

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(СИБСТРИН)

Кафедра физики

**ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ.
ИЗУЧЕНИЕ ПРАВИЛ КИРХГОФА**

Методические указания
по выполнению лабораторных работ № 21 и № 24
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
08.03.01 «Строительство» всех форм обучения

НОВОСИБИРСК 2018

Методические указания разработаны канд. техн. наук, доцентом
Е.П. Матусом

Утверждены учебно-методической комиссией
инженерно-экологического факультета
5 марта 2018 года

Рецензент:

- М.С. Соппа, д-р физ.-мат. наук,
профессор кафедры физики НГАСУ (Сибстрин)

© Новосибирский государственный
архитектурно-строительный
университет (Сибстрин), 2018

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Титульная страница отчета о любой лабораторной работе должна содержать: название вуза, кафедры, лабораторной работы; Ф.И.О. студента, № группы; место для отметки преподавателя; дату и место проведения. Отчет о лабораторной работе должен включать: краткую схему установки с ее описанием, порядок выполнения работы, расчетные формулы, исходные и экспериментальные данные, пример расчета, расчет погрешностей, ответы на контрольные вопросы. Допускается выполнять отчет на специальном бланке.

Лабораторная работа № 21 ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: изучение характеристик электростатических полей различных конфигураций.

Приборы и принадлежности: пластмассовая ванна с координатной сеткой на дне, металлические электроды различной конфигурации, вольтметр постоянного тока (0÷15 В), источник постоянного тока, водный раствор слабого электролита.

Теоретическое введение и методика исследования

Электрический заряд или система зарядов создают в окружающем пространстве электромагнитное поле. Если заряды неподвижны, то создаваемое ими поле проявляет только электрические свойства. Такое поле называется электростатическим – его свойства в каждой точке пространства остаются постоянными во времени. Для того чтобы количественно описать это поле, вводятся характеристики: напряженность и потенциал электрического поля.

Напряженность $\vec{E}$ является силовой характеристикой электрического поля. Она равна силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}(r)}{q}. \quad (1.1)$$

Зная напряженность поля, можно определить величину и направление силы, действующей на заряд q , помещенный в данную точку: $\vec{F} = q\vec{E}$.

Потенциал является энергетической характеристикой электрического поля. Его физический смысл заключается в том, что он равен работе A_∞ , которую необходимо совершить внешним силам, чтобы переместить единичный положительный заряд из бесконечности (или начала отсчета) в данную точку поля:

$$\varphi(r) = \frac{A_\infty}{q} \text{ [В]}. \quad (1.2)$$

Зная эту характеристику, можно определить величину работы, совершаемой электрическим полем при перемещении заряда из одной точки в другую: $A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$. Так как величину работы можно выразить через силу и перемещение, то, следовательно, потенциал φ и напряженность $\vec{E}$ электрического поля связаны друг с другом – напряженность электрического поля равна градиенту потенциала, взятому с обратным знаком:

$$\vec{E} = -\text{grad}(\varphi) = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right). \quad (1.3)$$

Градиент потенциала характеризует быстроту изменения потенциала в пространстве и направлен в сторону наибольшего возрастания. Он представляет собой вектор с координатами, равными частным производным потенциала по соответствующей координате пространства.

Электростатическое поле может быть наглядно представлено с помощью силовых линий и эквипотенциальных поверхностей.

Силовой линией или линией напряженности электрического поля называется линия, в каждой точке которой касательная совпадает с направлением вектора напряженности (рис. 1.1).

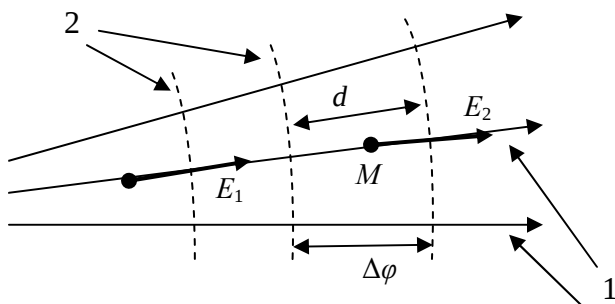


Рис. 1.1. Графическое изображение поля:
1 – силовые линии; 2 – эквипотенциальные поверхности

Эквипотенциальной поверхностью называется поверхность, в каждой точке которой потенциал имеет одно и то же значение, т.е. это поверхности равного потенциала $\varphi = \text{const}$. В плоскости чертежа сечение эквипотенциальной поверхности представляется в виде эквипотенциальной линии (пунктирные линии на рис. 1.1).

