

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ



Уфа 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

*Допущено Редакционно-издательским советом УГАТУ
в качестве лабораторного практикума для студентов
очной и заочной форм обучения, обучающихся
по всем направлениям подготовки и специальностям*

Учебное электронное издание сетевого доступа

© УГАТУ
ISBN 978-5-4221-1549-5

Уфа 2021

Авторы-составители: Е. В. Трофимова, Е. А. Саркеева

Рецензенты:

старший преподаватель физико-технического института БашГУ

Р. Р. Шафеев;

старший научный сотрудник Института проблем

сверхпластичности металлов РАН канд. техн. наук А. Х. Ахунова

Физические процессы в электрических цепях : лабораторный практикум [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т ; [авт.-сост. : Е. В. Трофимова, Е. А. Саркеева]. – Уфа : УГАТУ, 2021. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2021-159.pdf

Знакомит студентов с основными законами электростатики, стационарного и квазистационарного тока. Приведены методические рекомендации к лабораторным работам в лаборатории «Электричество» УГАТУ.

Предназначен для студентов, изучающих дисциплину «Физика» (раздел «Электричество и магнетизм»).

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Авторы-составители: *Трофимова Евгения Владимировна*
Саркеева Елена Александровна

Редактирование и верстка: *Л. А. Вяземская*
Программирование и компьютерный дизайн: *М. В. Южакова*

Подписано к использованию: 24.12.2021

Объем: 3.53 Мб.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.
Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: rik@ugatu.su

Все права на размножение, распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование, использование данного продукта запрещено.

Введение

Практикум содержит методические рекомендации по выполнению лабораторных работ в лаборатории «Электричество». В теоретических частях каждой лабораторной работы сведены основные понятия и законы электростатики, стационарного и квазистационарного электрического тока в металлах и некоторых других средах. В описаниях методов измерения показано, как теоретические основы применяются для определения экспериментальным путем конкретных величин.

В результате выполнения лабораторных работ студенты приобретают умения:

- демонстрировать базовые знания в области общенаучных дисциплин и готовность использовать основные законы в профессиональной деятельности;
- проводить эксперименты по заданной методике, обработку результатов, оценку погрешности и достоверности результатов опыта.

Также формируются навыки:

- работать с измерительными приборами;
- рассчитывать физические величины по экспериментальным данным;
- анализировать результаты опыта;
- оформлять отчет.

Лабораторная работа № 31

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1. Цель работы

Экспериментальное исследование электростатического поля и изображение его при помощи силовых линий и сечений эквипотенциальных поверхностей (линий равного потенциала).

2. Задачи

1. Усвоение теоретических основ электростатики.
2. Приобретение навыков правильной эксплуатации электроизмерительных приборов.
3. Приобретение навыков изображения результатов исследования в графическом виде.

3. Теоретическая часть

Все тела в природе способны электризоваться, т. е. приобретать электрический заряд. Наличие электрического заряда проявляется в том, что заряженное тело взаимодействует с другими заряженными телами. Электрический заряд называется точечным, если он сосредоточен в теле, размеры которого малы по сравнению с расстоянием до других тел.

Опыт показывает, что сила взаимодействия между двумя точечными зарядами по модулю прямо пропорциональна величинам зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Она направлена вдоль прямой, соединяющей заряды, и является силой притяжения в случае разноименных и силой отталкивания – в случае одноименных зарядов (рис. 3.1).

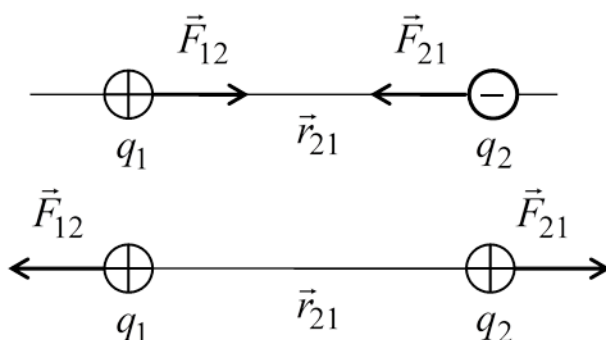


Рис. 3.1. Взаимодействие электрических зарядов

Эта сила носит название закона Кулона и записывается в виде формулы

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (3.1)$$

Коэффициент k зависит от выбора системы единиц измерения. В системе СИ единицей заряда является 1 Кл (кулон). Сила измеряется в ньютонах, расстояние – в метрах. Для согласования единиц измерения с результатами опытов коэффициент k в системе СИ должен быть равен $9 \cdot 10^9$ Н·м²/Кл². Этот коэффициент часто представляют в виде $k = 1/(4\pi\epsilon_0)$, где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, величина ϵ_0 называется *электрической постоянной*.

Взаимодействие между покоящимися зарядами осуществляется через электрическое поле. Всякий заряд изменяет свойства окружающего пространства: создает в нем электрическое поле. Поле неподвижных зарядов не меняется со временем и называется электростатическим. Оно проявляет себя в том, что если в некоторую точку пространства поместить пробный электрический заряд, то на него будет действовать сила. Пробным называется настолько малый положительный точечный заряд, чтобы при его внесении в поле можно было пренебречь перераспределением заряда на телах, создающих поле.

Напряженностью электрического поля называют силу, действующую на помещенный в данное поле единичный пробный заряд

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{пр}}}. \quad (3.2)$$

Если поле создано точечным зарядом q_0 , то сила, действующая на пробный заряд $q_{\text{пр}}$, определится из закона Кулона

$$\vec{F} = \frac{q_0 q_{\text{пр}}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad \text{или} \quad \vec{F} = \frac{q_0 q_{\text{пр}}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r}, \quad (3.3)$$

где \vec{F} – сила, действующая на заряд $q_{\text{пр}}$ со стороны заряда q_0 ; \vec{r} – радиус-вектор, проведенный из точки 1, где находится заряд q_0 , в точку 2, где находится заряд $q_{\text{пр}}$ (рис. 3.2).

Из соотношений (3.2) и (3.3) следует, что точечный заряд q_0 создает вокруг себя электрическое поле с напряженностью

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{пр}}} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r}, \quad (3.4)$$

где \vec{r} – радиус-вектор точки пространства, проведенный из точки, в которой находится заряд q_0 (рис. 3.2).

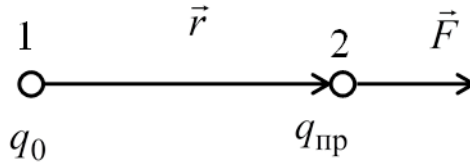


Рис. 3.2. Направление силы, действующей на заряд

Если электрическое поле создается системой зарядов, то напряженность поля в данной точке определяется по принципу суперпозиции

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i = \sum_{i=1}^N \frac{q_i \vec{r}_i}{4\pi\epsilon_0 r_i^3}, \quad (3.5)$$

где q_i – величина заряда с номером i ; \vec{r}_i – радиус-вектор точки, в которой определяется напряженность, проведенный из той точки, где находится заряд q_i .

Для наглядного изображения электрических полей пользуются методом силовых линий. *Силовая линия* есть математическая линия, направление касательной к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора напряженности электрического поля в той же точке. Линии \vec{E} поля точечного заряда представляют собой совокупность радиальных прямых, направленных от заряда, если он положителен, и к заряду, если он отрицателен (рис. 3.3).

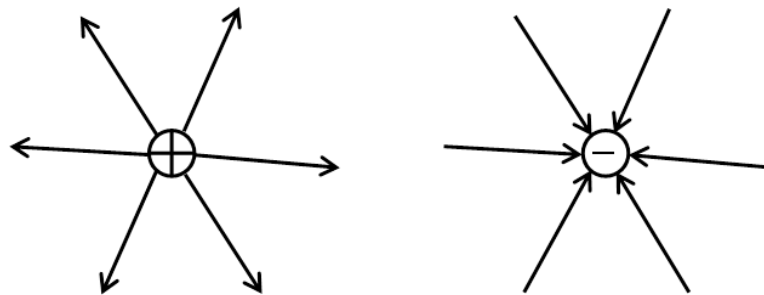


Рис. 3.3. Распределение линий напряженности вокруг точечных зарядов

Работа сил электростатического поля, созданного точечным зарядом q_0 , по перемещению заряда q из точки 1 в точку 2 вычисляется через криволинейный интеграл (все обозначения на рис. 3.4).

$$\begin{aligned}
 A_{12} &= \int_1^2 \vec{F} d\vec{l} = q \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = q \int_1^2 E dl \cos \alpha = \\
 &= q \int_1^2 E dr = q \int_{r_1}^{r_2} \frac{q_0 dr}{4 \pi \epsilon_0 r^2} = \frac{q q_0}{4 \pi \epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

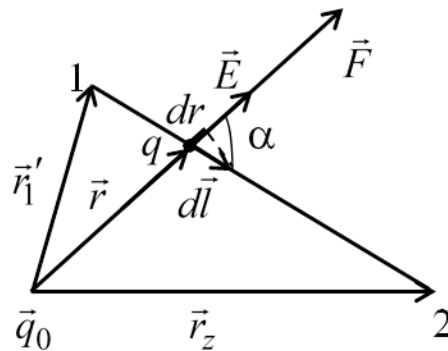


Рис. 3.4. Иллюстрация к вычислению работы сил по перемещению заряда q из точки 1 в точку 2

Из формулы (3.6) следует, что работа сил электростатического поля по перемещению заряда из точки 1 в точку 2 не зависит от формы пути, а зависит лишь от положения начальной (1) и конечной (2) точек. Такое поле называется потенциальным.

Работу, совершаемую силами поля при перемещении единичного положительного заряда по произвольному пути из точки 1 в точку 2, называют *разностью потенциалов*

$$A_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) q.
 \tag{3.7}$$

В теории за *нулевой потенциал* принимается потенциал на бесконечности. Таким образом, *электростатический потенциал* можно определить как работу, совершаемую силами поля, при перемещении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность. Из сравнения формул (3.6) и (3.7) видно,

что потенциал поля точечного заряда q_0 на расстоянии r от него равен

$$\varphi = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Единицей измерения потенциала в системе СИ является 1 вольт: $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/1 Кл}$.

Разность потенциалов между точками 1 и 2 можно выразить через напряженность поля

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q} = \frac{1}{q} \int_1^2 \vec{F} d\vec{l} = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = - \int_2^1 \vec{E} d\vec{l}. \quad (3.8)$$

Напряженность поля можно определить, если известны значения потенциала в каждой точке пространства

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{e}_x - \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{e}_y - \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{e}_z. \quad (3.9)$$

Векторная функция $\vec{\nabla}\varphi$ скалярной величины φ называется ее градиентом. Из соотношения (3.9) следует размерность напряженности электрического поля: в системе СИ единицей напряженности является 1 В/м.

Поверхность в пространстве, во всех точках которой потенциал имеет одно и тоже значение, называется эквипотенциальной (рис. 3.5).

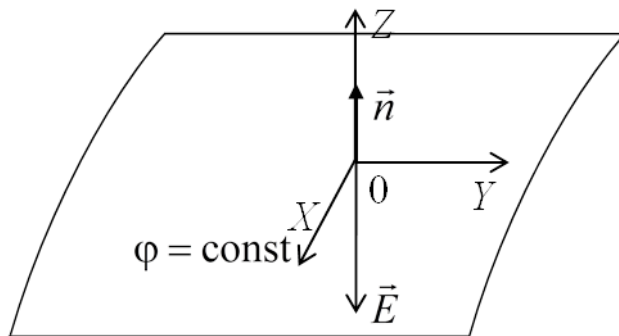


Рис. 3.5. Эквипотенциальная поверхность

На рис. 3.5 оси X и Y являются касательными к эквипотенциальной поверхности $\varphi = \text{const}$. Значит, в направлении осей X и Y потенциал не меняется, а следовательно, производные $\frac{\partial\varphi}{\partial x} = \frac{\partial\varphi}{\partial y} = 0$. Ось Z направлена по нормали \vec{n} к эквипотенциальной поверхности в сторону возрастания величины потенциала. Поскольку

только производная $\frac{\partial\varphi}{\partial z}$ отлична от нуля, то $\vec{\nabla}\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{n}$, и функция φ наиболее быстро возрастает в направлении нормали \vec{n} к эквипотенциальной поверхности.

Вектор $\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi$ направлен в сторону наибольшего убывания потенциала. Силовые линии электростатического поля нормальны к эквипотенциальным поверхностям.

В данной работе предлагается определить положение линий равного потенциала, которые ортогональны (нормальны) силовым линиям поля, и затем построить силовые линии.

В качестве основы изучения распределения потенциала в электростатическом поле часто используется так называемый метод зондов. Его сущность заключается в следующем: в исследуемую точку поля вводится специальный дополнительный электрод-зонд, по возможности так устроенный, чтобы он минимально нарушал своим присутствием исследуемое поле. Этот зонд соединяется проводником с прибором, измеряющим приобретенный зондом в поле потенциал по отношению к какой-нибудь избранной за начало отсчета точке поля. При этом необходимо обеспечить такие условия, чтобы этот зонд принял потенциал той точки поля, в которую он помещен. Только тогда показания прибора, соединенного с зондом, будут давать правильную картину распределения потенциала в исследуемом поле.

Электростатическое поле моделируется электрическим полем стационарных токов. Силовые линии поля совпадают с линиями стационарных токов согласно закону Ома

$$\vec{j} = \sigma\vec{E},$$

где \vec{j} – плотность тока; σ – удельная электропроводность вещества.

Опыт показывает, что электрические заряды, участвующие в стационарном токе, создают в пространстве такие же кулоновские поля, как и неподвижные заряды. Электрическое поле стационарных токов потенциально.

Замена изучения поля неподвижных зарядов изучением поля тока дает возможность применить в качестве зондов металлические электроды, т. к. в проводящей среде автоматически происходит выравнивание потенциала зонда и потенциала данной точки поля.

4. Экспериментальная часть

Измерительная схема представлена на рис. 4.1.

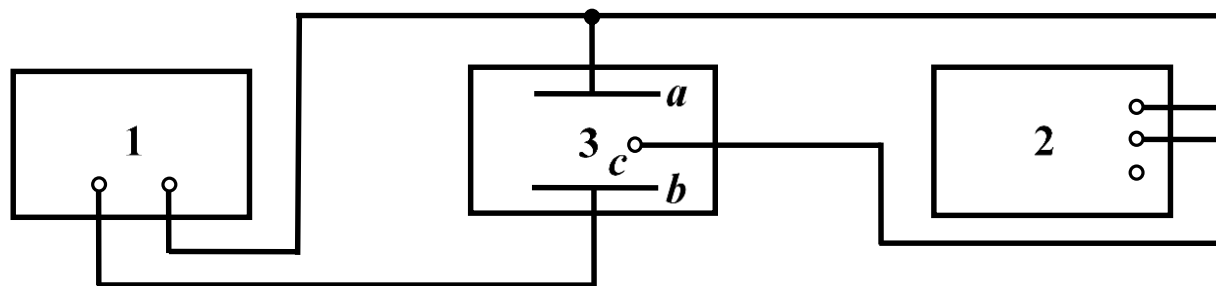


Рис. 4.1. Измерительная схема:

1 – источник питания; 2 – вольтметр; 3 – сосуд; a , b – электроды, между которыми создается разность потенциалов $\Delta\phi$; c – зонд

С помощью зонда измеряется разность потенциалов $\Delta\phi$ между электродом a и точкой, в которую помещен зонд c . Электроды и зонд помещены в ванну с водой. На крышке ванны сделаны прорезы, вдоль которых можно перемещать зонд. По длине каждой прорези нанесены деления с ценой 1 см. Расстояние между прорезями – 3 см.

5. Требования по технике безопасности

Для электропитания лабораторной установки используется сетевое напряжение 220 В. Все токоведущие части установки, кроме соединений проводников с электродами, закрыты, что исключает их случайные касания.

