

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Лабораторная работа № 5

Моделирование электростатических полей

Ярославль
2009

Оглавление

1. Цель работы	3
2. Подготовка к лабораторной работе	3
3. Краткая теория	4
4. Схема экспериментальной установки	8
5. Задание и порядок его выполнения	8
5.1. Последовательность действий при выполнении задания	9

Лабораторная работа № 5

Моделирование электростатических полей

1. Цель работы

1. Изучить один из возможных методов моделирования электростатических полей с помощью электрического поля постоянного тока в слабопроводящей среде.
2. Исследовать на модели структуру электростатического поля заряженных тел различной конфигурации и распределение потенциалов в нем.

2. Подготовка к лабораторной работе

1. Уясните цель и содержание лабораторной работы.
2. Изучите рекомендуемую литературу:
 - С.Г. Калашников “Электричество” М; 1977 г. §§ 13; 14; 19; 20; 26; 54; 62; добавление 2 стр. 526.
 - Настоящее руководство к лабораторной работе.
3. Дайте ответы на контрольные вопросы:
 - Что называется напряженностью и потенциалом электростатического поля?
 - Что называется силовыми линиями и эквипотенциальными поверхностями электрического поля?
 - Каково взаимное расположение силовых линий и эквипотенциальных поверхностей электростатического поля?
 - Теорема Гаусса для электрического поля в интегральной и дифференциальной формах.
 - Дифференциальная связь между напряженностью и потенциалом электрического поля.

-
- Обоснуйте возможность моделирования электростатического поля полем постоянного тока в проводящей среде.
4. Изучите лабораторную установку и назначение ее элементов; ознакомьтесь с приданными к ней измерительными приборами; уясните методику измерений.
 5. Повторите правила техники безопасности.

3. Краткая теория

Электростатическое поле создается совокупностью электрических зарядов, неподвижных в пространстве по отношению к наблюдателю и неизменных во времени.

Основными физическими величинами, характеризующими электростатическое поле, являются напряженность \vec{E} и потенциал φ . Это дифференциальные характеристики поля, отнесенные к каждой его точке.

Электростатическое поле считается определенным, если известен закон изменения \vec{E} или φ во всех точках этого поля.

Вектор \vec{E} это силовая характеристика поля. Она численно равна силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля.

Потенциал φ является энергетической характеристикой поля в каждой его точке. Он численно равен работе, совершаемой силами поля при переносе единичного положительного заряда из данной точки поля с координатой r в точку бесконечно удаленную, потенциал которой считается равным нулю:

$$\varphi = \int_r^{\infty} \vec{E} d\vec{\ell}. \quad (3.1)$$

Под разностью потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ принято понимать величину численно равную работе сил поля при переносе единичного положительного заряда из начальной точки 1 в конкретную точку 2:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{\ell}. \quad (3.2)$$

Потенциал любой точки поля зависит от того, какой точке поля придан нулевой потенциал: то есть потенциал определяется с точностью до постоянной величины. Однако это не имеет существенного значения, так как практически важен не потенциал какой-либо точки поля, а разность потенциалов и производная от потенциала по координатам. Понятно, что в эти величины постоянная не входит.

В электростатическом поле линейный интеграл от напряженности поля, взятый вдоль замкнутого пути, равен нулю. Другими словами циркуляции вектора \vec{E} вдоль любого замкнутого контура равна нулю:

$$\oint \vec{E} d\vec{\ell} = 0. \quad (3.3)$$

Поля, для которых выполняются подобного рода соотношения называются **потенциальными**. В потенциальном поле разность потенциалов зависит только от положения рассматриваемых точек и не зависит от пути, по которому происходит перемещение из одной точки поля в другую:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_a} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (3.4)$$

где q_1 — заряд, создающий поле.

Геометрически структуру электростатического поля можно описать с помощью силовых и эквипотенциальных линий. Эти линии в любой точке поля пересекаются под прямым углом (рис. 3.1).

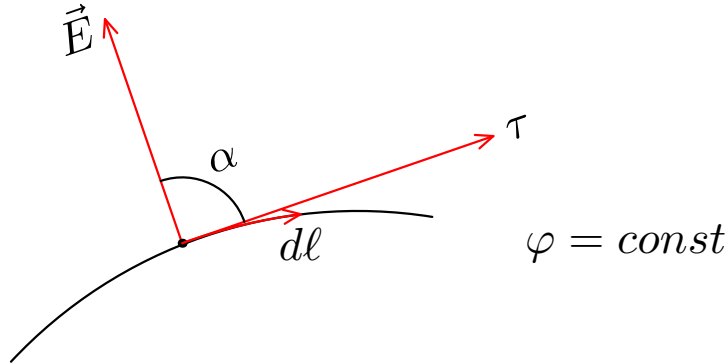


Рис. 3.1

Действительно, вдоль эквипотенциальной линии потенциал не изменяется. Поэтому элементная разность потенциалов:

$$dU = \vec{E} \cdot d\vec{\tau} = 0,$$

где $d\vec{\tau} = \vec{\tau}^\circ dl$; $d\tau = dl$;

$\vec{\tau}^o$ — орткасательной к эквипотенциальной линии.