Из связи между напряженностью и потенциалом (1.3) следует, что силовые линии перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. Поэтому, зная расположение одних линий (например, эквипотенциальных), можно построить другие (например, силовые линии), что и используется при изучении полей.

Необходимо отметить следующие правила изображения электростатических полей: силовые линии начинаются на положительных зарядах и кончаются на отрицательных, или уходят в бесконечность, или приходят из бесконечности (на отрицательные заряды). Густота проведения силовых линий определяется величиной напряженности электрического поля: линии проводятся гуще в местах, где напряженность поля увеличивается, и реже – где уменьшается. Так, на рис. 1.1 в левой части силовые линии идут гуще; следовательно, в этом месте напряженность поля больше, чем в правой части, где силовые линии расположены реже ($E_1 > E_2$).

Если эквипотенциальные поверхности (линии) провести таким образом, чтобы разность потенциалов между соседними поверхностями $\Delta\varphi$ была одной и той же, то автоматически получится, что расположение эквипотенциальных поверхностей будет гуще в области сильного поля и реже – в области слабого.

По известному расположению эквипотенциальных поверхностей и величинам потенциалов на них можно, используя формулу (1.3), оценить величину напряженности электрического поля в любой точке M , лежащей посередине между соседними эквипотенциальными поверхностями (см. рис. 1.1):

$$E = \frac{\Delta\varphi}{d}, \quad (1.4)$$

где d – длина отрезка между поверхностями, проходящего через точку M ;

$\Delta\varphi$ – разность потенциалов между поверхностями.

Значения E и φ , а также форма и расположение силовых линий и эквипотенциальных поверхностей зависят от величин зарядов и их расположения в пространстве. Для заряженных тел правильной геометрической формы (стержней, пластин, сфер и т.д.) расчет создаваемых ими электрических полей можно провести по формулам, известным из курса электростатики.

В других случаях, когда заряженные тела имеют сложную конфигурацию (например, электроды в электровакуумных приборах) и электрическое поле рассчитать трудно, прибегают к экспериментальному методу изучения электрических полей – моделирование на специальных установках.

В данной лабораторной установке для моделирования электростатических полей использована пластмассовая ванна, на дно которой наливается жидкость, обладающая слабой электропроводностью, и укреплены электроды заданной формы (рис. 1.2). На электроды от источника питания подается напряжение. Приняв за начало отсчета ($\varphi_0 = 0$) потенциал отрицательного электрода, при помощи вольтметра 3 с щупом 4 можно определить потенциал в любой точке налитой жидкости. Тем самым появ-

ляется возможность найти точки с одинаковым потенциалом. Зная координаты этих точек, можно вычертить эквипотенциальную поверхность (линию). Для этой цели на дне ванны нанесена координатная сетка. Таким образом, можно построить семейство эквипотенциальных поверхностей во всем пространстве между электродами и вокруг них.

При помещении в жидкость между электродами предмета из сильно проводящего материала (например, металлическое кольцо), свободные заряды на нем под действием поля перераспределятся так, что потенциал в проводнике станет одинаковым во всех его точках. Это приведет к изменению картины эквипотенциальных поверхностей во всей жидкости, что также можно определить в лабораторной работе.

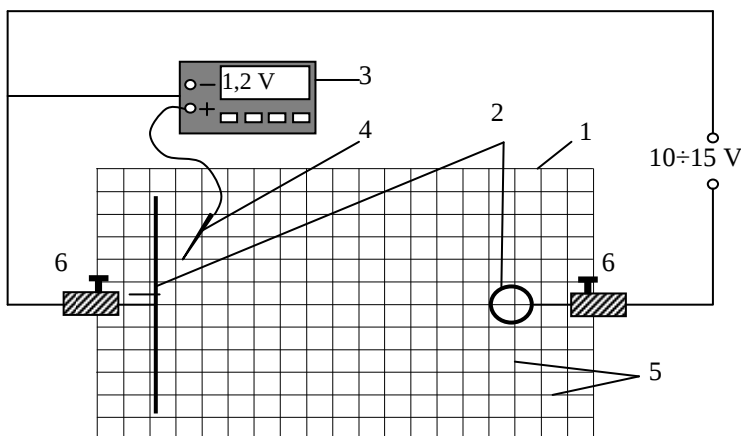


Рис. 1.2. Схема установки:

- 1 – ванна со слабоводящей жидкостью;
- 2 – электроды; 3 – вольтметр; 4 – щуп; 5 – координатная сетка; 6 – держатели контактов

Описанный метод будет тем точнее моделировать электростатическое поле, чем меньше проводимость раствора (электролита). Увеличение проводимости означает увеличение в раство-

ре (электролите) числа заряженных частиц – ионов. Вследствие этого при включении напряжения между электродами ионы начнут двигаться от одного электрода к другому, в результате картина силовых линий изменится и не будет соответствовать электростатическому случаю.

Метод моделирования электростатических полей может быть использован при изучении других физических явлений. Так, например, явление теплопроводности аналогично явлению электропроводности. Уравнения, описывающие эти явления, идентичны: градиенту потенциала соответствует градиент температуры; проводимости среды соответствует коэффициент теплопроводности. Следовательно, эквипотенциальным поверхностям будут соответствовать изотермы, силовым линиям – линии тепловых потоков. Таким образом, метод моделирования электростатических полей может применяться в решении весьма сложных прикладных задач по теплораспределению в зданиях и теплозащитных конструкциях.

Порядок выполнения работы

1. На отдельном листе с координатной сеткой в масштабе 1:2 изобразить границы ванны. Указать на ней расположение электродов.
2. Включить источник питания, вольтметр и измерить разность потенциалов U между электродами. Выбрать величину шага, через который будут отыскиваться эквипотенциальные поверхности (линии) в виде $\Delta\varphi_0 = U/n$, где $n = 6 \div 10$. Тогда $\varphi_1 = \Delta\varphi_0$, $\varphi_2 = 2\Delta\varphi_0$, ..., $\varphi_{n-1} = (n-1)\Delta\varphi_0$.
3. Отступив несколько от центра электрода с $\varphi_0 = 0$, измерительным щупом найти точку, где потенциал равен величине φ_1 . Отметить эту точку на координатной сетке заготовленного листа бумаги.
4. Перемещая щуп сначала к одному, а затем к другому краю ванны, найти еще 5–8 точек с тем же потенциалом φ_1 (использовать всю ширину ванны). Перенести координаты этих точек на заготовленный чертеж и соединить их плав-

ной линией – тем самым получится изображение эквипотенциальной линии. Записать значение потенциала этой линии.

5. Двигаясь к правому электроду и используя методику, аналогичную изложенной в пунктах 3, 4, найти и изобразить на чертеже все оставшиеся эквипотенциальные поверхности (линии) $\varphi_2, \dots, \varphi_{n-1}$.
6. На полученном чертеже построить силовые линии, используя свойство их ортогональности к эквипотенциальным поверхностям и правила, изложенные в методике.
7. Положить в ванну металлическое кольцо, зарисовать его на втором чертеже и повторить задания по пунктам 3–6.
8. Сравнить конфигурации полученных полей и дать им объяснение.
9. В 2–3-х точках приближенно вычислить напряженность поля, используя формулу (1.4).

Контрольные вопросы

1. Какие поля называют электростатическими?
2. Дать определение напряженности электростатического поля. Что называется силовой линией поля?
3. Дать определение потенциала, эквипотенциальной поверхности.
4. Сформулировать закон Кулона.
5. В чем состоит принцип суперпозиции электрических полей?
6. Построить картину силовых и эквипотенциальных линий системы двух точечных разноименных зарядов, одноименных зарядов.
7. Что называется потоком электростатического поля? Сформулировать теорему Гаусса. Как определить напряженность поля, создаваемого точечным зарядом, заряженной сферой, плоскостью?
8. Как связаны напряженность и потенциал электрического поля?
9. Докажите, что силовые линии перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

10. Что такое проводник? Каково условие равновесия зарядов в проводнике? Чему равна и как направлена напряженность поля вблизи поверхности проводника?
11. Что такое емкость уединенного проводника? Как найти энергию поля заряженного проводника?
12. Почему распределение потенциалов в поле между электродами изменяется при помещении в него проводника?