При выполнении работ необходимо:

1. Внимательно ознакомиться с заданием и оборудованием;
2. Визуально проверить целостность изоляции токоведущих проводов;
3. Не оставлять без присмотра включенную лабораторную установку;
4. Не загромождать рабочее место посторонними предметами и оборудованием, не относящимся к выполняемой работе;
5. Держать зонд за изолирующую рукоятку;
6. О замеченных неисправностях немедленно сообщить преподавателю;
7. По окончании работы отключить установку от сети, привести в порядок рабочее место.

6. Задание

Построить распределение потенциала и силовые линии электростатического поля.

7. Методика выполнения заданий

1. Зарисовать в удобном масштабе вид на ванну сверху. Нанести расположения электродов, прорезей и делений.

2. Проведя зонд от одного до другого края прорези в средней части ванны, определить интервал изменения разности потенциалов $\Delta\varphi$ при перемещении зонда. Выбрать из этого интервала 5 значений $\Delta\varphi$ с равным шагом между ними. Рекомендуется выбирать целые или полуцелые значения.

3. Проставить в тетради на рисунке (см. п. 1) координаты точек, соответствующих выбранным значениям $\Delta\varphi$.

4. Соединить линиями точки, соответствующие одинаковым значениям разности потенциалов $\Delta\varphi$. Вы получили линии равного потенциала поля, созданного заряженными пластинами a и b . Линии равного потенциала на поверхности воды в сосуде представляют собой линии пересечения этой поверхности с эквипотенциальными поверхностями электростатического поля между электродами a и b .

5. Построить силовые линии электрического поля, нормальные найденным линиям равного потенциала.

Контрольные вопросы

1. Какое поле называется электростатическим?
2. Каков физический смысл напряженности электростатического поля?
3. Что такое «потенциал электростатического поля»?
4. Как устроен прибор для изучения электростатического поля?
5. Как графически изображаются электростатические поля?
6. Выведите формулу для работы электрического поля по перемещению точечного заряда и с ее помощью сформулируйте условие потенциальности электростатического поля.

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) номер, название и цель работы;
- 2) основные определения из теоретической части;

- 3) схему лабораторной установки;
- 4) графическое изображение линий равного потенциала с указанием значений потенциала на каждой линии и силовых линий электростатического поля с указанием стрелками направления напряженности;
- 5) вывод по результатам работы.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- овладел знаниями о природе и характеристиках электростатического поля;
- правильно выполнил экспериментальную и графическую части работы;
- составил отчет, соответствующий требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М.: Академия, 2014.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Академия, 2014.

Лабораторная работа № 32

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы

Изучение законов постоянного тока и методов измерения сопротивления проводников.

2. Задачи

1. Усвоение законов протекания электрического тока в проводниках.

2. Усвоение теории методов измерения сопротивления проводников.

3. Приобретение навыков правильной эксплуатации электроизмерительных приборов и оборудования современной физической лаборатории, получение результатов измерения сопротивления различными методами.

3. Теоретическая часть

3.1. Электрический ток

Электрическим током называют упорядоченное движение электрических зарядов. Эти заряды называют *носителями тока*. *Линией тока* называют такую линию, направление касательной к которой в каждой точке совпадает с направлением скорости положительных зарядов. За положительное направление тока принято считать направление скорости положительно заряженных частиц.

Для количественной характеристики электрического тока служат две основные величины: плотность тока и сила тока.

Плотность тока есть вектор, направленный по касательной к линии тока, модуль которого численно равен количеству заряда, прошедшего за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению движения носителей

$$\vec{j} = \frac{dq}{dS_{\perp} dt} \vec{\tau}, \quad (3.1)$$

где $\vec{\tau}$ – единичный вектор, касательный к линии тока.

Сила тока в проводнике равна величине заряда, прошедшего за единицу времени через полное сечение проводника,

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (3.2)$$

Зная вектор плотности тока \vec{j} в каждой точке проводника, можно выразить через него силу тока

$$I = \int_S j_n dS, \quad (3.3)$$

где j_n – составляющая вектора \vec{j} , нормальная к элементу поверхности dS .

3.2. Электродвижущая сила. Напряжение

Одним из главных способов возбуждения электрического тока в телах является создание и поддержание в них электрического поля. Электростатические силы всегда переносят положительный заряд от большего к меньшему потенциалу и таким образом понижают больший и повышают меньший, уменьшая разность потенциалов и, соответственно, напряженность поля. Поэтому если бы источниками электрического поля в проводниках были только электрические заряды, то при прохождении тока непрерывно происходила бы убыль зарядов. В связи с этим для поддержания электрического тока необходимы силы неэлектростатического происхождения, называемые сторонними. Полная сила, действующая на носитель тока, включает электрическую и стороннюю силы.

Физическая величина, равная работе сторонних сил по переносу единичного положительного заряда, называется *электродвижущей силой источника тока (ЭДС)*

$$\varepsilon = \frac{A_{ст}}{q}. \quad (3.4)$$

Физическая величина, равная суммарной работе сторонней и электростатической сил по переносу единичного положительного заряда, называется *напряжением*

$$U = \frac{A_{ст} + A_{эл}}{q}. \quad (3.5)$$

В то же время работа электростатических сил по переносу единичного положительного заряда есть разность потенциалов между концами проводника, поэтому

$$U = \varepsilon + (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (3.6)$$

т. е. напряжение между точками 1 и 2 проводника равно сумме ЭДС на данном участке и разности потенциалов между точками 1 и 2. Участок цепи, содержащий ЭДС, называется *неоднородным*.

Если на участке цепи отсутствует источник ЭДС, то участок называется *однородным*, и тогда $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Для замкнутой цепи, когда $\varphi_1 = \varphi_2$, $U = \varepsilon$.

3.3. Законы постоянного тока

3.3.1. Закон Ома. Опыт показывает, что для многих тел в широких пределах сила тока в проводнике пропорциональна напряжению между концами этого проводника. Эта пропорциональность выражает *закон Ома*

$$I = \frac{U}{R}, \quad (3.7)$$

где R – характеристика проводника, называемая *сопротивлением*.

Величина, обратная сопротивлению, $G = \frac{1}{R}$ называется *электропроводностью проводника*: $I = GU$. Для однородного проводника постоянного сечения S сопротивление равно

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.8)$$

где ρ – постоянная для данного материала величина, называемая *удельным сопротивлением*; l – длина проводника.

Для замкнутой цепи закон Ома примет вид

$$I = \frac{\varepsilon}{R}, \quad (3.9)$$

где R – полное сопротивление цепи, включающее внутреннее сопротивление источника тока.

Для однородного участка цепи

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}, \quad (3.10)$$

где R – сопротивление данного участка.

Физическая величина, равная произведению силы тока I , протекающего по проводнику сопротивлением R , и величины этого сопротивления, называется *падением напряжения IR* на сопротивлении. Можно дать другую формулировку закона Ома

$$IR = U, \quad (3.11)$$

падение напряжения на сопротивлении проводника равно напряжению, действующему в этом проводнике.

3.3.2. Закон Джоуля – Ленца. При протекании тока проводник нагревается. Носители тока, ускоренные электрическим полем, при столкновениях с атомами проводника отдают им свою энергию, что приводит к повышению температуры проводника. Закон Джоуля – Ленца позволяет рассчитать количество выделившегося за время dt тепла dQ , если величина тока I остается постоянной в течение этого времени,

$$dQ = I^2 R dt. \quad (3.12)$$

Если же сила тока будет меняться со временем, то количество тепла Q можно рассчитать по формуле

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I^2(t) R(t) dt. \quad (3.13)$$

Величина сопротивления зависит от времени, т. к. с течением времени проводник нагревается, а его сопротивление зависит от температуры.

3.3.3. Правила Кирхгофа. Правила Кирхгофа позволяют рассчитывать токи, протекающие в сложных разветвленных цепях. Первое правило отражает закон сохранения электрического заряда и утверждает, что алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0. \quad (3.14)$$

Токи, входящие в узел и выходящие из него, берутся с противоположными знаками.

Второе правило Кирхгофа отражает закон Ома и формулируется для замкнутого контура в цепи: алгебраическая сумма падений напряжений на всех участках контура равна алгебраической сумме действующих в контуре ЭДС

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i. \quad (3.15)$$

Расчет цепи производят следующим образом:

1. В сложной цепи выделяют узлы и замкнутые контуры. Узлом называется точка цепи, в которой сходится более двух проводников. Замкнутый контур – это часть цепи, переходя по которой от одного элемента к следующему, можно прийти в исходную точку.

2. Произвольно выбирают направление тока через каждый неразветвленный участок цепи.

3. Токам, входящим в узел, приписывают один знак, выходящим – противоположный.

4. Для каждого узла записывают уравнение по первому правилу Кирхгофа (3.14).

5. Произвольно выбирают направление обхода контуров.

6. Для каждого контура записывают уравнение по второму правилу Кирхгофа (3.15).

7. При написании уравнений (3.15) падение напряжения берется со знаком «+», если выбранное направление тока совпадает с направлением обхода контура. ЭДС \mathcal{E}_i берется со знаком «+», если в направлении обхода потенциал повышается (обход от отрицательного к положительному полюсу источника). В противоположных случаях ставится знак «-».

8. При написании уравнений (3.14) и (3.15) необходимо, чтобы каждое следующее уравнение содержало новый элемент цепи.

3.4. Методы измерения сопротивления проводников

3.4.1. Метод амперметра-вольтметра. В электрических цепях, схемы которых приведены на рис. 3.1, с помощью амперметра и вольтметра измеряют, соответственно, силу тока и напряжение на участке цепи, содержащем неизвестное сопротивление R_x .

Считая, что сопротивление амперметра очень мало, а вольтметра – достаточно велико, можно в соответствии с законом Ома найти приближенное значение сопротивления по формуле

$$R_x = \frac{U}{I}, \quad (3.16)$$

где U – показание вольтметра, I – амперметра.

Для точного определения неизвестного сопротивления необходимо учесть собственные сопротивления амперметра и вольтметра.

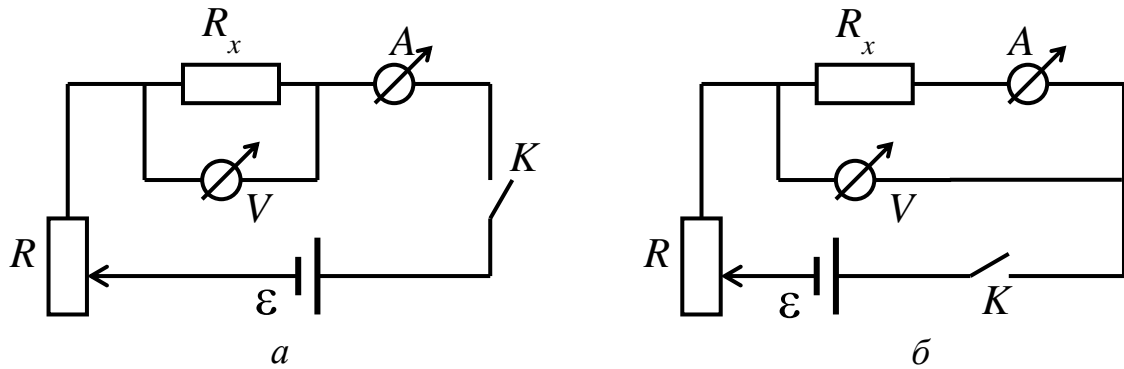


Рис. 3.1. Схемы определения неизвестного сопротивления с использованием амперметра и вольтметра

Рассмотрим схему на рис. 3.1, *a*. Амперметр показывает суммарный ток I , который далее разделяется на два тока: ток I_R , текущий через неизвестное сопротивление R_x , и ток I_V , текущий через вольтметр, сопротивление которого R_V , т. е.

$$I = I_R + I_V. \quad (3.17)$$

Вольтметр показывает напряжение U , равное как падению напряжения $I_R R_x$ на неизвестном сопротивлении, так и падению напряжения $I_V R_V$ на самом вольтметре, т. к. эти элементы цепи подключены параллельно, т. е.

$$U = I_R R_x = I_V R_V. \quad (3.18)$$

Из уравнений (3.17) и (3.18) можно найти неизвестное сопротивление

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}}. \quad (3.19)$$

Если измерения проводят по схеме рис. 3.1, *б*, то ток, регистрируемый амперметром, равен току через неизвестное сопротивление, а вольтметр измеряет суммарное напряжение на измеряемом сопротивлении и на амперметре.

Таким образом,

$$\begin{aligned} U &= I R_x + I R_A, \\ R_x &= \frac{U}{I} - R_A, \end{aligned} \quad (3.20)$$

где R_A – сопротивление амперметра.

3.4.2. Метод компенсации. Другие названия этого метода – метод моста Уитстона или метод уравновешенного моста. Это наиболее точный метод. Он позволяет исключить влияние электроизмерительных приборов на результат измерения.

Рассмотрим этот метод на примере моста Уитстона, схема которого приведена на рис. 3.2. Электрическая цепь состоит из источника питания ε , ключа K , сопротивлений R , R_x , R^* и гальванометра g . Гальванометром называют чувствительный амперметр с нулем посередине, он может измерять токи в двух направлениях.

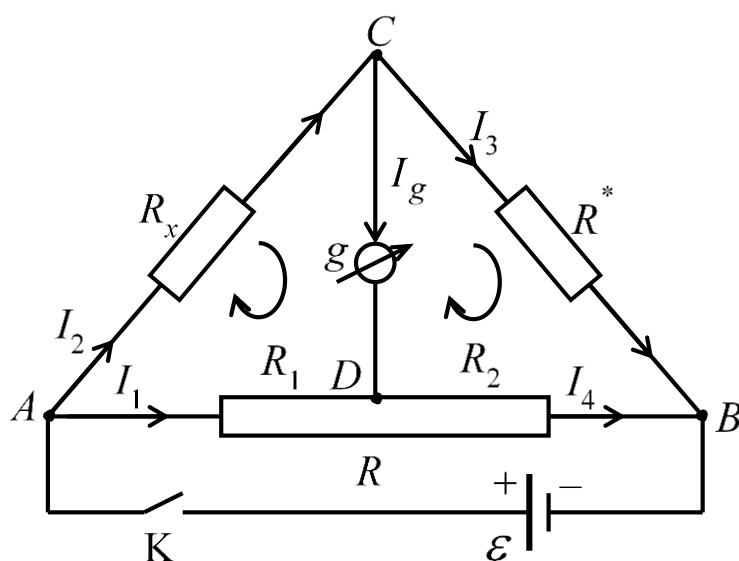


Рис. 3.2. Схема моста Уитстона

Сопротивление R с помощью подвижного контакта D можно делить на две части R_1 и R_2 , величины которых зависят от положения контакта D . Гальванометр включен между точкой D и точкой C – общей для сопротивлений R^* и R_x . При замыкании ключа K ток идет от источника ε к точке A , где он разветвляется на два – I_1 и I_2 . Ток I_2 , дойдя до точки C , снова делится на ток I_3 и ток I_g , протекающий через гальванометр к точке D (допустим, что ток через гальванометр течет от точки C к точке D). Ток I_1 проходит через сопротивление R_1 , в точке D он складывается с током I_g и далее через сопротивление R_2 течет ток I_4 . Показание гальванометра и направление тока через него зависит от соотношения этих токов. Перемещая движок D , можно добиться того, что ток $I_g = 0$, т. е. мост будет уравновешен.

Рассчитать мост Уитстона можно, используя правила Кирхгофа. Рассмотрим узлы C и D и замкнутые контуры $ACDA$ и $CBDC$. Направления токов через сопротивления и направление обхода контуров показаны на рис. 3.2.

Запишем уравнения Кирхгофа для уравновешенного моста Уитстона:

$$\begin{aligned} I_2 - I_3 = 0, \quad I_2 R_x - I_1 R_1 = 0, \\ I_1 - I_4 = 0, \quad I_3 R^* - I_4 R_2 = 0. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Решая систему уравнений, можно найти неизвестную величину

$$R_x = \frac{R^* R_1}{R_2}. \quad (3.22)$$

Формула (3.22) не содержит показаний электроизмерительных приборов, тем самым исключаются ошибки, связанные с их внутренним сопротивлением.

