

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Лабораторная работа № 1.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель работы: экспериментальное исследование электростатического поля методом моделирования.

Оборудование: электролитическая ванна, электроды, источник питания, вольтметр, подвижный зонд.

Общие сведения

Электростатическое поле характеризуется двумя величинами: векторной – напряженностью \vec{E} и скалярной – потенциалом φ . **Напряженность** электрического поля в некоторой точке равна

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (1.1.1)$$

где \vec{F} – сила, действующая со стороны электрического поля на пробный заряд величиной q , помещенный в данную точку. **Потенциал** электростатического поля в некоторой точке равен

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q}, \quad (1.1.2)$$

где $W_{\text{п}}$ – потенциальная энергия пробного заряда q , помещенного в данную точку поля.

Для наглядного изображения электростатического поля используются силовые линии и эквипотенциальные поверхности. **Силовые линии** – это линии, касательные к которым в каждой их точке совпадают с направлением вектора напряженности электрического поля. Силовые линии строят так, чтобы они начинались на положительных зарядах и оканчивались на отрицательных или уходили в бесконечность. Густота силовых линий должна быть пропорциональна модулю напряженности электрического поля в данном месте.

Эквипотенциальные поверхности – это поверхности, во всех точках которых потенциал одинаков. Эквипотенциальные поверх-

ности и силовые линии электростатического поля в точках пересечения всегда взаимно перпендикулярны.

Напряженность и потенциал электростатического поля связаны соотношением

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} \right). \quad (1.1.3)$$

Такая связь означает, что вектор напряженности направлен в сторону наиболее резкого убывания потенциала, а модуль напряженности равен скорости изменения потенциала в этом направлении:

$$E = \left| \frac{d\varphi}{dl} \right|. \quad (1.1.4)$$

Форма эквипотенциальных поверхностей однозначно задает картину силовых линий. Исследовав распределение потенциала, можно построить и эквипотенциальные поверхности, и силовые линии.

При разработке различных электронных приборов необходимо знание электростатического поля между электродами сложной формы. Часто теоретическое решение такой задачи затруднительно. В таких случаях применяют метод моделирования электростатических полей.

Рассмотрим сущность метода моделирования. Предположим, нам необходимо изучить электростатическое поле, создаваемое двумя заряженными проводниками (электродами) в вакууме или в воздухе. На рис. 1.1.1 показан пример плоского электростатического поля, т.е. поля, силовые линии которого лежат в одной плоскости. Сплошные линии со стрелками – это силовые линии, пунктирные – эквипотенциальные линии. Обратите внимание, что силовые и эквипотенциальные линии взаимно перпендикулярны в точках пересечения. Силовые линии перпендикулярны и к поверхностям электродов (так как поверхности электродов также являются эквипотенциальными).

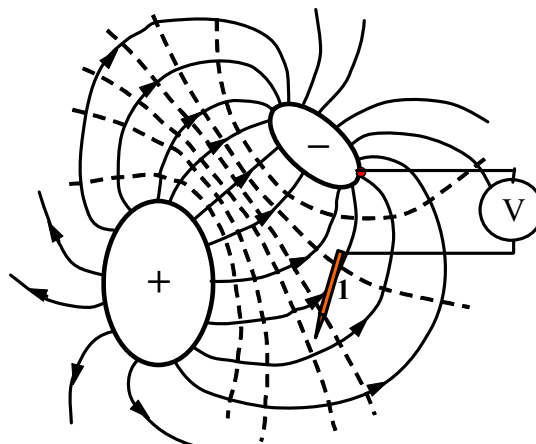


Рис. 1.1.1

При моделировании изготавливаются увеличенные модели электродов, которые погружают в электролитическую ванну, заполненную слабо проводящей жидкостью, например, обычной водой. С помощью вольтметра и подвижного зонда 1 (см. рис. 1.1.1) исследуется распределение потенциала в пространстве между электродами. Второй вывод вольтметра при этом подсоединяется к одному из электродов, который называют опорным. Зонд изготавливают обычно из тонкой проволоки, закрепленной в изолирующей ручке.

В такой модели в проводящей среде возникает электрический ток. Линии тока при определенных условиях будут совпадать с силовыми линиями электрического поля между моделируемыми электродами. Эти условия – следующие:

- жидкость должна быть однородной;
- удельная проводимость жидкости должна быть гораздо меньше, чем проводимость металла, из которого изготовлены модели электродов;
- между электродами необходимо поддерживать постоянную разность потенциалов с помощью источника тока;
- размеры электролитической ванны должны быть велики по сравнению с размерами исследуемой системы электродов.