Лабораторная работа № 24 **ИЗУЧЕНИЕ ПРАВИЛ (ЗАКОНОВ) КИРХГОФА**

Цель работы: освоение законов Кирхгофа, их экспериментальная проверка и практическое применение.

Приборы и принадлежности: разветвленная электрическая цепь с вольтметром, омметром (мультиметром) и источниками постоянного тока.

Теоретическое введение

На практике часто приходится рассчитывать сложные (разветвленные) цепи постоянного тока, например по заданным сопротивлениям участков цепи и приложенным к ним электродвижущим силам (ЭДС) находить силы токов во всех участках. Эта задача решается с помощью двух законов Кирхгофа. Один из них выражает закон сохранения заряда, другой является следствием закона Ома.

Первый закон Кирхгофа. В каждом узле (точке разветвления проводов) алгебраическая сумма сил токов равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0, \quad (2.1)$$

где n – число токов I_i , приходящих в узел или выходящих из него.

Второй закон Кирхгофа. В любом замкнутом контуре разветвленной электрической цепи алгебраическая сумма падений напряжений (произведений сил токов в отдельных участках этого контура на их сопротивления) равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \mathcal{E}_k, \quad (2.2)$$

где n – число участков с известными сопротивлениями, на которые разбивается данный контур;

m – число источников тока, входящих в контур.

Правило знаков при записи законов Кирхгофа:

1. Токам, входящим в узел, приписывать положительный знак, выходящим – отрицательный.

Например, для узла 1 на рис. 2.1 первый закон Кирхгофа запишется в виде:

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0.$$

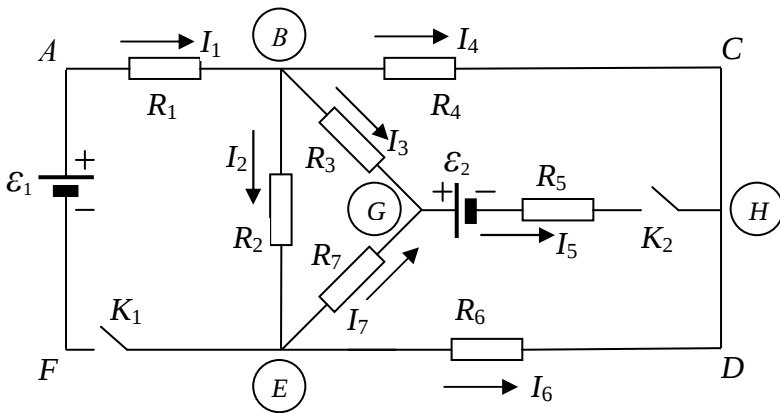


Рис. 2.1. Пример разветвленной цепи

2. При записи второго закона выбирают произвольное направление обхода контура (по или против часовой стрелки). Если направление тока I_K в участке контура совпадает с направлением обхода, то произведение $I_i R_i$ берется со знаком плюс, если оно противоположно – со знаком минус. Если по обходу контура источник тока повышает потенциал, то его ЭДС считают положительной, в противном случае ее надо считать отрицательной. Например, для контура $ABEFA$ на рис. 2.1 второй закон

Кирхгофа запишется следующим образом (обход по часовой стрелке):

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = \mathcal{E}_1.$$

3. Если направление токов в разветвленной цепи неизвестно, то их расставляют произвольным образом. При решении уравнений, составленных по указанным выше правилам, ток получается положительным, если его направление указано правильно, и отрицательным, если неправильно.

Описание установки

Установка для экспериментальной проверки законов Кирхгофа представляет собой стенд (рис. 2.2), на вертикальной панели которого смонтирована разветвленная электрическая цепь.