Действительно, поскольку при уравновешенном мосте ток через гальванометр равен нулю, то и напряжение на нем нулевое, и его присутствие не влияет на результат измерения.

4. Экспериментальная часть

Блок-схема лабораторной установки показана на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Блок-схема лабораторной установки

Специальная установка ФПМ 01 (рис. 4.2) состоит из основания 1 с регулируемыми ножками 2, к которому крепится блок питания 3 и стойка 4. На стойке 4 установлены два неподвижных кронштейна 5 и 6, к которым крепится тонкий провод 7. Токосъемный контакт 8 ограничивает длину провода, сопротивление которого измеряется. Длина провода отсчитывается по линейке 9, нанесенной на стойке 4. Цена деления линейки – 1 мм, отсчет берется по положению визирной метки 10. Контакт 8 может свободно перемещаться по стойке 4 при ослабленном винте 11. Переместив контакт 8, винт 11 необходимо снова закрепить.

На лицевой панели блока питания расположена кнопка 12 переключения метода измерения сопротивления: моста или амперметра-вольтметра. Здесь же находятся кнопка 13 для включения схемы (а) или (б) рис. 3.1, вольтметр 14, амперметр 15, регулятор тока 16, тумблер 17 включения установки в сеть и сигнальная лампочка 18. Выходные клеммы 19 служат для подключения измеряемого сопротивления к внешней цепи.

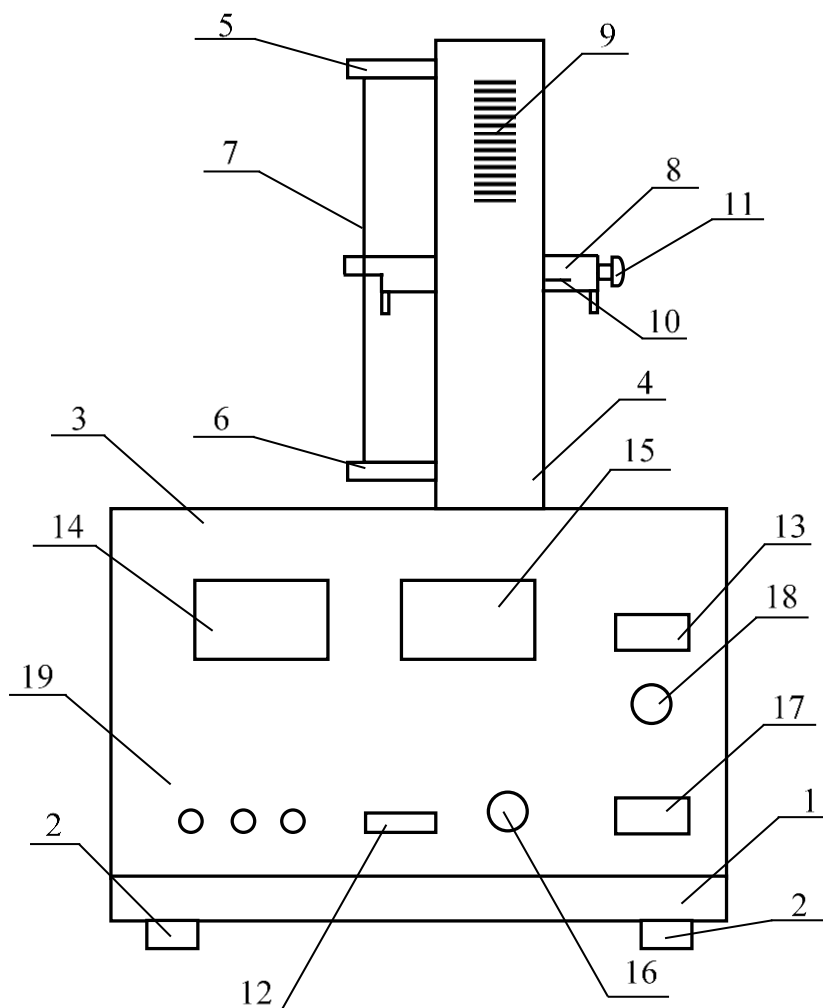


Рис. 4.2. Установка ФПМ 01

Источник питания (рис. 4.1) служит для питания моста постоянного тока. Он подключается к специальным клеммам 1 моста (рис. 4.3). Измеряемое сопротивление подключается к клеммам R_x (5). Переключатель 6 устанавливается в положение «←», означающее питание постоянным током. Переключатель 2 служит для изменения чувствительности гальванометра. Декадный переключатель 3

и ручка 4 служат для уравнивания моста. Результат измеряется по реохорду 5.

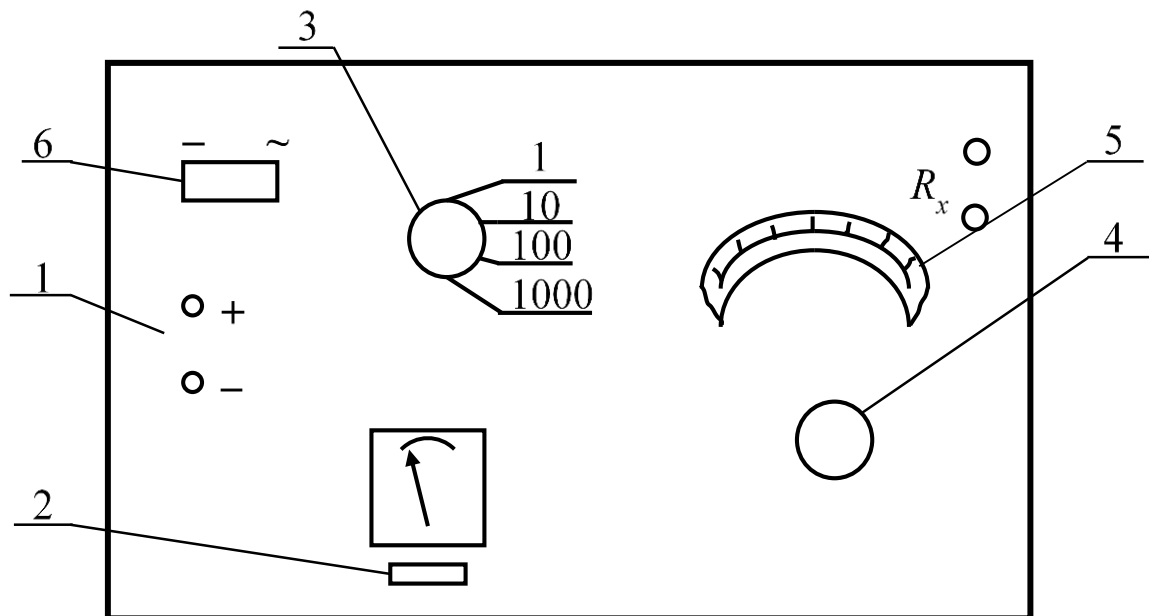


Рис. 4.3. Мост постоянного тока

5. Требования по технике безопасности

Для электропитания лабораторной установки используется сетевое напряжение 220 В. Все токоведущие части установки закрыты, что исключает их случайное касание.

При выполнении работы необходимо:

1. Внимательно ознакомиться с заданием и оборудованием;
2. Визуально проверить целостность изоляции токоведущих проводов;
3. Не оставлять без присмотра включенную лабораторную установку;
4. Не загромождать рабочее место посторонними предметами и оборудованием, не относящимся к выполняемой работе;
5. О замеченных неисправностях немедленно сообщить преподавателю или лаборанту;
6. По окончании работы отключить установку от сети, привести в порядок рабочее место.

6. Задания

1. Измерить неизвестное сопротивление методом компенсации.
2. Определить неизвестное сопротивление методом амперметра-вольтметра.

7. Методика выполнения заданий

Задание 1. Измерение сопротивления методом компенсации

1. Включить тумблеры «СЕТЬ» блока питания установки ФМП 01 и источника питания.
2. Переключатель 12 (рис. 4.2) расположить в положение «мост». Кнопка отжата.
3. Поворотом переключателя 6 (рис. 4.3) в положение (–) подключить в схему моста источник питания.
4. Подключить в цепь моста гальванометр, расположив переключатель 2 (рис. 4.3) в положение «грубо».
5. Заметив отклонение стрелки, изменяя положение переключателя 3 (рис. 4.3), добиться ее отклонения в противоположную сторону. Когда отклонение стрелки гальванометра будет лежать в пределах шкалы прибора или меняться на противоположные при соседних положениях переключателя 3, добиться нулевого показания гальванометра, вращая рукоятку 4 кругового реохорда 5. Тумблер 2 перевести в положение «точно» и снова уравновесить мост. Величина измеряемого сопротивления равна показанию шкалы кругового реохорда 5, умноженному на показание переключателя 3. Записать значение измеренного сопротивления.
6. Отключить гальванометр и питание моста Уитстона. Выключить источник питания.

Задание 2. Определение сопротивления методом амперметра-вольтметра

1. Переключатель 12 (рис. 4.2) на лицевой панели блока питания ФМП 01 установить в положение V-A. Кнопка нажата.
2. Переключатель 13 установить в положение «СХЕМА а» (рис. 3.1, а). Кнопка нажата.
3. Изменяя ручкой «Регулировка тока» величину тока, провести измерения напряжения для пяти различных значений тока. Результаты занести в табл. 7.1.

4. Провести подобные измерения для «СХЕМЫ б» (рис. 3.1, б), для чего переключатель 13 установить в соответствующее положение. Кнопка отжата (рис. 4.2).

5. Отключить блок питания от сети.

6. Рассчитать неизвестное сопротивление по формулам (3.19) для «СХЕМЫ а» или (3.20) для «СХЕМЫ б», приняв $R_V = 19\,750\ \text{Ом}$ и $R_A = 0,29\ \text{Ом}$.

7. Рассчитать относительную ошибку ε полученного значения R , используя класс точности амперметра и вольтметра, указанный на лицевой панели приборов.

8. Рассчитать мощности N_a и N_b , выделяемые на сопротивлении R_x при включении его в цепь по схемам (а) и (б) рис. 3.1. Формулы для расчета величин N_a и N_b вывести самостоятельно.

Таблица 7.1

Схема	№	I	U	U/R_V	U/I	R_x	$\varepsilon, \%$
(а)	1				X		
	2						
	...						
	5						
(б)	1			X			
	2						
	...						
	5						

Контрольные вопросы

1. Что понимается под силой тока, плотностью тока, ЭДС источника и напряжением?

2. Сформулируйте законы Ома и Джоуля – Ленца.

3. Сформулируйте правила Кирхгофа.

4. Почему метод компенсации более точен, чем метод амперметра-вольтметра?

5. Для чего гальванометр, используемый в мосте постоянного тока, имеет двустороннюю шкалу?

6. Докажите справедливость соотношения (3.22).

7. Выведите формулы для расчета мощности, выделяемой на сопротивлении R_x , при его включении в цепь по схемам (а) и (б) рис. 3.1.

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет должен содержать:

- 1) номер, название и цель работы;
- 2) краткий конспект теоретической части, включая расчетные формулы;
- 3) схематическое описание лабораторной установки и метода измерений;
- 4) таблицу с результатами измерений по методу амперметра-вольтметра;
- 5) результат измерений мостовым методом, расчеты мощности выписать отдельно;
- 6) выводы по результатам работы.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- овладел знаниями о законах протекания постоянного электрического тока в проводниках;
- правильно выполнил экспериментальную и расчетную части работы;
- правильно вывел формулы для расчета мощности;
- составил отчет, соответствующий требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М.: Академия, 2014.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Академия, 2014.

Лабораторная работа № 33

ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

1. Цели работы

1. Получение экспериментальной зависимости мощности источника тока от сопротивления нагрузки.
2. Получение экспериментальной зависимости КПД источника тока от сопротивления нагрузки.

2. Задачи

1. Усвоение основных законов постоянного тока.
2. Приобретение навыков проведения физических измерений, умения обработки полученных данных и оценки погрешностей измерений.

3. Теоретическая часть

3.1. Постоянный электрический ток

Электрическим током называется любое упорядоченное направленное движение электрических зарядов. Для возникновения и существования электрического тока необходимо, с одной стороны, наличие свободных носителей тока (заряженных частиц), способных перемещаться, а с другой стороны – наличие электрического поля, под действием которого движение этих частиц упорядочивается. В проводнике под действием приложенного электрического поля электрические заряды перемещаются: положительные – по полю, отрицательные – против поля (рис. 3.1), т. е. в проводнике возникает электрический ток, называемый *током проводимости*. За направление тока принимают направление движения положительных зарядов.

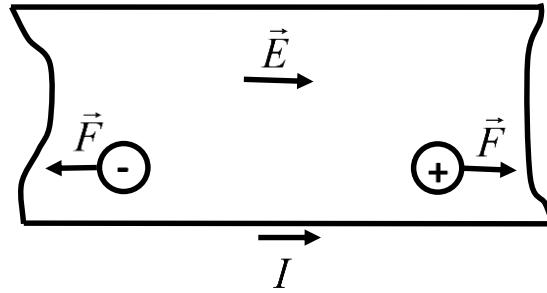


Рис. 3.1. Проводник в электрическом поле

Количественной мерой электрического тока служит сила тока. *Сила тока* – скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника за единицу времени

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (3.1)$$

Если сила тока и его направление не изменяются со временем, то такой ток называется *постоянным* или *стационарным*. Величина постоянного тока определяется по формуле

$$I = \frac{q}{t}, \quad (3.2)$$

где q – электрический заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за время t .

Чтобы в проводнике протекал постоянный электрический ток, необходимо на его концах поддерживать постоянную разность потенциалов. Под действием электрического поля положительные заряды движутся к концу проводника с низким потенциалом, а отрицательные – к концу проводника с высоким потенциалом. Таким образом, если в проводнике действуют только электростатические силы, то при протекании электрического тока разность потенциалов будет убывать. Поэтому необходимы специальные устройства, источники тока, которые поддерживают постоянную разность потенциалов за счет работы внешних сил неэлектростатического происхождения.

Силы неэлектростатического происхождения, действующие на заряды со стороны источников тока, называются *сторонними*. Природа сторонних сил может быть различной (например, в гальванических элементах заряды разделяются в результате химических

реакций между электролитами и электродами, возможно разделение зарядов в магнитном поле и т. п.).

Под действием сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника тока против сил электростатического поля, благодаря чему на концах проводника поддерживается постоянная разность потенциалов и постоянный электрический ток (рис. 3.2).

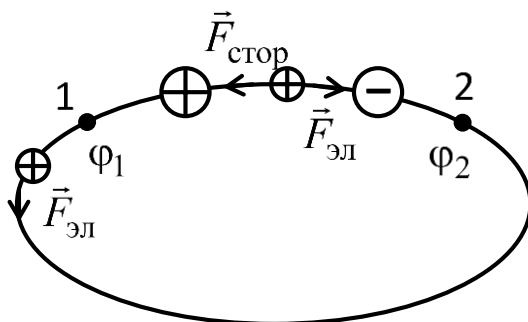


Рис. 3.2. Электрическая цепь с источником сторонних сил

Электродвижущей силой (ЭДС) называется работа сторонних сил по перемещению положительного единичного заряда

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (3.3)$$

Работа сторонних сил над зарядом на участке проводника 1–2 равна

$$A = \int_1^2 \vec{F}_{\text{ст}} d\vec{l} = q \int_1^2 \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}, \quad (3.4)$$

где $E_{\text{ст}}$ – напряженность поля сторонних сил.

Подставив выражение (3.4) в (3.3), получим электродвижущую силу, действующую на участке 1–2 (рис. 3.2)

$$\varepsilon_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}. \quad (3.5)$$

Закон Ома. Опыт показывает, что для многих веществ (в том числе для металлов) в широких пределах имеет место прямая пропорциональная зависимость между силой тока и работой электростатических и сторонних сил, действующих на носители тока

$$I \cdot R = \frac{A_{\text{ст}} + A_{\text{эл}}}{q}, \quad (3.6)$$

где величина $R = \int(\rho dl / S)$ называется электрическим сопротивлением участка 1–2. Здесь ρ – удельное сопротивление; S – площадь поперечного сечения; dl – элемент длины проводника.

