F}$, действующей со стороны поля на помещенный в данную точку неподвижный точечный пробный заряд $q_{пр}$, к этому заряду:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q_{пр}}.$$

В СИ $[E]$ = В/м.

Вектор напряженности электрического поля точечного заряда q в точке с радиус-вектором $\vec{r}$ относительно этого заряда определяется на основе закона Кулона как:

$$\vec{E}(\vec{r}) = k\frac{q}{r^3}\vec{r}, \qquad (2.1.1)$$

где k – размерная константа, $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9\cdot 10^9\ \text{Н}\cdot\text{м}^2\cdot\text{Кл}^{-2}$.

Электростатическое поле можно наглядно изобразить с помощью линий напряженности (силовых линий). **Линия напряженности** – воображаемая направленная линия, в каждой точке которой касательная к этой линии содержит вектор напряженности (рис. 2.1.1).

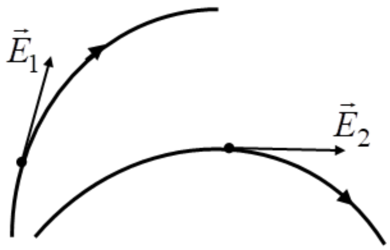

Рис. 2.1.1

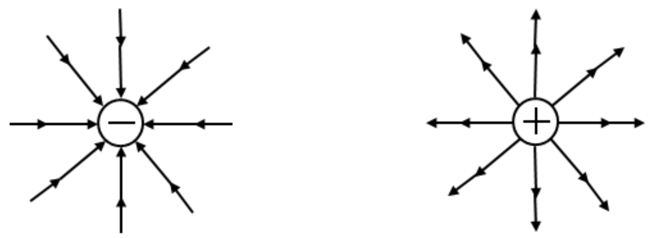

Рис. 2.1.2

Число линий, пронизывающих поверхность единичной площади, перпендикулярную им, 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. 2.1.2). Линии напряженности поля, создаваемого одним и тем же зарядом, не пересекаются, так как в каждой точке поля вектор $\vec{E}$ может иметь лишь одно направление.

Для электрических полей справедлив **принцип суперпозиции**: напряженность в каждой точке электрического поля, созданного несколькими неподвижными источниками, равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым источником по отдельности в этой точке. Для системы *n* точечных зарядов:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i(\vec{r}),$$

где $\vec{E}_i(\vec{r})$ – напряженность поля точечного заряда q_i в точке с $\vec{r}_i$.

В настоящий момент для визуализации силовых свойств электрического поля используются график векторного поля. На рис. 2.1.3 и 2.1.4 приведены графики векторных полей, которые соответствуют планшетам №III (разноименные заряды) и №II (одноименные заряды) на макете установки (рис. 2.1.8).

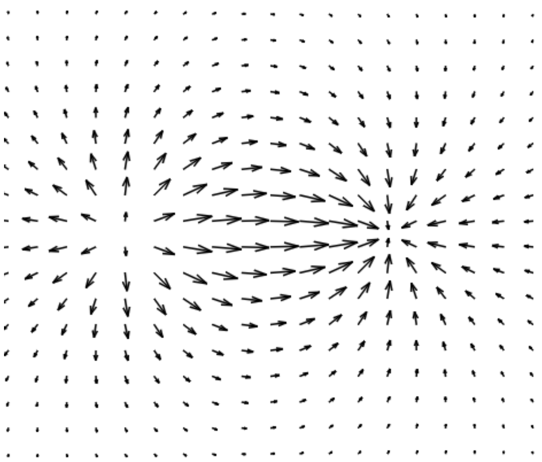

Рис. 2.1.3

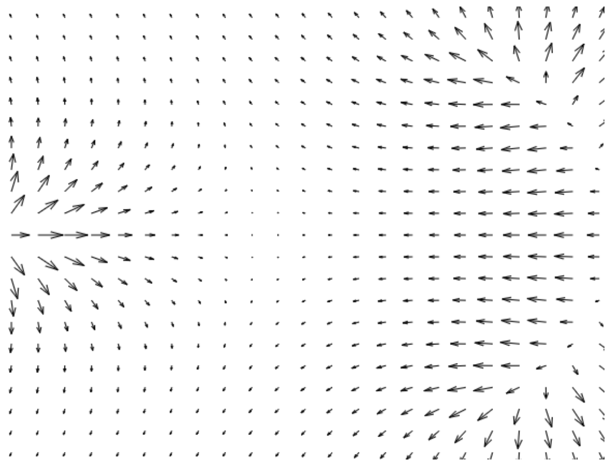

Рис. 2.1.4

Потенциал $\varphi(\vec{r})$ точки электростатического поля – скалярная физическая величина, являющаяся <u>энергетической</u> характеристикой этого поля в данной точке и равная отношению потенциальной энергии $W^p(\vec{r})$, которой обладает находящийся в данной точке пробный точечный заряд $q_{\text{пр}}$, к этому заряду:

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{W^p(\vec{r})}{q_{\text{пр}}}.$$

В СИ [φ] = В.