Для того, чтобы электрическое поле в модели было таким же, как в исследуемом объекте, необходимо, чтобы были одинаковыми не только уравнения, описывающие эти поля, но и граничные условия для этих полей. При малых токах и высокой электропроводности материалов, из которых изготовлены электроды, поверхности электродов будут эквипотенциальными, и вектор напряженности электрического поля \vec{E} будет перпендикулярен поверхности электродов. Это соответствует граничным условиям для электростатического поля на поверхности проводника.

При проведении исследований следует иметь в виду, что в модели нет составляющей плотности тока, перпендикулярной поверхности жидкости. Поэтому в моделируемом поле не должно быть компоненты напряженности, перпендикулярной этой поверхности. По этой причине установка, используемая в работе, позволяет моделировать только плоские электрические поля.

Описание установки и метода измерений

В данной работе моделирование электростатического поля осуществляется с помощью электролитической ванны 1 (рис. 1.1.2), которая представляет собой неглубокий сосуд с плоским дном, изго-

товленный из оргстекла. Для удобства измерений на дне ванны нанесена сетка. Сторона каждой клетки равна 1 см. При выполнении измерений на дно ванны наливается тонкий слой воды и помещается система электродов 2, электрическое поле которой необходимо исследовать. Кроме ванны в состав лабораторной установки входят: источник питания ИП, к которому подключаются электроды, и вольтметр V. Вольтметр служит для измерения разности потенциалов между опорным электродом и точкой поля, в которую помещен подвижный зонд 3 – электрод малых размеров, подключенный ко второму зажиму вольтметра.

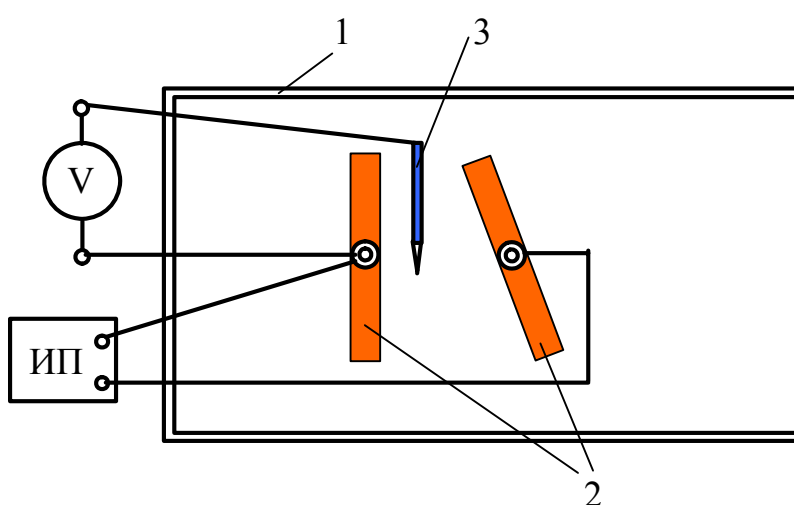


Рис. 1.1.2

В ходе исследования с помощью подвижного зонда отыскиваются точки, имеющие одинаковый потенциал. С этой целью зонд помещают в любую произвольную точку на дне ванны и измеряют потенциал этой точки.

Затем при перемещении зонда отыскивается и с соблюдением масштаба переносится на чертеж ряд других точек, имеющих тот же потенциал. Объединяя эту группу точек плавной кривой, получим эквипотенциальную линию. Затем зонд помещается в следующую точку, имеющую другой потенциал, и повторяются измерения. В результате отыскивается положение следующей эквипотенциальной линии. Повторяя измерения, можно построить достаточно большое число эквипотенциальных линий и с их помощью графически представить распределение потенциала в пространстве.

Построив эквипотенциальные линии, можно определить и ход силовых линий электрического поля. При построении силовых линий необходимо учитывать, что они перпендикулярны к эквипотенциаль-

ным линиям. Поэтому для построения силовых линий на чертеже необходимо так провести группу кривых, чтобы они пересекали эквипотенциальные линии под прямым углом, и указать направление этих линий от положительно заряженного электрода к отрицательно заряженному (положительно заряженным считаем электрод, потенциал которого больше).