Замкнутая цепь. Связь силы тока с ЭДС выражается законом Ома для замкнутой цепи (рис. 3.3)

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (3.7)$$

где $R + r$ – полное сопротивление цепи; R – сопротивление внешней цепи; r – внутреннее сопротивление источника тока.

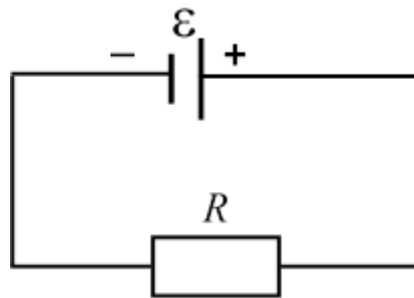


Рис. 3.3. Замкнутая цепь

Неоднородный участок цепи. Неоднородным участком цепи (рис. 3.4) называется участок, на котором действуют сторонние и электростатические силы

$$A_{12} = A_{ст} + A_{эл} = q\varepsilon_{12} + q(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (3.8)$$

где $\varphi_1 - \varphi_2 = A_{эл}/q$ – разность потенциалов на концах участка.

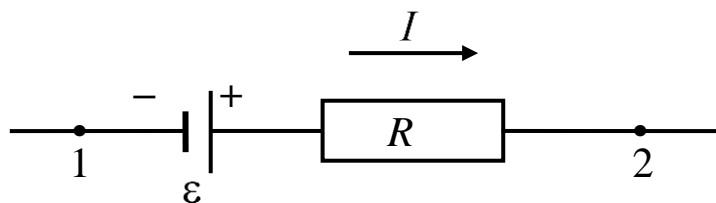


Рис. 3.4. Неоднородный участок цепи

Напряжением на неоднородном участке цепи 1–2 называется физическая величина, определяемая работой электростатических и сторонних сил по перемещению положительного единичного заряда

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12} = IR. \quad (3.9)$$

Однородный участок цепи. Однородным участком цепи (рис. 3.5) называется участок, на котором не действуют сторонние силы, поэтому напряжение на нем равно разности потенциалов на концах.

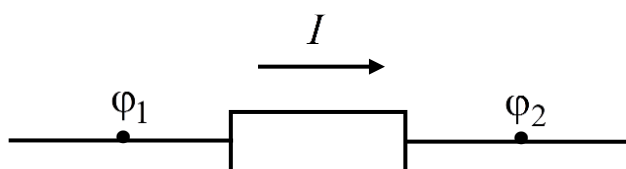


Рис. 3.5. Однородный участок цепи

Закон Ома для однородного участка цепи:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = IR. \quad (3.10)$$

Таким образом, напряжением на однородном участке проводника 1–2 называется физическая величина, определяемая работой электростатических сил по перемещению положительного единичного заряда.

3.2. Мощность тока

В настоящей работе изучаются энергетические характеристики постоянного тока, т. е. те характеристики электрической цепи, которые связаны с выделением энергии в проводниках при протекании электрического тока.

Рассмотрим неоднородный участок цепи постоянного тока, к концам которого приложено напряжение U (рис. 3.4). За время t через каждое сечение проводника проходит заряд

$$q = It. \quad (3.11)$$

Это равносильно тому, что заряд q переносится за время t с одного конца проводника на другой. При этом электростатическое поле и сторонняя сила, действующие на данном участке, совершают работу

$$A = Uq = Ult. \quad (3.12)$$

Подставив в данную формулу выражение (3.8), получим

$$A = ((\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12})It = (I(\varphi_1 - \varphi_2) + I\varepsilon_{12})t. \quad (3.13)$$

Мощностью называется работа электрического тока, произведенная за единицу времени,

$$P = \frac{A}{t}. \quad (3.14)$$

Из выражений (3.13) и (3.14) следует, что мощность, развиваемая током на неоднородном рассматриваемом участке цепи (рис. 3.4), равна

$$P = I(\varphi_1 - \varphi_2) + I\varepsilon_{12}. \quad (3.15)$$

Из выражения (3.15) при $\varphi_1 = \varphi_2$ можно выразить мощность источника тока, которая будет называться полной (затраченной) мощностью

$$P_{\text{полн}} = I\varepsilon. \quad (3.16)$$

С учетом закона Ома (3.7) это выражение можно представить в нескольких эквивалентных формах:

$$P_{\text{полн}} = \varepsilon \frac{\varepsilon}{R + r} = \frac{\varepsilon^2}{R + r}, \quad (3.17)$$

$$P_{\text{полн}} = I(IR + Ir) = I^2R + I^2r. \quad (3.18)$$

Из выражения (3.18) следует

$$P_{\text{полезн}} = P_{\text{полезн}} + P_{\text{потер}}, \quad (3.19)$$

где

$$P_{\text{полезн}} = I^2R, \quad (3.20)$$

$$P_{\text{потер}} = I^2r. \quad (3.21)$$

Мощность $P_{\text{полезн}}$ выделяется во внешней цепи, а $P_{\text{потер}}$ – в источнике тока.

Коэффициентом полезного действия источника тока называется физическая величина, определяемая отношением полезной мощности источника тока к полной мощности

$$\text{КПД} = \frac{P_{\text{полезн}} \cdot 100\%}{P_{\text{полн}}}. \quad (3.22)$$

Если ток проходит по неподвижному проводнику, то вся работа тока идет на нагревание проводника

$$A = Q = UIt = RI^2t, \quad (3.23)$$

где Q – количество теплоты, выделившееся при протекании тока в проводнике за время t .

Выражение (3.23) представляет собой закон Джоуля – Ленца в интегральной форме.

4. Экспериментальная часть

4.1. Физическая основа метода

Рассмотрим цепь постоянного тока. Источник ЭДС создает в цепи ток. Мощность, развиваемая источником тока $P = I\varepsilon$, является полной.

С увеличением внешнего сопротивления от 0 до бесконечности напряжение на нагрузке возрастает от 0 до значения ЭДС, а ток в цепи при этом уменьшается до 0. Полная мощность будет изменяться от максимального значения до 0. Полезная мощность при увеличении R сначала возрастает, а потом убывает.

Максимальное значение полезной мощности достигается при $R = r$ (режим согласования)

$$P_{\text{полезн}}^{\text{max}} = \frac{\varepsilon^2}{4R} = \frac{\varepsilon^2}{4r}. \quad (4.1)$$

Полная мощность в режиме согласования определяется по формуле

$$P = \frac{\varepsilon^2}{2r}, \quad (4.2)$$

а при $R = 0$ полная мощность составляет

$$P = \frac{\varepsilon^2}{r}. \quad (4.3)$$

Напряжение на внешней цепи в режиме согласования равно $\frac{\varepsilon}{2}$, КПД источника равен 0,5.

4.2. Приборы и принадлежности

Блок-схема измерительной установки (рис. 4.1) состоит из источника питания (1), электроизмерительного прибора В7-40 (2) и моста постоянного тока (3), который в данной работе используется в качестве магазина сопротивлений. Чтобы получить сопротивление нагрузки, мост подключается так, как показано на рисунке. Сопротивление нагрузки вычисляется как сумма сопротивлений 10 Ом (при указанном на рисунке соединении) и показания декадных резисторов (магазина сопротивлений).

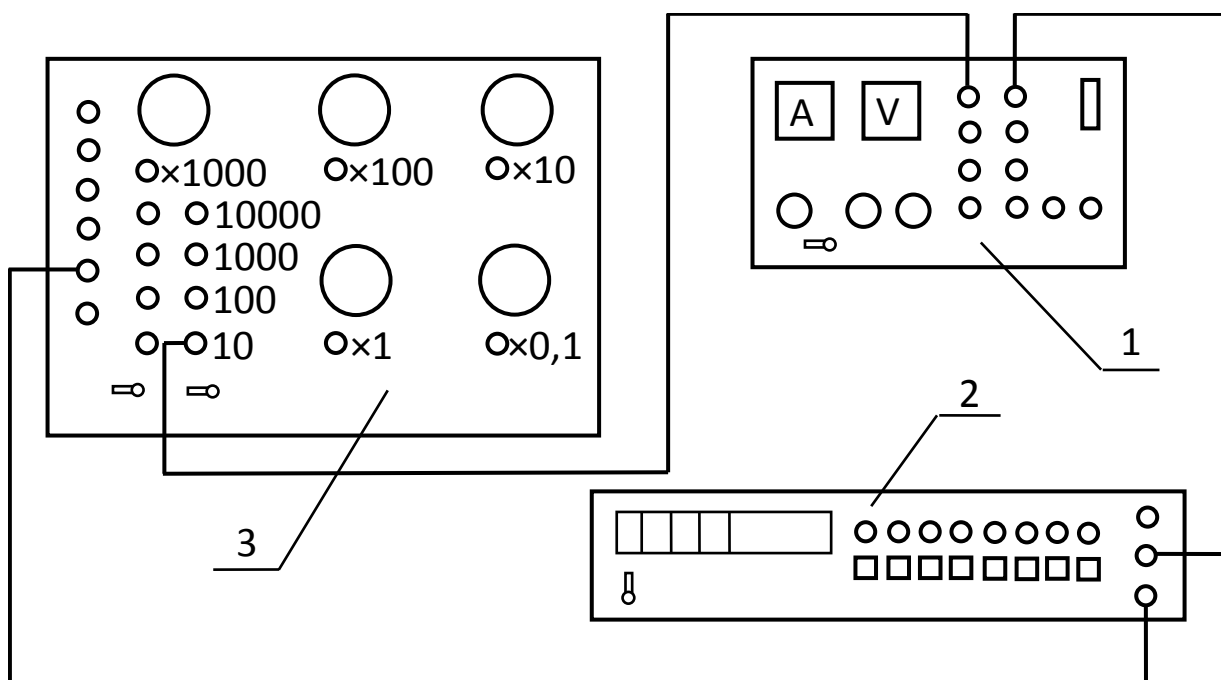


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки

5. Требования по технике безопасности

1. Во избежание поражения электрическим током все электрические приборы должны быть заземлены;
2. Проверить правильность сборки схемы до включения электрических приборов; в случае сомнения обратиться к преподавателю;
3. Во время работы запрещается прикасаться к оголенным участкам электрооборудования, предварительно их не обесточив.

6. Задания

1. Измерить зависимость силы тока в цепи от сопротивления нагрузки и определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника.
2. Построить и объяснить зависимости полезной мощности и КПД источника от сопротивления нагрузки.

7. Методика выполнения заданий

Задание 1

1. Вывести в крайнее левое положение ручку «регулировка тока» на источнике питания.
2. Подключить экспериментальную установку к сети с напряжением 220 В.

Контрольные вопросы

1. Какие физические величины называются силой тока и плотностью тока?
2. Какие условия необходимы для поддержания тока в цепи?
3. Что называют ЭДС источника тока?
4. Что называется напряжением: а) на однородном участке цепи; б) на неоднородном участке цепи?
5. Как записывается закон Ома для замкнутой цепи?
6. Как формулируется закон Джоуля – Ленца?
7. Что называется: а) мощностью тока; б) полезной мощностью; в) полной мощностью; г) мощностью потерь?
8. Что называют коэффициентом полезного действия электрической цепи?
9. Как выглядит зависимость КПД от сопротивления нагрузки?
10. Вывести формулу (4.1).

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) номер, название и цель работы;
- 2) краткий конспект теоретической части, включая расчетные формулы;
- 3) таблицу с результатами измерений и вычислений, а также сами вычисления;
- 4) графики зависимости полезной мощности от сопротивления внешней нагрузки и КПД источника от этого сопротивления;
- 5) вывод по результатам проведенного эксперимента.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- овладел знаниями о физических явлениях и законах постоянного тока;
- правильно выполнил экспериментальную и расчетную часть работы;
- составил отчет, соответствующий требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М.: Академия, 2014.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Академия, 2014.
3. Савельев И. В. Курс физики. СПб.: Лань, 2016. Т. 2.

Лабораторная работа № 34

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПРАВИЛ КИРХГОФА

1. Цель работы

Изучение законов постоянного тока, правил Кирхгофа и их экспериментальная проверка.

2. Задачи

1. Изучение законов постоянного тока.
2. Проверка выполнения правил Кирхгофа на примере моста Уитстона и компенсационного метода измерения ЭДС.

3. Теоретическая часть

3.1. Электрический ток

Электрический ток представляет собой упорядоченное движение электрических зарядов. Эти заряды называют носителями тока. Для количественной характеристики электрического тока служат две основные величины: плотность тока и сила тока.

Плотность тока численно равна количеству электричества, прошедшего за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению движения носителей тока

$$j = \frac{dq}{dS_{\perp} dt}. \quad (3.1)$$

Плотность тока – величина векторная. Направление вектора плотности тока \vec{j} совпадает с направлением движения положительно заряженных носителей тока в данной точке проводника.

Сила тока в проводнике равна величине заряда, проходящего за единицу времени через сечение проводника

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (3.2)$$

или с учетом (3.1)

$$I = \int_S j dS_{\perp}. \quad (3.3)$$

Произведение $j \cdot dS_{\perp}$ можно записать как $j_n \cdot dS$, где j_n – проекция вектора \vec{j} на нормаль к поверхности dS , или как скалярное

произведение $\vec{j} \cdot d\vec{S}$, где вектор $d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}$, \vec{n} – вектор нормали к поверхности dS .

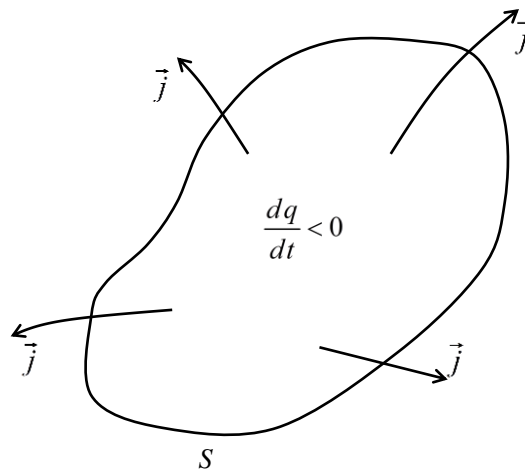


Рис. 3.1. Воображаемая замкнутая поверхность в среде, где течет электрический ток

Рассмотрим в некоторой среде, в которой течет ток, воображаемую замкнутую поверхность S (рис. 3.1). Выражение $\oint_S \vec{j} d\vec{S}$ представляет собой заряд, выходящий за единицу времени из объема V , ограниченного поверхностью S . В силу закона сохранения заряда эта величина должна быть равна скорости убывания заряда из этого объема

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = -\frac{dq}{dt}. \quad (3.4)$$

В случае постоянного (стационарного) тока потенциал, плотность заряда и другие величины во всех точках не меняются со временем. Следовательно, для постоянного тока

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = 0. \quad (3.5)$$

Соотношение (3.4) представляет собой уравнение непрерывности электрического заряда, выражающее закон сохранения электрического заряда. Соотношение (3.5) является частным случаем (3.4) для стационарных токов.

Если проводник имеет разветвления, то в качестве замкнутой поверхности S можно выбрать поверхность, охватывающую область разветвления (рис. 3.2).