На основе определения потенциальной энергии, потенциала и закона Кулона потенциал электростатического поля точечного заряда q в точке с радиусом-вектором $\vec{r}$ относительно этого заряда при выборе нулевого уровня потенциальной энергии на бесконечно большом расстоянии от q равен:

$$\varphi(r) = k\frac{q}{r}. \qquad (2.1.2)$$

Потенциал (2) в точке $B(\vec{r}\,)$ с радиус-вектором $\vec{r}$ численно равен работе внешней силы, совершаемой при перемещении единичного положительного заряда (q_1 = 1 Кл) из бесконечности в рассматриваемую точку B:

$$\varphi(r) = \frac{A_{\infty \to B}}{q_1}. \tag{2.1.3}$$

Для электростатических полей справедлив **принцип суперпозиции** для потенциала: потенциал данной точки электростатического поля, созданного несколькими неподвижными источниками, равен алгебраической сумме потенциалов полей, создаваемых каждым источником по отдельности в этой точке:

$$\varphi(\vec{r}) = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i(\vec{r}),$$

где $\varphi_i(\vec{r})$ – потенциал поля, создаваемого i-м источником в данной точке поля.

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

В настоящий момент для визуализации скалярной характеристики электростатического поля используются *контурные графики*, которые соответствуют эквипотенциальным линиям $\varphi(x, y) = \text{const}$. На рис. 2.1.5 и 2.1.6 приведены контурные графики полей, которые соответствуют планшетам №III (разноименные заряды) и №II (одноименные заряды) на макете установки (рис. 2.1.8).

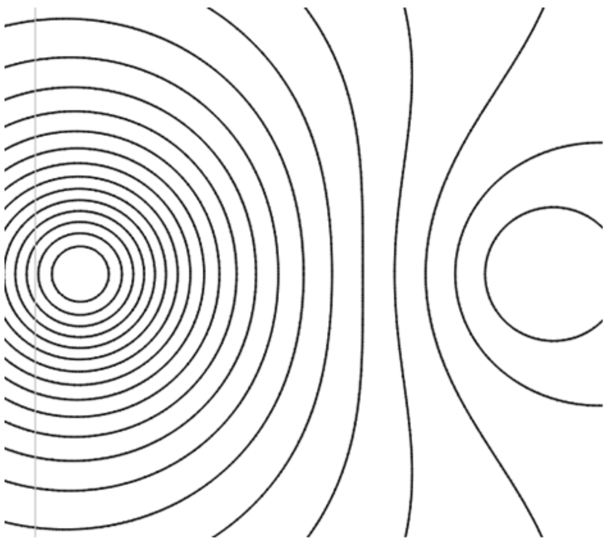

Рис. 2.1.5

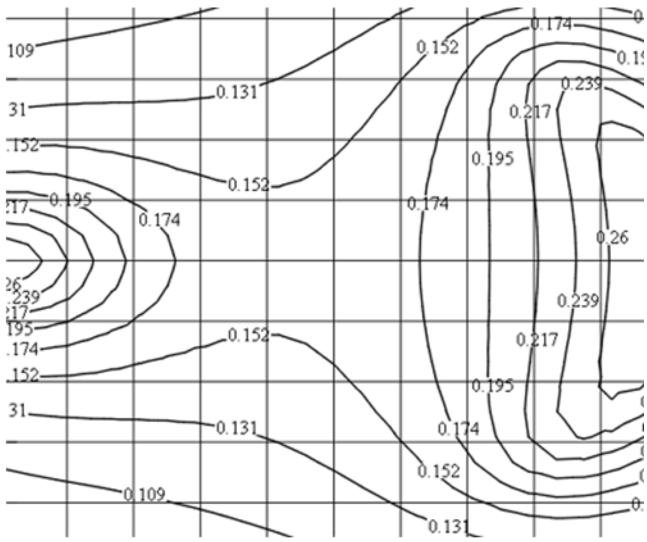

Рис. 2.1.6

Рассмотрим элементарное перемещение $d\vec{r}$ заряда q вдоль эквипотенциальной линии электростатического поля произвольной системы зарядов. Элементарная работа сил поля в этом случае равна нулю:

$$\delta A = -q \cdot d\varphi = 0,$$

так как вдоль эквипотенциальной линии изменения потенциала нет, т. е. $d\varphi = 0$.

С другой стороны, эту работу можно определить как

$$\delta A = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F \cdot |d\vec{r}| \cdot \cos\alpha = |q| E \cdot |d\vec{r}| \cdot \cos\alpha,$$

где α – угол между $\vec{F}$ и $d\vec{r}$.

Решая систему уравнений получаем, что $\cos\alpha = 0$, то есть действующая на заряд q сила $\vec{F}$ в рассматриваемом случае перпендикулярна вектору перемещения $d\vec{r}$. Следовательно, вектор напряженности $\vec{E}$ поля в каждой точке перпендикулярен эквипотенциальной линии.