Скалярное произведение двух векторов равно:

$$\vec{E} \cdot d\vec{\tau} = E d\tau \cos \alpha = 0,$$

где α — угол между векторами \vec{E} и $\vec{\tau}^o$.

Очевидно, что $\vec{E} \neq 0$; $d\tau \neq 0$. Следовательно, $\cos \alpha = 0$.

Поэтому $\alpha = \pi/2$.

Дифференциальная связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля имеет вид:

$$\vec{E} = -grad \varphi = -\nabla \varphi, \quad (3.5)$$

где ∇ — дифференциальный оператор Гамельтона (Оператор Набла). В прямоугольной системе координат он записывается так:

$$\nabla = \vec{x}^o \frac{\partial}{\partial x} + \vec{y}^o \frac{\partial}{\partial y} + \vec{z}^o \frac{\partial}{\partial z}. \quad (3.6)$$

Оператор Набла есть сумма частных производных по трем координатным осям, умноженным на соответствующие орты.

Измерения напряжённости и потенциала электростатических полей связаны с определёнными трудностями, обусловленными теми неизбежными искажениями, которые появляются при использовании вносимых пробных зарядов и попытках измерить точечное значение потенциалов.

Оказалось гораздо удобнее исследовать экспериментально электростатические поля, образованные заряженными телами различной конфигурации на модели другой физической природы. В качестве модели электростатического поля может быть использовано электрическое поле постоянного тока в слабопроводящей среде.

Было показано, что во всех практически интересных случаях электрическое поле тока E (согласно закону Ома плотность тока пропорциональна напряженности электрического поля $\vec{j} = \lambda \vec{E}$) совпадает с электростатическим полем $\vec{E}_{ст}$, т.е. с полем, которое существовало бы между данными электродами, если бы между ними было то же напряжение, что и при наличии тока, а вместо проводящей среды был бы вакуум.

Если нужно определить на опыте эквипотенциальные линии какого-либо двумерного электростатического поля, то изготавливают металлические модели электродов, создающих поля и помещают их в слабопроводящую среду. Модели могут и не совпадать по своим размерам с оригиналами, но должны быть им подобны и подобным образом расположены.

Тогда распределение потенциала между моделями электродов будет подобно распределению потенциалов между действительными электродами и, соответственно, подобным электростатическому полю между телами с такой же разностью потенциалов.

Для измерения потенциала в различных точках среды в них помещают небольшой проводник — зонд, например, в виде металлического штифта. В качестве проводящей среды часто употребляют какой-либо электролит, налитый в достаточно большую ванночку, отчего указанный метод получил название метода электролитической ванны.

Для определения эквипотенциальной линии один из зондов оставляют неподвижным, а другой помещают в разные точки и находят такие, для которых отклонение вольтметра равно нулю. Таким образом определяют одну из эквипотенциальных линий. Поступая подобным образом определяют форму и расположения эквипотенциальных линий электрического поля данных электродов.

Электролитическая ванна имеет ряд преимуществ перед измерением электрическим зондом. То обстоятельство, что внутри электролита текут токи, делает возможным употребление вольтметров и гальванометров, которые гораздо удобнее и надёжнее электрометров. Кроме того, распределение токов и напряжений в ванне нечувствительно к посторонним электростатическим влияниям.