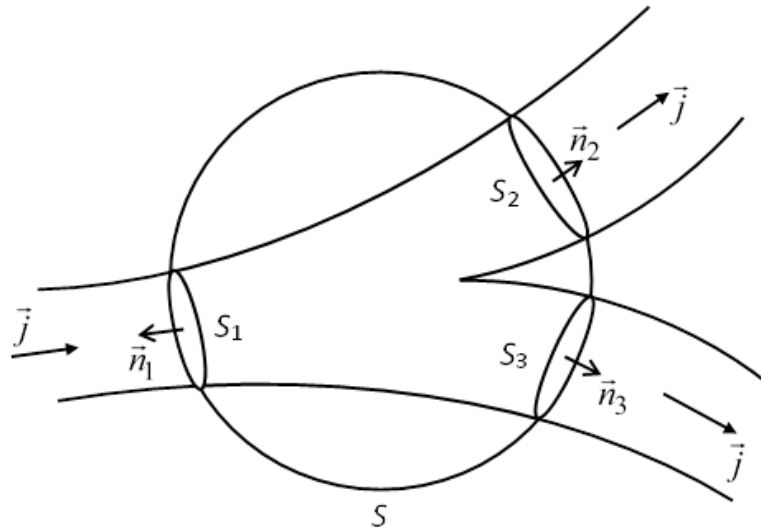


Рис. 3.2. Воображаемая замкнутая поверхность, охватывающая область разветвления проводников

В случае стационарного тока имеет место соотношение (3.5). Поскольку ток течет только через сечения проводников S_1 , S_2 и S_3 , то это выражение можно расписать следующим образом

$$\int_{S_1} \vec{j} d\vec{S} + \int_{S_2} \vec{j} d\vec{S} + \int_{S_3} \vec{j} d\vec{S} = 0. \quad (3.6)$$

Так как через площадь S_1 ток течет против нормали к выбранной поверхности, то $\int_{S_1} \vec{j} d\vec{S} = -I_1$, где I_1 – сила тока через сечение проводника S_1 , через площади S_2 и S_3 ток течет в направлении нормали, и $\int_{S_2} \vec{j} d\vec{S} = I_2$, $\int_{S_3} \vec{j} d\vec{S} = I_3$.

Следовательно, выражение (3.6) превращается в следующее

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0. \quad (3.7)$$

Выражение типа (3.7) называют I правилом Кирхгофа, которое в общем виде будет сформулировано ниже и выражает закон сохранения электрического заряда.

3.2. Условия существования электрического тока

Для возбуждения электрического тока необходимо существование в проводнике электрического поля. Если бы в электрической цепи действовали только электростатические силы, то протекание тока приводило бы к уменьшению напряженности электрического

поля и, соответственно, разности потенциалов на концах проводника, т. к. положительные заряды движутся в направлении поля (в сторону меньшего потенциала), а отрицательные – против поля (в сторону большего потенциала). В связи с этим для поддержания постоянного тока в электрической цепи должны присутствовать устройства, под действием которых положительные носители тока движутся в сторону возрастания потенциала, т. е. против сил электростатического поля. Силы, действующие в таких устройствах, неэлектростатического происхождения называют *сторонними*.

Физическая величина, равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда, называется электродвижущей силой (ЭДС) источника

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}, \quad (3.8)$$

где $A_{\text{ст}}$ – работа сторонних сил; q – величина перемещаемого заряда.

Работа электростатических сил по перемещению единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2 выражается через разность потенциалов между этими точками

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{A_{\text{эл}}}{q}, \quad (3.9)$$

где $A_{\text{эл}}$ – работа электростатических сил.

Физическая величина, равная суммарной работе электростатических и сторонних сил по переносу единичного положительного заряда, называется напряжением на участке цепи между точками 1 и 2

$$U_{12} = \frac{A_{\text{эл}} + A_{\text{ст}}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}. \quad (3.10)$$

Опыт показывает, что для многих веществ в широких пределах имеет место прямая пропорциональная зависимость между силой тока и напряжением на участке цепи

$$U_{12} = I \cdot R_{12}, \quad (3.11)$$

где величина R_{12} называется сопротивлением участка цепи.

Равенство (3.11) выражает закон Ома. Закон Ома не является фундаментальным, а выражает свойство веществ, в частности металлов. На практике в электрических цепях используются именно такие вещества, для которых справедлив закон Ома.

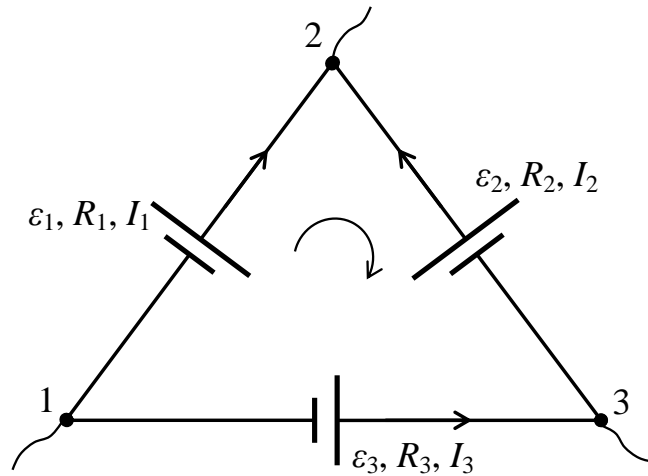


Рис. 3.3. Произвольный замкнутый контур

Выделим в цепи произвольный замкнутый контур, состоящий из проводников (рис. 3.3), и запишем закон Ома для каждого участка этого контура:

$$I_1 \cdot R_1 = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_1, \quad (3.12.1)$$

$$-I_2 \cdot R_2 = \varphi_2 - \varphi_3 - \varepsilon_2, \quad (3.12.2)$$

$$-I_3 \cdot R_3 = \varphi_3 - \varphi_1 - \varepsilon_3. \quad (3.12.3)$$

На рис. 3.3 кривой линией со стрелкой показано направление обхода контура. Если выбранное направление тока на участке цепи совпадает с направлением обхода контура, то напряжение на участке берется со знаком «+» (3.12.1), в противоположном случае – со знаком «-» (3.12.2) и (3.12.3). Если в направлении обхода контура при прохождении источника потенциал повышается, то ЭДС берется со знаком «+» (3.12.1), в противоположном случае – со знаком «-» (3.12.2), (3.12.3).

Сложим уравнения для всех участков замкнутого контура (3.12.1), (3.12.2) и (3.12.3)

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_3 R_3 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3. \quad (3.13)$$

Выражение типа (3.13) называют II правилом Кирхгофа, которое следует из закона Ома.

3.3. Общая формулировка правил Кирхгофа

Правила Кирхгофа позволяют рассчитывать сложные разветвленные цепи. Схема расчета состоит в следующем.

1. В сложной цепи выделяют узлы и замкнутые контуры. Узлом называют точки цепи, в которых сходится более двух токов.

Замкнутый контур – это часть цепи, при переходе от одного элемента которой к следующему можно прийти в исходную точку.

2. Произвольно выбирают направление тока через каждый участок цепи, не имеющий разветвлений.

3. Записывают I уравнение Кирхгофа, согласно которому *алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю*

$$\sum_{i=1}^N I_i = 0, \quad (3.14)$$

где N – число проводников, сходящихся в узле.

Токи, входящие в узел и выходящие из него, берутся с противоположными знаками.

4. Произвольно выбирают направление обхода замкнутых контуров.

5. Записывают II уравнение Кирхгофа, согласно которому *в произвольном замкнутом контуре алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления участков контура равна алгебраической сумме действующих в нем ЭДС*

$$\sum_{k=1}^L I_k R_k = \sum_{k=1}^L \varepsilon_k, \quad (3.15)$$

где L – число неразветвленных участков контура.

Токи считаются положительными, если они текут в направлении обхода контура, ЭДС берется со знаком «+», если в направлении обхода потенциал повышается (обход производится от отрицательного к положительному полюсу источника). В противоположных случаях берутся отрицательные знаки.

3.4. Примеры расчета простейших цепей

С помощью уравнений Кирхгофа легко рассчитываются схема уравновешенного моста, применяемая для измерения неизвестных сопротивлений, и схема компенсационного метода измерения ЭДС источника тока. В данной работе предлагается экспериментальная проверка правильности этих расчетов.

3.4.1. Измерение ЭДС методом уравновешенного моста.

Схема моста Уитстона представлена на рис. 3.4. Цепь состоит из источника ЭДС, сопротивлений R_3 , R_4 , R и миллиамперметра (гальванометра). Сопротивление R с помощью подвижного контакта D можно делить на две части R_1 и R_2 . Миллиамперметр включен

между точками C и D . Ток I идет от источника ε к точке A , где он разветвляется на I_1 и I_2 . Ток I_2 в точке C разветвляется на ток I_3 , текущий через сопротивление R_4 , и I_g , текущий через миллиамперметр. Ток I_1 в точке D разветвляется на I_4 и I_g .

Мост называют уравновешенным, когда сила тока через прибор (на участке CD) равна нулю $I_g = 0$.

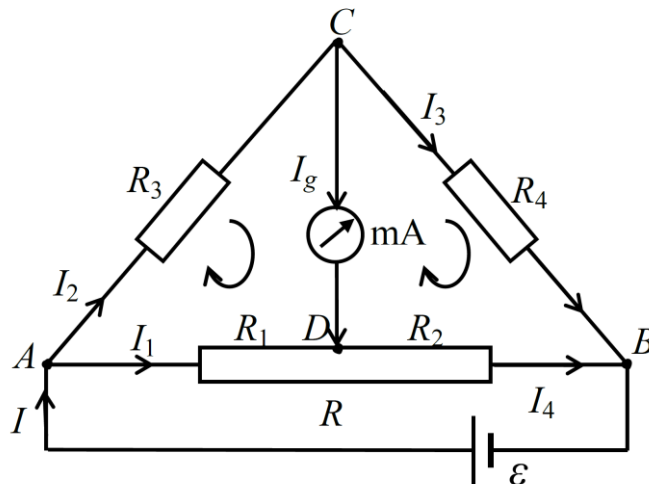


Рис. 3.4. Схема моста Уитстона

Рассмотрим узлы C и D и запишем для них I правило Кирхгофа:

$$-I_2 + 0 + I_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad I_2 = I_3, \quad (3.16.1)$$

$$-I_1 + 0 + I_4 = 0 \quad \Rightarrow \quad I_1 = I_4. \quad (3.16.2)$$

Выберем замкнутые контуры $ACDA$ и $CBDC$. Обойдя их по часовой стрелке, получим согласно II правилу Кирхгофа:

$$I_2 R_3 - I_1 R_1 = 0 \quad \Rightarrow \quad I_2 R_3 = I_1 R_1, \quad (3.17.1)$$

$$I_3 R_4 - I_4 R_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad I_3 R_4 = I_4 R_2. \quad (3.17.2)$$

Из (3.16) и (3.17) для уравновешенного моста получаем

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (3.18)$$

В этом случае прибор должен показывать нулевой ток.

3.4.2. Компенсационный метод измерения ЭДС. Особенность компенсационного метода измерения ЭДС (рис. 3.5) состоит в том, что измерение ЭДС происходит при нулевом токе через миллиамперметр в нижней части схемы.

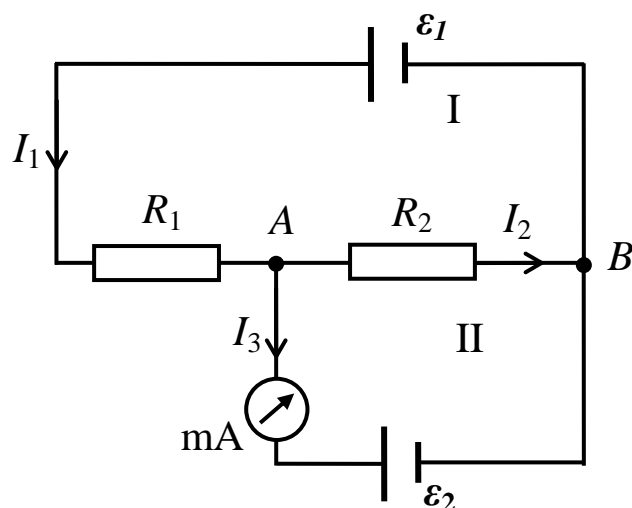


Рис. 3.5. Схема измерения ЭДС компенсационным методом

Схема (рис. 3.5) состоит из двух замкнутых контуров I и II. Согласно I правилу Кирхгофа для узла A (или B)

$$I_1 = I_2, \text{ т. к. } I_3 = 0. \quad (3.19)$$

По II правилу Кирхгофа для контура II

$$I_2 R_2 + 0 = \varepsilon_2. \quad (3.20)$$

Отсюда следует, что при отсутствии тока через миллиамперметр величина ЭДС ε_2 компенсируется напряжением на сопротивлении R_2 .

4. Экспериментальная часть

4.1. Приборы и принадлежности

Для проверки правил Кирхгофа используется следующее оборудование:

- 1) источник питания, дающий постоянную ЭДС $\varepsilon = 5 \text{ В}$ и регулируемую от 0 до 15 В;
- 2) миллиамперметр;
- 3) комбинированный прибор В7-40/5;
- 4) реохорд и набор сопротивлений.

4.2. Описание лабораторной установки

А) Мост Уитстона (рис. 3.4) предлагается собрать следующим образом: в качестве сопротивления R использовать реохорд; R_4 – постоянный резистор 100 Ом; R_3 – декадный резистор $0 \div 100 \text{ Ом}$.

ЭДС берется от регулируемой части источника питания (справа).

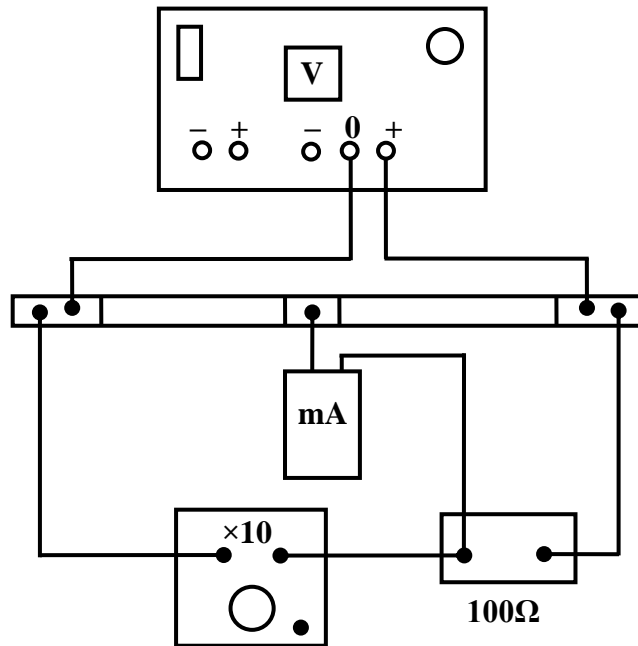


Рис. 4.1. Блок-схема установки для измерений методом моста Уитстона

Сопротивление проводника в виде провода с постоянным сечением пропорционально его длине, таким образом, отношение сопротивлений R_1/R_2 равно отношению длин провода реохорда l_1/l_2 ; l_1 измеряется по шкале, l_2 рассчитывается: $l_2 = 1000 - l_1$ (мм).

Б) Источник питания не является идеальным, и при подключении внешней цепи часть напряжения падает внутри источника. В левой части источника напряжение 5 В соответствует разомкнутой цепи. При подключении внешней цепи это напряжение становится иным и не измеряется. Эту ЭДС предлагается использовать в компенсационной схеме (рис. 3.5) в качестве элемента ε_1 . Для уменьшения падения напряжения внутри источника ЭДС сопротивление внешней цепи желательно выбрать по возможности больше. Поэтому в качестве сопротивлений R_1 и R_2 контура I (рис. 3.5) предлагается выбрать постоянный резистор 1 кОм и декадный от 0 до 1 кОм. Схема измерений составляется следующим образом.

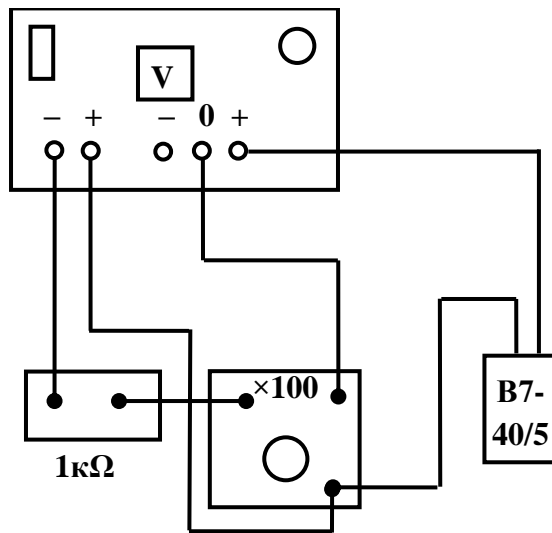


Рис. 4.2. Блок-схема установки для измерений ЭДС компенсационным методом

Если сравнить цепь рис. 4.2 и рис. 3.5, то сопротивление R_1 состоит из 1 кОм плюс показание декадного переключателя, умноженное на 100 Ом; а сопротивление R_2 получится, если из 1000 Ом вычесть показание декадного переключателя и умножить на 100 Ом. Суммарное сопротивление цепи контура I « $R_1 + R_2$ » сохраняется постоянным, равным 2 кОм.