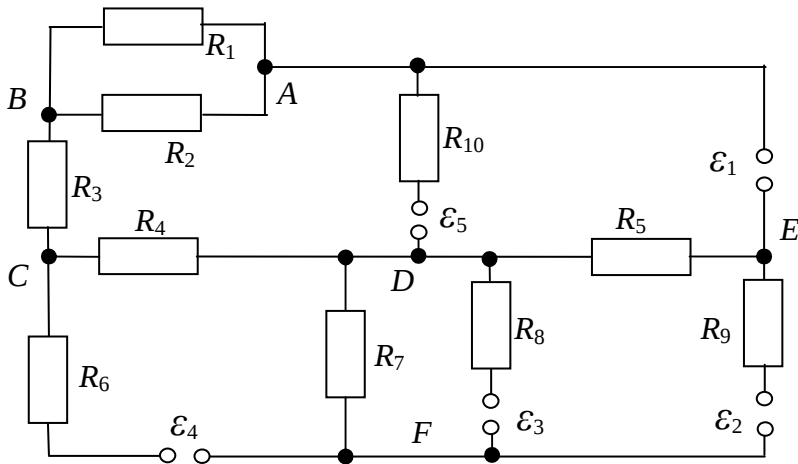


Рис. 2.2. Схема цепи в лабораторной работе

Контакты резисторов, выполняющих функцию участков электрической цепи, и контакты источников тока выполнены в виде металлических штырьков-цилиндров, которые находятся на лицевой стороне стенда. Возле схемы располагаются тумблеры включения тока. На стенде также установлен мультиметр для измерения сопротивления и напряжения.

Порядок выполнения работы

1. Поставить все тумблеры в положение «выкл».
2. Переключить мультиметр в режим измерения сопротивления 20 К (до 20 кОм = 20 000 Ом).
3. Присоединяя контакты прибора к выведенным на стенде контактам резисторов, измерить сопротивления всех резисторов цепи (рис. 2.3). Показания занести в таблицу.

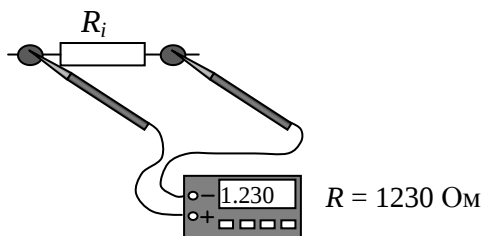


Рис. 2.3. Пример присоединения клемм мультиметра

4. Переключить мультиметр в режим измерения постоянного напряжения 20 DCV (до 20 В).
5. Измерить значения ЭДС на всех источниках тока, присоединяя контакты последовательно к выводам каждого источника тока. Если на экране прибора возникает знак «-», то щупы нужно поменять местами (чтобы «+» измерительного прибора совпал с «+» на схеме). Показания занести в таблицу. На схеме отметить полярность «+» и «-».
6. Оставив вольтметр в положении измерения постоянного напряжения U , перевести все ключи в положение «вкл».
7. Измерить напряжения на всех сопротивлениях. Если на экране вольтметра возникает знак «-», то щупы нужно поменять местами. Показания занести в таблицу. На схеме отметить полярность «+» и «-» (ток через сопротивление идет в сторону уменьшения потенциала).
8. Рассчитать значения сил токов в каждом участке цепи по формуле $I = \frac{U}{R}$, занести данные в таблицу.
9. Для трех выбранных узлов записать и проверить выполнение первого закона Кирхгофа.

10. Для трех выбранных контуров записать и проверить выполнение второго закона Кирхгофа.

№ п/п	R , кОм (10^3 Ом)	ЭДС ($\mathcal{E}$), В	U , В	I , мА (10^{-3} А)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим током? Током проводимости? Каковы условия возникновения и существования тока?
2. Дайте определение силы и плотности тока. Что принято за направление тока?
3. Что такое сторонние силы? Каков физический смысл ЭДС, напряжения? Запишите законы Ома для однородного и неоднородного участков цепи, для замкнутой цепи.
4. Запишите зависимость сопротивления от размера проводника, температуры. Нарисуйте схемы различных видов соединений проводников.
5. Сделайте вывод закона Ома в дифференциальной форме.
6. Сформулируйте правила Кирхгофа и объясните расстановку знаков в уравнениях.
7. Сформулируйте закон Джоуля–Ленца в интегральной и дифференциальной формах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – Москва : Академия, 2008. – 559 с.
2. Матус, Е. П. Краткий курс общей физики / Е. П. Матус. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2015. – 146 с.

Составитель

Евгений Петрович Матус

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ.
ИЗУЧЕНИЕ ПРАВИЛ КИРХГОФА

Методические указания
по выполнению лабораторных работ № 21 и № 24
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
08.03.01 «Строительство» всех форм обучения

Редактор Е.Л. Корецкая

Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет (Сибстрин)
630008, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113