При протекании постоянного электрического тока вследствие электрохимических процессов изменяется химический состав среды вблизи электродов. Это явление называется поляризацией и сопровождается возникновением ЭДС – ЭДС поляризации. Для исключения появления ЭДС поляризации, искажающей поле, практически исследуется переменное поле частотой 50 Гц. В этом случае распределение потенциала в пространстве в каждый момент времени будет таким же, как и при использовании постоянного тока. Следовательно, потенциал каждой точки может быть сопоставлен со значением переменного напряжения, измеряемого вольтметром. При оформлении же результатов можно положить, что один из электродов заряжен положительно, а другой – отрицательно.

Порядок выполнения измерений

1. Получить у преподавателя допуск к выполнению работы и указания по расположению электродов и значениям потенциала линий, которые вам будет необходимо построить. Записать в рабочей тетради ряд заданных вам значений потенциала $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots$

2. Налить в ванну воду, которая должна покрывать дно тонким (в несколько миллиметров) равномерным слоем. При необходимости с помощью винтов, которыми снабжены опоры ванны, установить ванну в горизонтальное положение.

3. Подключить вольтметр и источник питания к электродам в соответствии с рис. 1.1.2.

4. Выполнить в рабочей тетради с соблюдением масштаба рисунок с изображением электродов. Обычно удобно использовать масштаб 1:2, т.е. одной клетке сетки на дне ванны (1 см) должна соответствовать одна клетка ученической тетради (0,5 см).

5. Включить источник питания.

6. Располагая подвижный зонд вертикально, опереть его в дно ванны. Перемещая зонд в промежутке между электродами, убедиться, что показания вольтметра плавно изменяются от нуля (когда зонд касается опорного электрода) до максимума, равного напряжению

источника питания (когда зонд касается второго электрода). На изображениях электродов написать их потенциалы.

7. Найти точку с первым заданным вам потенциалом φ_1 . Отметить на чертеже ее положение. Переместить зонд на 1–2 см так, чтобы потенциал оставался равным φ_1 . Снова отметить положение точки на чертеже. Дальнейшие измерения проводятся аналогично. В результате вы должны получить ряд точек, опоясывающих по возможности большую поверхность опорного электрода.

8. Провести через найденные точки плавную кривую. Это будет эквипотенциальная линия, соответствующая потенциалу φ_1 . Около нее написать значение потенциала φ_1 .

9. Аналогичные измерения провести для других заданных вам значений потенциала.

10. Выключить лабораторную установку и предъявить результаты измерений преподавателю. Преподаватель должен указать вам 3–4 области, для которых вы рассчитаете напряженность электрического поля.

Обработка результатов измерений

1. По найденным вами эквипотенциальным линиям построить силовые линии электростатического поля. При этом использовать следующие правила:

- силовые линии должны быть направлены в сторону убывания потенциала;
- в точках пересечения силовые и эквипотенциальные линии должны быть взаимно перпендикулярны;
- так как поверхности электродов являются эквипотенциальными, силовые линии должны подходить к ним также перпендикулярно.

Пример построения силовых линий показан на рис. 1.1.1.

2. Для указанных преподавателем областей вычислить модуль средней напряженности электрического поля по формуле

$$E = \frac{|\Delta\varphi|}{\Delta l},$$

где Δl – расстояние между соседними эквипотенциальными линиями в данной области; $|\Delta\varphi|$ – разность потенциалов соседних эквипотенциальных линий.

3. Построить векторы напряженности поля для заданных областей, определив их направление как направление наиболее резкого убывания потенциала. Длина вектора должна быть пропорциональна модулю напряженности.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрический заряд? Назовите его свойства.
2. Что такое напряженность электрического поля? В каких единицах она измеряется? Как вычисляется напряженность поля одиночного точечного заряда?
3. Сформулируйте принцип суперпозиции для напряженности электрического поля. Приведите пример его применения.
4. Что такое силовые линии электрического поля? Каковы правила их построения? Изобразите с помощью силовых линий поле одиночного заряда, электрического диполя.
5. Докажите, что электростатическое поле является потенциальным.
6. Что такое циркуляция и чему она равна для электростатического поля?
7. Дайте определение потенциала электростатического поля. В каких единицах измеряется потенциал? Чему равен потенциал поля одиночного точечного заряда? Сформулируйте принцип суперпозиции для потенциала.
8. Выведите связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля.
9. Что такое эквипотенциальные поверхности? Каково взаимное расположение эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электростатического поля? Изобразите с помощью силовых линий и эквипотенциальных поверхностей однородное и неоднородное поля.
10. В некоторой области пространства создано однородное электростатическое поле. Как изменится поле, если в него поместить проводник?