5. Требования по технике безопасности

Для электропитания лабораторной установки используется сетевое напряжение 220 В. Все токоведущие части установки, кроме реохорда, закрыты, что исключает их случайное касание.

При выполнении работы необходимо:

1. Внимательно ознакомиться с заданием и оборудованием;
2. Визуально проверить целостность изоляции токоведущих проводов;
3. Не оставлять без присмотра включенную лабораторную установку;
4. Не загромождать рабочее место посторонними предметами и оборудованием, не относящимися к выполняемой работе;
5. О замеченных неисправностях сообщить преподавателю;
6. По окончании работы отключить установку от сети, привести в порядок рабочее место.

6. Задания

1. Проверить выполнение правил Кирхгофа на примере моста Уитстона.
2. Проверить правомерность компенсационного метода измерения ЭДС.

7. Методика выполнения заданий

Задание 1. Проверка моста Уитстона

1. Перед началом работы тумблер «Сеть» источника питания должен быть отключен. Ручка регулировки напряжения в правой части источника должна быть выведена в крайнее левое положение.
2. Проверить правильность соединений согласно рис. 4.1 и 4.2. Переключатель на декадном резисторе ($\times 10$) поставить в положение 10. Токосъемный контакт D установить приблизительно посередине реохорда.
3. После проверки схемы преподавателем включить источник питания. Поворотом ручки регулировки напряжения установить значение 1 В.
4. Если миллиамперметр показывает ток, отличный от нуля, то перемещением контакта D добиться нулевого тока.
5. В табл. 7.1 занести значения $R_4 = 100$ Ом, $R_3 = 100$ Ом, l_1 (мм) – положение контакта D , $l_2 = 1000 - l_1$ (мм), а также отношения $R_1/R_2 = l_1/l_2$ и R_3/R_4 .
6. Перевести переключатель декадного резистора в положение 9. Тогда $R_3 = 90$ Ом. Повторить пп. 4–5.
7. Выполнить аналогичные измерения при $R_3 = 80, 70, 60, 50, 40, 30$ Ом.
8. Оценить погрешность определения отношений R_1/R_2 и R_3/R_4 , используя указанные на резисторах их относительные погрешности.
9. Проанализировать результаты, сведенные в табл. 7.1, и сделать по ним вывод.

Таблица 7.1

R_4	R_3	l_1	l_2	R_1/R_2	R_3/R_4
100	100				
	90				
	...				

Задание 2. Проверка компенсационного метода измерения ЭДС

1. Собрать измерительную схему согласно рис. 4.2. На декадном переключателе ($\times 100$) установить значение 9. При этом сопротивление $R_2 = 1000 - 900 = 100$ Ом (см. раздел 4Б). Ручка регулировки напряжения выведена в крайнее левое положение.

2. После проверки схемы преподавателем включить источник питания. Поворотом ручки регулировки напряжения добиться нулевого показания прибора В7-40/5. Если не удастся получить точный нуль, замечайте изменение знака с «-» на «+».

3. В табл. 7.2 занести значения сопротивления R_2 и полученные значения ЭДС ε_2 , измеренные по вольтметру источника питания.

4. Вернуться к п. 1, установить на декадном переключателе значение 8. Рассчитать сопротивление R_2 и занести его в табл. 7.2. Повторить процедуру по п. 2 с новым значением сопротивления R_2 .

5. Повторить п. 4 при положениях переключателя 7, 6, 5. Все данные занести в табл. 7.2.

6. Построить график зависимости $\varepsilon_2(R_2)$ по результатам, сведенным в табл. 7.2.

7. Сделать вывод по полученной зависимости.

8. Сделать вывод по всей работе.

Таблица 7.2

R_2			...
ε_2			...

Контрольные вопросы

1. Дайте определение электрического тока и его основных характеристик. Как они связаны между собой?

2. Запишите уравнение непрерывности в общем виде и для стационарного тока. Какой закон сохранения выражает это уравнение?

3. Дайте определения ЭДС и напряжения на концах участка цепи.

4. Запишите закон Ома для участка цепи. Является ли этот закон фундаментальным?

5. Сформулируйте I правило Кирхгофа. Какой физический закон отражает это правило?

6. Сформулируйте II правило Кирхгофа. Какой физический закон отражает это правило?

7. Начертите схему моста Уитстона и объясните метод измерения.

8. Начертите схему компенсационного метода измерения ЭДС и объясните метод измерения.

9. Для электрических цепей, схемы которых показаны на рис. 4.3, записать необходимое количество уравнений для расчета цепей с помощью правил Кирхгофа.

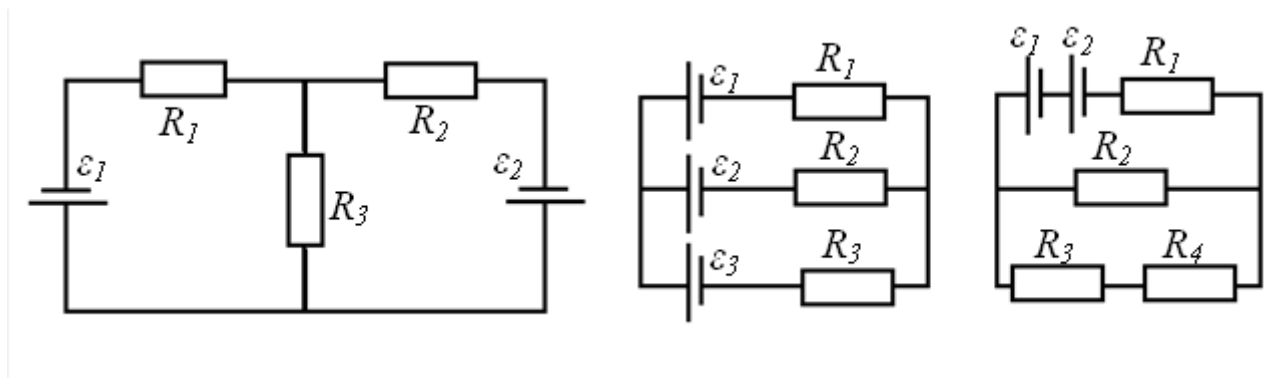


Рис. 4.3. Схемы электрических цепей

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) номер, название и цель работы;
- 2) краткое изложение основных теоретических положений;
- 3) результаты исследований в виде таблиц и графиков;
- 4) выводы по результатам работы.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- овладел теоретическими знаниями о переносе электрического заряда;
- правильно выполнил экспериментальную и расчетную части работы;
- составил отчет, соответствующий требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М.: Академия, 2014.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. В 4 кн. М.: КноРус, 2012, Кн. 2.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 6 т. М.: Наука, 2014, Т. 3.
4. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Академия, 2014.

Лабораторная работа № 35

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

1. Цели работы

1. Изучение явления термоэлектронной эмиссии.
2. Снятие вольт-амперной характеристики вакуумного диода при различных температурах накала катода.
3. Определение удельного заряда электрона.

2. Задачи

1. Усвоение важнейшего физического явления – явления термоэлектронной эмиссии.
2. Овладение одним из методов исследования явления термоэлектронной эмиссии.
3. Приобретение навыков проведения измерений и умения обработки результатов исследования.
4. Определение удельного заряда электрона.

3. Теоретическая часть

3.1. Работа выхода электронов из металла

В металлах имеются электроны проводимости, образующие электронный газ и совершающие тепловое движение. Вблизи поверхности существуют силы, действующие на электроны и направленные внутрь металла, поэтому электроны проводимости удерживаются в металле. Чтобы электрон мог выйти из металла за его пределы, должна быть совершена определенная работа A против этих сил, которая получила название работы выхода электрона из металла. Эта работа, естественно, различна для разных металлов.

В настоящее время можно указать две наиболее вероятные причины происхождения работы выхода. Одна из них объясняется индукционным действием удаляемого электрона на металл. Электрон, вылетевший из металла, вызывает на поверхности металла положительный индуцированный заряд, отчего между электроном и металлом возникает сила притяжения, препятствующая удалению электрона.

Вторая причина заключается в следующем. Электроны проводимости, совершая беспорядочное тепловое движение, способны пересекать поверхность металла и удаляться от нее на малое расстояние. У поверхности металла существует электронное облако, постоянно обменивающееся электронами с металлом, так что электроны облака и металла находятся в динамическом равновесии между собой. Заметная концентрация электронов в облаке наблюдается лишь на расстояниях от поверхности металла порядка нескольких межатомных расстояний (10^{-10} – 10^{-9}) м. На поверхности металла имеется избыток положительных зарядов – ионов. Эти заряды и электронное облако образуют тонкий двойной электрический слой. Такой двойной слой не создает электрического поля во внешнем пространстве, но препятствует вылету электронов из металла.

Потенциальная энергия электрона внутри металла постоянна и равна

$$W_p = -e\phi, \quad (3.1)$$

где e – заряд электрона; ϕ – потенциал электрического поля внутри металла.

При переходе электрона через поверхностный электронный слой потенциальная энергия быстро уменьшается на величину работы выхода и становится вне металла равной нулю. Распределение энергии электрона внутри металла можно представить в виде потенциальной ямы.

Приближенная картина изменения потенциальной энергии электрона отображена на рис. 3.1.

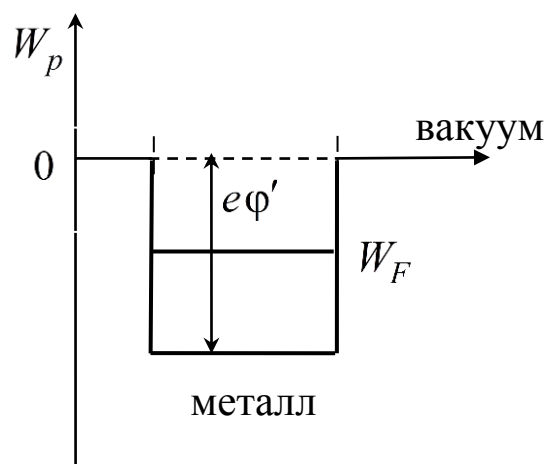


Рис. 3.1. Изменение потенциальной энергии электрона

В рассмотренной выше трактовке работа выхода электрона равна глубине потенциальной ямы, т. е.

$$A_{\text{вых}} = e\phi'. \quad (3.2)$$

Этот результат соответствует классической электронной теории металлов, в которой предполагается, что скорость электронов в металле подчиняется закону распределения Максвелла и при температуре абсолютного нуля равна нулю. Однако в действительности электроны проводимости подчиняются квантовой статистике Ферми – Дирака, согласно которой при абсолютном нуле скорость электронов и, соответственно, их энергия отлична от нуля. Максимальное значение энергии, которой обладают электроны при абсолютном нуле, называется энергией Ферми W_F . Квантовая теория проводимости металлов, основанная на статистике Ферми – Дирака, дает иную трактовку работы выхода. Работа выхода электрона из металла равна разности высоты потенциального барьера $e\phi'$ и энергии Ферми

$$A_{\text{вых}} = e\phi' - W_F, \quad (3.3)$$

где ϕ' – среднее значение потенциала электрического поля внутри металла.

3.2. Явление термоэлектронной эмиссии

Явление термоэлектронной эмиссии – это испускание электронов нагретыми металлами. Концентрация свободных электронов в металлах достаточно высока, поэтому даже при средних температурах вследствие распределения электронов по скоростям (по энергиям) некоторые электроны обладают энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера на границе металла. С повышением температуры число электронов, кинетическая энергия теплового движения которых больше работы выхода, растет, и явление термоэлектронной эмиссии становится заметным.

Исследование закономерностей термоэлектронной эмиссии можно провести с помощью двухэлектродной лампы – вакуумного диода, представляющего собой откачанный баллон, содержащий два электрода: катод К и анод А. В простейшем случае катодом служит нить из тугоплавкого металла (например, вольфрама), накаливаемая электрическим током. Нагрев катода до температуры (1100÷2000) К приводит к испусканию электронов с его поверхности. Анод чаще

всего имеет форму металлического цилиндра, окружающего катод. Если диод включить в цепь, как показано на рис. 4.2, то при накаливании катода и подаче на анод положительного напряжения (относительно катода) в анодной цепи диода возникает ток.

В вакуумной электронной лампе электрическое поле, действующее на каждый электрон, складывается из внешнего поля, создаваемого разностью потенциалов между электродами, и поля, создаваемого всеми остальными электронами, образующими пространственный заряд. Благодаря пространственному заряду при малых анодных напряжениях анодный ток может быть значительно меньше возможного тока эмиссии катода и постепенно увеличивается при повышении анодного напряжения.

На рис. 3.2 представлены вольт-амперные характеристики для двух температур накала катода.

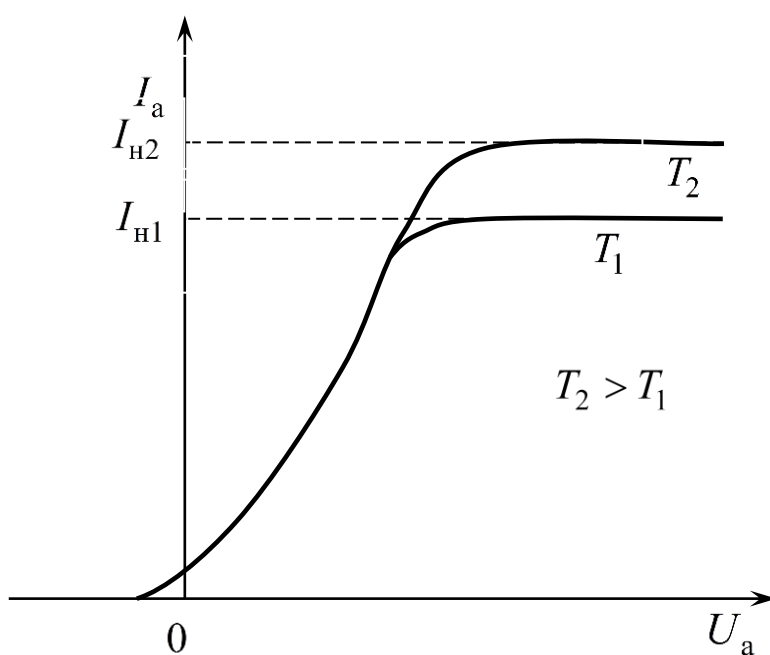


Рис. 3.2. Вольт-амперные характеристики для двух температур накала катода

Зависимость термоэлектронного тока I_a от анодного напряжения в области малых положительных значений U_a не подчиняется закону Ома, а описывается законом трех вторых, установленным русским физиком С. А. Богуславским и американским физиком И. Ленгмюром

$$I_a = B \cdot U_a^{3/2}, \quad (3.4)$$

где B – коэффициент, зависящий от форм и размеров электродов, а также их взаимного расположения.

Следует отметить, что формула (3.4) не является точной, т. к. закон Богуславского – Ленгмюра выведен в предположении, что:

1) начальные скорости электронов, эмитируемых катодом, пренебрежимо малы;

2) анодный ток далек от насыщения;

3) пространственный заряд создает такое распределение потенциала между катодом и анодом, что непосредственно у поверхности катода напряженность электрического поля не равна нулю.

При увеличении анодного напряжения ток возрастает до некоторого максимального значения I_n , называемого током насыщения.

Насыщение анодного тока наступает тогда, когда все электроны, испускаемые катодом в единицу времени, попадают на анод. Поэтому при дальнейшем увеличении анодного напряжения анодный ток уже не может увеличиваться. Таким образом, величина тока насыщения определяется эмиссионной способностью катода.