Для *произвольного* перемещения $d\vec{r}$ заряда q в электростатическом поле (рис. 2.1.7) проекция вектора напряженности поля E_r на это направление находится из решения уравнения $E \cdot |d\vec{r}| \cdot \cos\alpha = E_r \cdot |d\vec{r}| = -d\varphi$ как

$$E_r = -\frac{d\varphi}{dr}, \qquad (2.1.4)$$

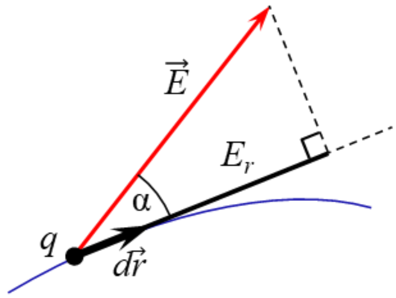

Рис. 2.1.7

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

$$\vec{E} = \vec{i} \cdot E_x + \vec{j} \cdot E_y + \vec{k} \cdot E_z. \qquad (2.1.5)$$

Подставляя в (2.1.5) проекции вектора $\vec{E}$ в виде (2.1.4), получаем связь между напряженностью $\vec{E}$ и потенциалом электрического поля φ:

$$\vec{E} = -\mathrm{grad}\,\varphi = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y} \cdot \vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z} \cdot \vec{k}\right). \qquad (2.1.6)$$

Аналитический расчет поля удается 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: $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$, 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 (З) (рис. 2.1.8). 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 электрического диполя, плоского цилиндрического конденсатора, поле системы параллельных проводников и другие.

Используемые в лабораторной работе макеты (рис. 2.1.8) являются плоским аналогом полей однородного, радиального и поля линейного диполя в вакууме.

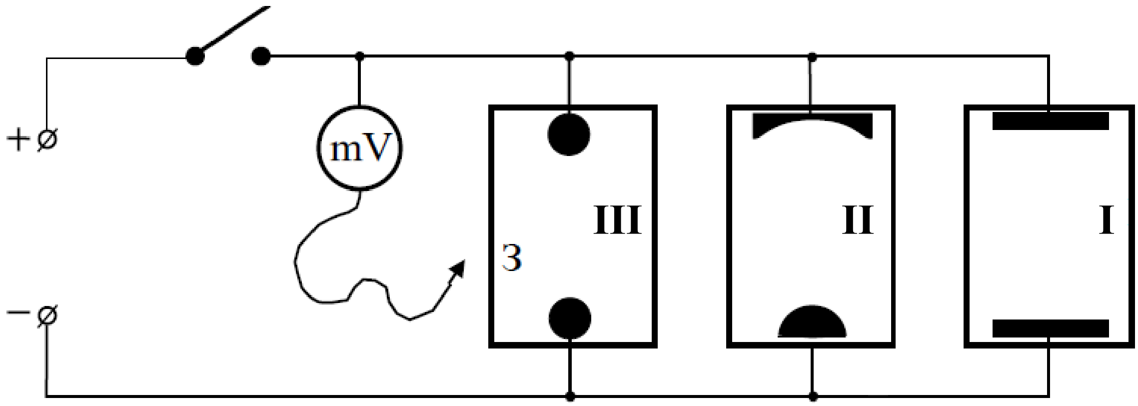

Рис. 2.1.8

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 (З), 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 на макете точке.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение основных характеристик электростатического поля.
2. Доказать ортогональность эквипотенциальных поверхностей и линий напряженности.
3. Показать, что линейный интеграл $\int\limits_L \vec{E} \cdot \overrightarrow{d\ell}$ не 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. Изобразить картины электрических полей: однородного, радиального и диполя.

Литература

1. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм / И.В. Савельев. – М. : Астрель, АСТ, 2004.
2. Иродов, И.Е. Электромагнетизм. Основные законы / И.Е. Иродов. − М. : Лаборатория Базовых знаний, 2001.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2э.1

ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Для исследования распределения потенциала на листах электропроводной бумаги используется вольтметр. Предел измерения напряжения на вольтметре установить в положение 2 В. Тумблеры “СЕТЬ” на вольтметре и на макете перевести в положение “ВКЛ.”

Задание № 1. Построить систему эквипотенциальных линий для имеющихся на планшете конфигураций зарядов.

1. Подготовить лист миллиметровой бумаги, соответствующий размеру листа электропроводной бумаги макета с указанием масштабов по осям *OX* и *OY*.
2. Устанавливая зонд в отверстия на планшете, с помощью вольтметра измерить потенциалы всех указанных точек.
3. Записать значения потенциалов этих точек на подготовленном листе миллиметровой бумаги.
4. Отметить на листе положение новых точек с одинаковыми потенциалами. Соединить эти точки плавной линией.

Задание № 2. Перпендикулярно эквипотенциальным линиям провести силовые линии электрического поля. Указать их направления. Количество линий напряженности выбирается произвольным.

Задание № 3. Построить график функции потенциала $\varphi(x)$ при выбранном значении y = const для исследуемых полей.

Задание № 4. Используя взаимосвязь между $\vec{E}$ и φ (2.1.6), в выбранной Вами точке рассчитать приближенно модуль напряженности электрического поля:

$$E_x \approx -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}; \quad E_y \approx -\frac{\Delta\varphi}{\Delta y}; \quad E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}.$$