4. Схема экспериментальной установки

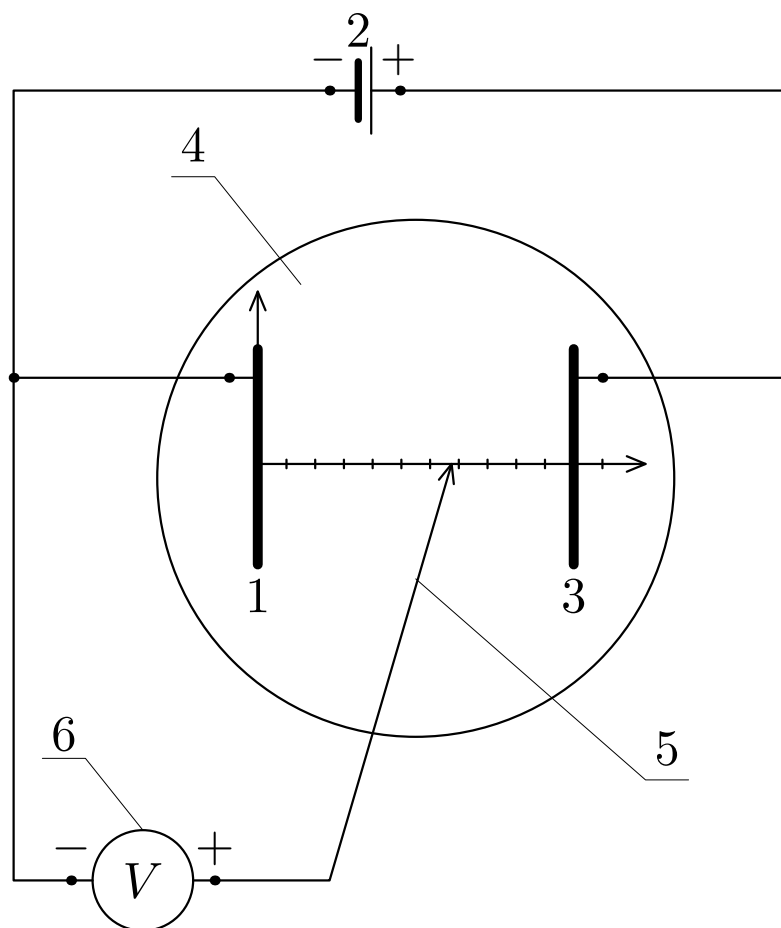


Рис. 4.1.

4 — ванна с водой

1,3 — плоские электроды

2 — источник питания ВС-24

6 — вольтметр постоянного тока ВКС 7-9

5 — металлический стержень — зонд

5. Задание и порядок его выполнения

Задание: Определить электрическое поле при двух различных конфигурациях электродов: 1) электроды представляют из себя плоские параллельные пластины; 2) электроды выполнены в виде концентрично расположенных полых цилиндров.

5.1. Последовательность действий при выполнении задания

1. Собрать лабораторную установку и дать проверить её преподавателю.
2. Включить источник постоянного тока прикоснувшись зондом к плоскому электроду “3” установить на электроде напряжение $+10\text{ В}$ при помощи регулировочного потенциометра на источнике питания и контролируя по вольтметру “6”.
3. Определить потенциалы между двумя электродами вдоль оси X устанавливая зонд в точки в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1

$X_1 = 0 \quad X_3 = 120\text{ мм} \quad U_3 = +10\text{ В}$												
$X\text{ мм}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$U[\text{В}]$												

По данным таблицы 1 построить график распределения потенциалов в междуэлектродном пространстве.

4. Экспериментально снять систему эквипотенциальных линий (линий равных потенциалов) электростатического поля вдоль оси “ Y ”, взяв начальный потенциал в точках $X = 10\text{ мм}$, 60 мм и 110 мм .

Результаты записать в таблицы 2, 3, 4. По данным таблицам 2, 3, 4 построить графики эквипотенциальных полей.

Таблица 2

$X = 10\text{ мм} \quad U =$			
$+Y\text{ мм}$	10	35	50
$X\text{ мм}$			
$-Y\text{ мм}$			
$X\text{ мм}$			

Таблица 3

$X = 60\text{ мм} \quad U =$			
$+Y\text{ мм}$	10	35	50
$X\text{ мм}$			
$-Y\text{ мм}$			
$X\text{ мм}$			

Таблица 4

$X = 110\text{ мм} \quad U =$			
$+Y\text{ мм}$	10	35	50
$X\text{ мм}$			
$-Y\text{ мм}$			
$X\text{ мм}$			

5. Экспериментально снять систему эквипотенциальных окружностей. Для этого установить два цилиндрических электрода. Электрод большего диаметра присоединить к держателю “3” и подать на него $+10\text{ В}$, аналогично пункту 2. Электрод меньшего диаметра подключить к клемме источника “-”.
6. Установить зонд 5 в точку с координатами $Y = 0\ X = 65\text{ мм}$ и определить и записать напряжение в этой точке. Установить зонд на оси $Y = 30\text{ мм}$ перемещая зонд найти напряжение равное ранее замеренному на оси $X = 65\text{ мм}$. Записать координату “X”.
 - Установить зонд на оси $Y = 45\text{ мм}$ и перемещая зонд найти напряжение равное ранее замеренному на оси $X = 65$. Записать координаты оси X.
 - Установить зонд на оси Y ($X = 0$) и найти напряжение ранее измеренное на оси $X = 65$.
 - Аналогичные измерения произвести во II, III и IV квадрате.
7. Установить зонд в точку с координатами $Y = 0\ X = 80\text{ мм}$ и произвести измерения аналогичные п. 6.
8. Результаты всех измерений свести в таблицу 5, 6.

Таблица 5

$X = 65\text{ мм}$ $Y = 0$	Y мм	+30	+45		+45	+30	0	-30	-45		-45	-30
$U = [B]$	X мм	+	+	0	-	-	-	-	-	0	+	+

Таблица 6

$X = 80\text{ мм}$ $Y = 0$	Y мм	+30	+45		+45	+30	0	-30	-45		-45	-30
$U = [B]$	X мм	+	+	0	-	-	-	-	-	0	+	+