Плотность тока насыщения определяется формулой Ричардсона – Дешмана, выведенной на основе квантовой статистики

$$I_n = C \cdot T^2 e^{-A/(kT)}, \quad (3.5)$$

где C – постоянная, теоретически одинаковая для всех материалов, однако на опыте получаются различные значения; A – работа выхода электрона; T – термодинамическая температура; k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Благодаря экспоненциальному множителю плотность термоэлектронного тока чрезвычайно сильно зависит от работы выхода и температуры катода. Например, при повышении температуры вольфрама от 2000 до 2500 К плотность тока эмиссии возрастает почти в 200 раз.

4. Экспериментальная часть

По форме и размерам электродов лампы можно определить коэффициент B в формуле (3.4). Если катод и анод представляют собой коаксиальные цилиндрические электроды, то, как показывает расчет, закон Богуславского – Ленгмюра имеет вид

$$I_a = \frac{8\sqrt{2}\pi\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{l}{r\beta^2} U_a^{3/2}, \quad (4.1)$$

где e/m – удельный заряд электрона (отношение величины заряда к его массе); r – радиус анода; l – длина катода; β^2 – коэффициент,

зависящий от отношения радиусов анода и катода; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

По вольт-амперным характеристикам диода определяется удельный заряд электрона, поэтому удобнее строить график зависимости анодного тока от анодного напряжения в степени три вторых. На рис. 4.1 представлена зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения $U^{3/2}$.

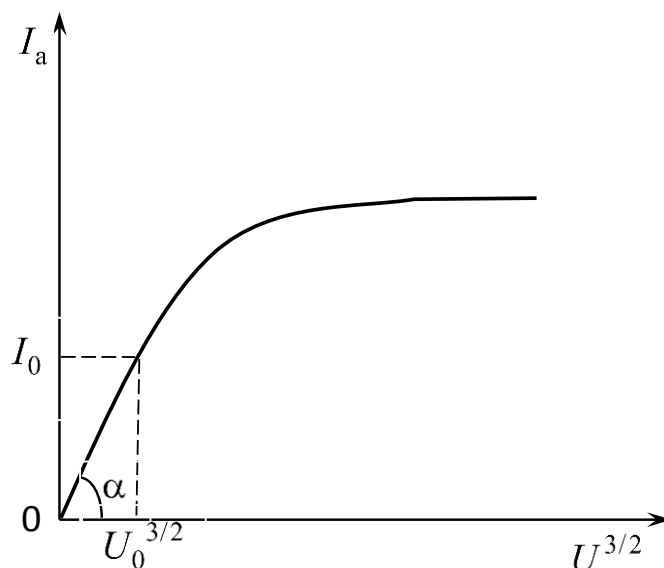


Рис. 4.1. Зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения $U^{3/2}$

Угловой коэффициент полученной прямой в случае коаксиальных цилиндрических электродов равен

$$\alpha = \frac{8\sqrt{2} \cdot \pi\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{l}{r\beta^2}. \quad (4.2)$$

Отсюда можно рассчитать удельный заряд электрона e/m

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{9r\beta^2}{8\sqrt{2}l\pi\varepsilon_0} \alpha \right)^2. \quad (4.3)$$

4.1. Экспериментальная установка и принцип ее работы

В лабораторной установке используются измерительные приборы:

- 1) источник питания (ИП) с напряжением 2,5 В и источник постоянного тока Б5-50 с напряжением до 220 В;
- 2) цифровой вольтметр В7-40/4;

3) электронная лампа 2Ц2С.

Электрическая схема лабораторной установки приведена на рис. 4.2.

Блок-схема установки для изучения явления термоэлектронной эмиссии приведена на рис. 4.3.

Лампа типа 2Ц2С с подогреваемым оксидным катодом подключена к источнику постоянного тока Б5-50. Анодное напряжение U_a подается от источника постоянного тока Б5-50. Величина напряжения регулируется ступенчато, вращением трех дисков с прорезями в окошечке с тремя различными цифровыми значениями от 60 до 220 В. Анодный ток лампы I_a численным значением до 47 мА устанавливается в источнике постоянного тока Б5-50 (не изменяется во время эксперимента).

Источник постоянного тока Б5-50 используется для питания цепи анода (60–220 В), а модуль источника питания ИП – для питания цепи накала катода напряжением 2,5 В.

Ток накала измеряется стрелочным амперметром на модуле источника питания ИП.

При изучении зависимости плотности тока эмиссии от температуры анодное напряжение должно быть достаточным для получения тока насыщения.

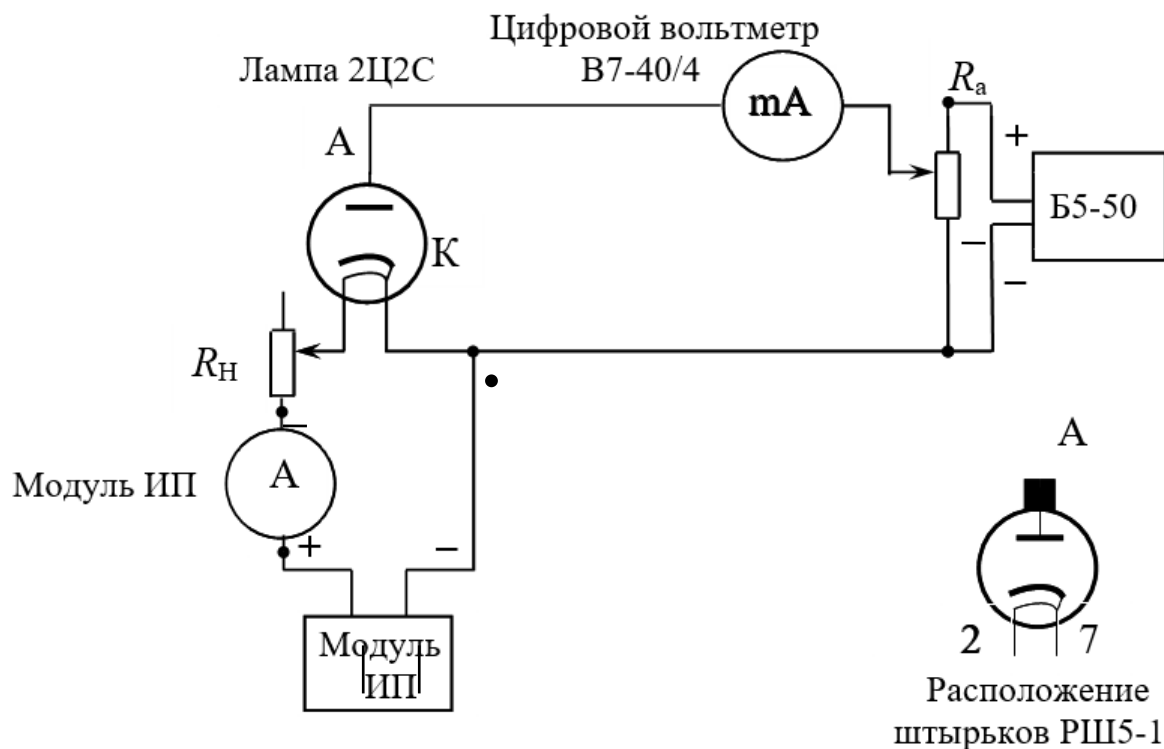


Рис. 4.2. Электрическая схема лабораторной установки

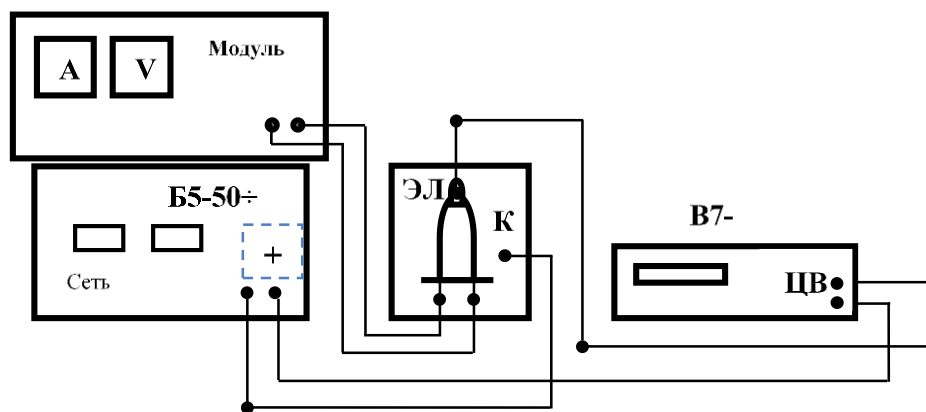


Рис. 4.3. Блок-схема установки для изучения явлений термоэлектронной эмиссии:

ЦВ – цифровой вольтметр; Б5-50 – источник постоянного напряжения до 220 В;
ИП – модуль источника питания для цепи накала с напряжением до 2,5 В;
ЭЛ – электронная лампа; К – катод

5. Требования по технике безопасности

1. Прежде чем приступить к работе, необходимо внимательно ознакомиться с заданием и лабораторным оборудованием.

2. Необходимо проверить заземление лабораторной установки и исправность изоляции токоведущих проводов. При обнаружении неисправности следует немедленно сообщить об этом преподавателю. Не разбирать лабораторную установку!

3. Не оставлять включенной в электрическую сеть лабораторную установку без присмотра.

4. Не загромождать рабочее место посторонними предметами (одежда, сумки и т. д.).

5. По окончании выполнения измерений необходимо лабораторную установку отключить от сети.

6. Задания

1. Выполнить измерения анодного тока в лампе при изменении напряжения на аноде лампы с 60 В до 220 В при токах накала 1,6 А; 1,5 А; 1,4 А.

2. Построить графики зависимости I_a от U_a и I_a от $U^{3/2}$.

3. Вычислить удельный заряд электрона.

4. Определить абсолютную и относительную погрешность измерений удельного заряда электрона.

7. Методика выполнения заданий

1. Проверить схему электрических соединений лабораторной установки по рис. 4.3 и наличие заземления приборов.

2. Включить тумблеры приборного стенда для подачи напряжения 220 В в розетки.

3. Включить тумблер «Сеть» подачи напряжения на цифровом вольтметре В7-40/4.

4. Нажать на цифровом вольтметре В7-40/4 клавишу автоматического выбора пределов измерения «АВП».

5. При измерении тока анода цифровым вольтметром В7-40/4 необходимо подключить соответствующие соединительные провода к клеммам «I» (измерение тока) и переключить «Род работы» на измерение постоянного тока нажатием на клавишу «-I».

6. Проверить подключение нити накала лампы 2Ц2С соответствующими соединительными проводами к клеммам постоянного напряжения 2,5 В на модуле источника питания ИП.

7. Проверить подключение катода лампы 2Ц2С соответствующим соединительным проводом к источнику постоянного тока Б5-50.

8. Проверить подключение анода лампы 2Ц2С соответствующими соединительными проводами к клеммам постоянного напряжения (60–220) В на источнике постоянного тока Б5-50.

9. Перед включением источника постоянного тока Б5-50 необходимо проверить, что ступенчатым вращением во всех трех барабанах в трех окошечках установлено цифровое значение 060.

10. С помощью потенциометра «I» получить в показаниях стрелочного прибора модуля источника питания ИП ток накала, равный 1,6 (А).

11. Вращая ступенчато три диска в окошечке с цифровыми значениями на источнике постоянного тока Б5-50, изменять анодное напряжение с шагом 20 (В) и занести эти значения в табл. 7.1. Переход от 80 к 100 В или от 180 к 200 В осуществляется следующим образом:

– при достижении величины напряжения значением 80 В или 180 В необходимо, вращая ступенчато два диска с левой стороны, уменьшить напряжение до 10 В, затем вращая ступенчато с левой стороны первый диск, набрать значение напряжения 110 В или 210 В,

Таблица 7.2

α	$l, \text{ м}$	$r, \text{ м}$	β	$\frac{e}{m}$	$\Delta\left(\frac{e}{m}\right)$	$\frac{\Delta\frac{e}{m}}{\frac{e}{m}}$

17. Найти среднее значение удельного заряда электрона и сравнить с табличным значением.

18. Вычислить относительную и абсолютную погрешность измерений.

19. Результат измерения удельного заряда (e/m) необходимо записать в виде

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{e}{m_{\text{ср}}} \pm \Delta\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{ср}} \right) \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

Контрольные вопросы

1. Какое физическое явление называется термоэлектронной эмиссией?

2. Какие силы удерживают электрон в металле? Что такое работа выхода электрона из металла?

3. Как устроен диод и где он применяется?

4. Как выглядят вольт-амперные характеристики диода? Почему при нулевой разности потенциала между электродами анодный ток не равен нулю?

5. Что такое «ток насыщения»? Чему равна плотность тока насыщения? Запишите формулу Ричардсона – Дешмана.

6. Какой участок вольт-амперной характеристики диода подчиняется закону Богуславского – Ленгмюра? Что это за закон?

7. Почему закон Богуславского – Ленгмюра не является точным?

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) Ф.И.О., номер группы студента, выполнившего работу;
- 2) номер, название и цель работы;
- 3) краткую теорию метода определения удельного заряда электрона;
- 4) блок-схему установки;

5) таблицу с результатами измерений и вычислений $\frac{e}{m}$. Расчеты

определения $\frac{e}{m}$ должны быть приведены в отчете;

6) графики на миллиметровой бумаге, если выполнены не на компьютере;

7) формулы и расчеты абсолютной и относительной погрешности измерений;

8) выводы.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- усвоил основные понятия явления термоэлектронной эмиссии;
- выполнил экспериментальную часть работы;
- правильно выполнил вычисления и получил достоверные конечные результаты;
- определил абсолютную и относительную погрешности измерений;
- составил отчет, соответствующий предъявленным к нему требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Детлаф А. А., Яворский В. М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2014.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Академия, 2014.

Лабораторная работа № 36

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ МЕТАЛЛОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА

1. Цель работы

Изучение термоэлектронной эмиссии металлов, определение работы выхода электрона.

2. Задачи

1. Усвоение важного физического явления – электронной эмиссии металлов.

2. Приобретение навыков правильной эксплуатации электроизмерительных приборов и оборудования современной физической лаборатории, получения экспериментальных функциональных зависимостей между физическими величинами.

3. Освоение одного из методов обработки экспериментальных данных и определение работы выхода электрона из металла.

3. Теоретическая часть

Металлическая связь характеризуется обобществлением валентных электронов отдельных атомов во всем кристалле. Эти обобществленные электроны называются электронами проводимости и могут свободно перемещаться внутри металла. Однако выйти из металла они не могут вследствие притяжения положительно заряженными ионами кристаллической решетки. Электроны, совершая тепловое движение, могут пересекать поверхность металла и удаляться от нее на небольшие расстояния (порядка атомных). При этом у поверхности металла возникает электронный слой, а в металле остается нескомпенсированный заряд положительных ионов. Вблизи поверхности образуется двойной заряженный слой наподобие конденсатора. В результате в поверхностном слое металла появляется электрическое поле, а потенциал при переходе из внешнего пространства внутрь металла увеличивается на некоторую величину ϕ . Соответственно, потенциальная энергия электрона уменьшается на $e\phi$. Распределение потенциальной энергии электрона

у границы металл – вакуум имеет вид потенциального барьера (рис. 3.1).

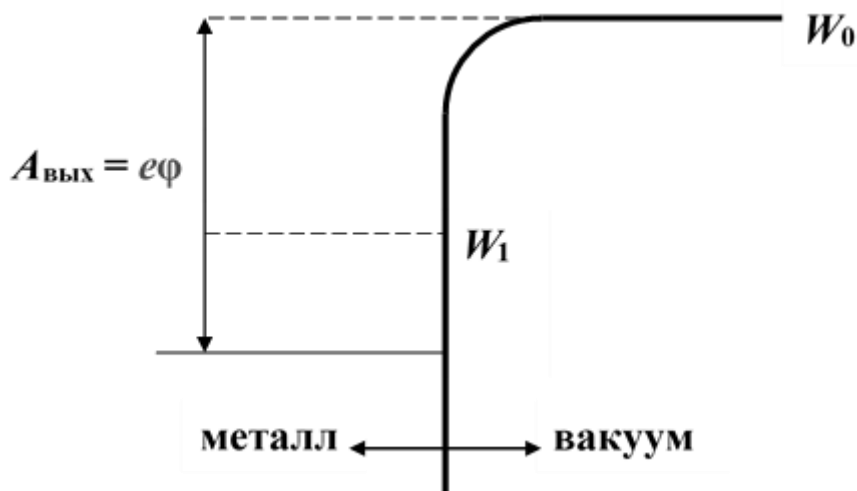


Рис. 3.1. W_0 – энергия покоящегося электрона в вакууме; W_F – энергия Ферми, т. е. максимальная энергия электрона в металле при нулевой абсолютной температуре

Величина $A_{\text{вых}} = e\phi = W_0 - W_F$ называется работой выхода электрона. Такую работу должен совершить электрон, чтобы выйти из металла в вакуум. Если электрон внутри металла имеет полную энергию, например W_1 (рис. 3.1), он не сможет покинуть металл. Условие вылета электрона из металла: $W \geq W_0$. При комнатной температуре и отсутствии внешних возбуждений практически для всех электронов это условие не выполняется, и электроны остаются внутри проводника.

Явление испускания электронов металлами называют *электронной эмиссией*.

По способам возбуждения различают термо-, фото-, авто-, вторичную электронную эмиссии.

Термоэлектронная эмиссия имеет место при нагревании металлов; при возбуждении электронов светом говорят о фотоэлектронной эмиссии; при автоэлектронной эмиссии электроны вырываются из металла сильным электрическим полем; вторичной электронной эмиссией называют выбивание электронов бомбардировкой поверхности металла электронами или ионами.

3.1. Термоэлектронная эмиссия

Термоэлектронной эмиссией называют испускание электронов нагретыми телами. Для ее наблюдения можно использовать вакуумную лампу – диод.

На рис. 3.2 представлена электрическая цепь для изучения термоэлектронной эмиссии.

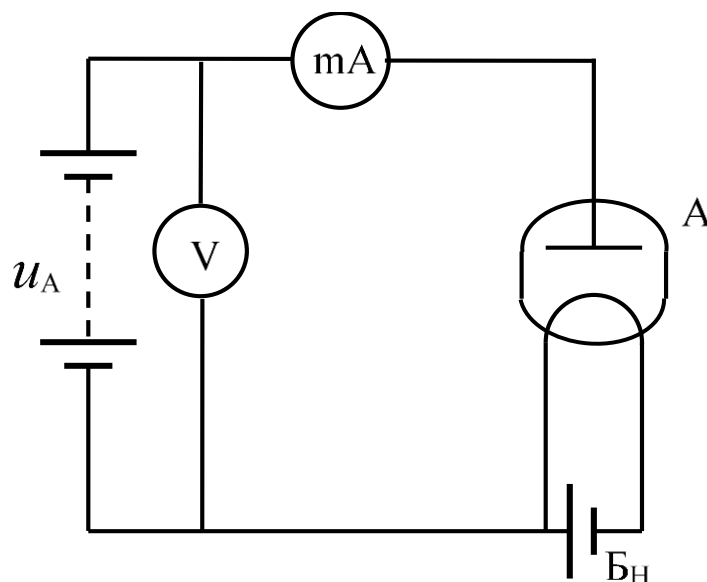


Рис. 3.2. Электрическая схема для изучения термоэлектронной эмиссии

Батарея B_H служит для нагрева катода К. Если раскалить катод К до высокой температуры (при этом катод эмитирует в вакуум электроны) и приложить к аноду А положительное напряжение u_A , то эмитированные электроны устремляются к аноду, и в цепи возникает электрический ток.

Анодный ток создают электроны, покинувшие катод вследствие термоэлектронной эмиссии, поэтому его можно также назвать термоэлектронным током. Сила этого тока в диоде зависит от величины напряжения u_A так, как показано на рис. 3.3.

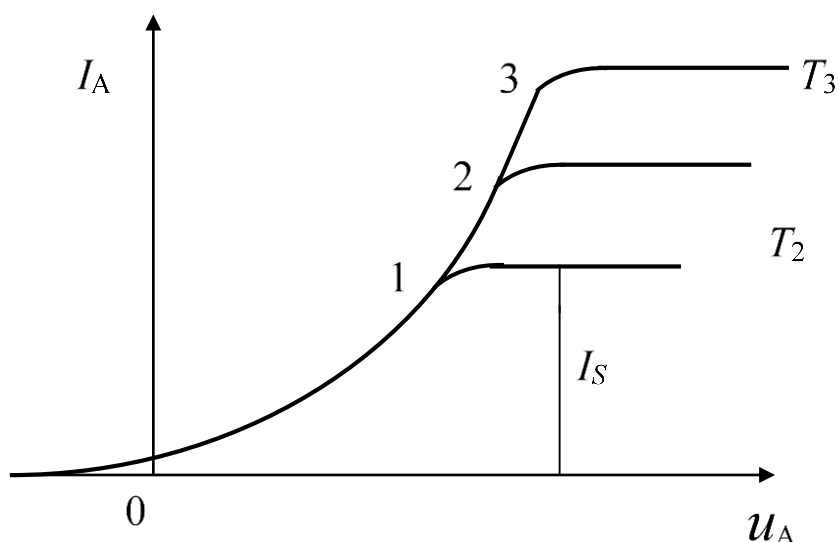


Рис. 3.3. Зависимость анодного тока I_A от анодного напряжения u_A

Отклонение зависимости анодного тока I_A от анодного напряжения u_A от прямолинейной связано с тем, что классическая теория электропроводности в данном случае неприменима, и закон Ома не выполняется. В металлах электроны проводимости ускоряются в электрическом поле, при столкновениях с атомами решетки теряют скорость, снова ускоряются и т. д. – в результате их средняя скорость оказывается пропорциональной напряженности поля. В вакууме же электрону не с чем сталкиваться, и он ускоряется на всем промежутке от катода до анода. Это одна причина нелинейной зависимости $I_A(u_A)$. Вторая причина состоит в том, что электрическое поле в этом промежутке неоднородно из-за наличия вблизи катода области пространственного заряда, образованного вылетевшими электронами. Размеры этой области зависят от приложенного напряжения: чем больше напряжение, тем меньше объемная плотность заряда и тем она более протяженная.

Теоретические расчеты, выполненные С. Ленгмюром и С. А. Богуславским для электродов различной формы, показывают, что зависимость тока диода I_A от анодного напряжения u_A имеет вид

$$I_A = C \cdot U_A^{3/2}, \quad (3.1)$$

где C – константа, зависящая от формы и размеров электродов.

Соотношение (3.1) выражает уравнение кривой 0123 (рис. 3.3) и носит название закона Богуславского – Ленгмюра.

При внимательном рассмотрении рис. 3.3 можно заметить, что реальная кривая не проходит через начало координат, а смещена в область отрицательных напряжений. Отклонение этой кривой от

графика функции (3.1) обусловлено тем, что закон Богуславского – Ленгмюра получен в предположении, что электроны покидают катод с нулевыми скоростями. В реальности электроны при вылете имеют некоторую кинетическую энергию и способны достичь анода даже при небольшом отрицательном напряжении.

Когда потенциал анода становится настолько большим, что все электроны, испускаемые катодом в единицу времени, попадают на анод, ток достигает своего максимального значения и перестает зависеть от анодного напряжения. Число электронов, эмитируемых с катода в единицу времени, зависит от его температуры. На рис. 3.3 I_s – величина тока насыщения, три кривые относятся к трем разным температурам катода, причем $T_1 < T_2 < T_3$.

Плотность тока насыщения j_s характеризует эмиссионную способность катода. Число электронов в металле, способных преодолеть потенциальный барьер $A_{\text{вых}} = e\phi$ (рис. 3.1) и выйти в вакуум, резко увеличивается при повышении температуры. Температурная зависимость тока насыщения выражается формулой Ричардсона – Дэшмана

$$J_s = B \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{A_{\text{вых}}}{kT}}, \quad (3.2)$$

где B – эмиссионная способность катода, постоянная для данного металла; k – постоянная Больцмана; $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона из металла; T – абсолютная температура.

Экспоненциальная зависимость числа электронов, преодолевающих барьер $A_{\text{вых}}$, от величины работы выхода и обратной температуры вытекает из распределения Больцмана.

3.2. Метод измерения

Измеряя на опыте зависимость тока насыщения от температуры, можно определить работу выхода для данного металла.

В нашем случае для определения работы выхода используется метод прямых Ричардсона. Суть метода в следующем. Прологарифмируем уравнение (3.2):

$$\ln \frac{j_s}{T^2} = \ln B - \frac{A_{\text{вых}}}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (3.3)$$

Переходя к десятичным логарифмам, найдем

$$\lg \frac{j_s}{T^2} = \lg B - \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{k} \lg e \cdot \frac{1}{T}. \quad (3.4)$$

Подставляя $\lg e = 0,43$, получим

$$\lg \frac{j_s}{T^2} = \lg B - \frac{0,43}{k} A_{\text{ВЫХ}} \cdot \frac{1}{T}. \quad (3.5)$$

Такой вид уравнения удобен для его экспериментальной проверки.

График зависимости $\lg(j_s / T^2)$ от $1/T$ является прямой линией с угловым коэффициентом $0,43 A_{\text{ВЫХ}} / k$. Определив тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс $1/T$, рассчитывают работу выхода

$$A_{\text{ВЫХ}} = \frac{k \operatorname{tg} \alpha}{0,43}. \quad (3.6)$$

Для построения графика необходимо знать плотность анодного тока насыщения и температуру катода.

Плотность тока насыщения определяют как отношение величины анодного тока к площади поверхности катода.

Температуру определяют по измеренному току накала катода при помощи графика зависимости температуры катода от тока накала (рис. 3.4).

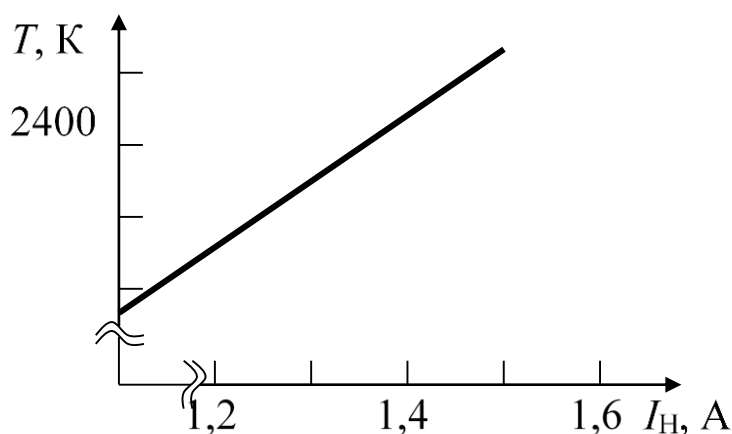


Рис. 3.4. Зависимость температуры катода от тока накала

4. Приборы и оборудование

Измерения проводятся по схеме, представленной на рис. 4.1 и 4.2.

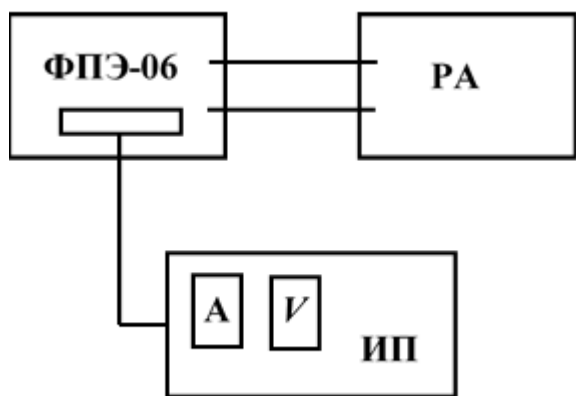


Рис. 4.1. Блок-схема лабораторной установки:
ИП – источник питания;
ФПЭ – кассета ФПЭ-06;
РА – миллиамперметр

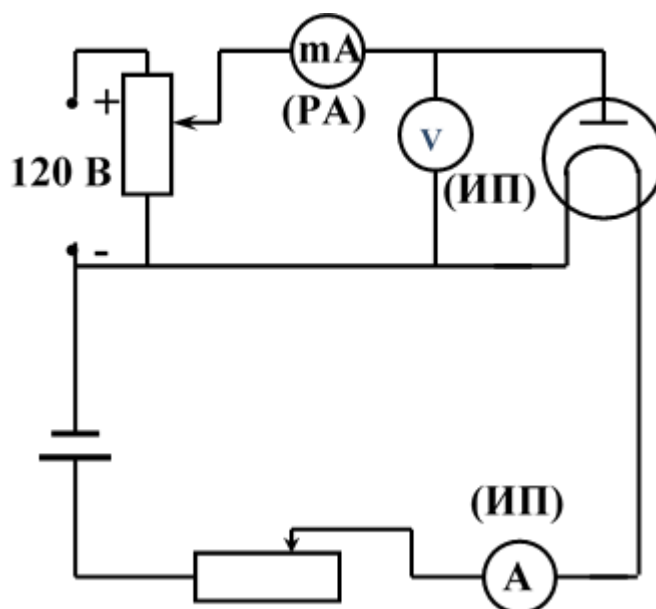


Рис. 4.2. Электрическая схема лабораторной установки

Амперметр на панели источника питания служит для контроля тока накала I_H , максимальное значение которого не должно превышать 2,2 А. Плавная регулировка накала осуществляется ручкой, расположенной под амперметром.

Вольтметр на панели источника питания измеряет анодное напряжение u_A , регулировка которого производится ручкой на панели источника питания, расположенной непосредственно под вольтметром.

Для измерения анодного тока I_A используется комбинированный прибор В7-40/5 (на схеме РА) (рис. 4.1, 4.2), который подключается к кассете ФПЭ-06 (рис. 4.1)

5. Требования по технике безопасности

1. Перед началом работы тумблеры «Сеть» на стенде и на приборах должны быть отключены.
2. Убедиться в исправности электрических шнуров, вилок, розеток.
3. Проверить правильность соединения приборов по рис. 4.1.
4. Вывести регулировки тока накала и анодного напряжения в крайние левые положения.

5. Установить на приборе В7-40/5 режим измерения последовательным нажатием клавиш «I =» и «АВП».

6. Задания

1. Получить вольт-амперные характеристики вакуумного диода при различных токах накала катода и определить величины токов насыщения.

2. По температурной зависимости тока насыщения определить работу выхода электрона из материала катода.

7. Методика выполнения заданий

Задание 1. Получение вольт-амперных характеристик вакуумного диода при различных токах накала катода, определение величины токов насыщения

1. Подключить кассету ФПЭ-06 соединительным кабелем к источнику питания ИП (рис. 4.1).

2. Установить ток накала $I_A = 1,3$ А.

3. Увеличивая анодное напряжение u_A от 10 до 100 В через каждые 10 В, записать соответствующие значения анодного тока в табл. 7.1. Показания снимать, убедившись в правильном показании тока накала непосредственно в момент измерения анодного тока.

4. Установить последовательно ток накала $I_H = 1,4; 1,5; 1,6; 1,7$ А и для каждого значения I_H провести измерения по п. 3.

5. Для каждого значения тока накала построить вольт-амперную характеристику и точку перегиба на каждой кривой считать точкой насыщения (I_S).

Задание 2. Определение работы выхода электрона из материала катода

1. По графику зависимости температуры катода T от тока накала I_H (рис. 3.4) определить температуру катода для каждого значения I_H .

2. Рассчитать плотность анодного тока насыщения по формуле $j_S = I_S / S$. Величина тока насыщения I_S определяется из п. 5, площадь катода принять $S = 11$ мм².

3. Все полученные данные занести в табл. 7.2.

4. Построить график зависимости $\lg j_S / T^2$ от $1/T$, откладывая по оси абсцисс $1/T$, а по оси ординат $\lg j_S / T^2$.

5. Определить тангенс угла наклона полученной прямой к оси абсцисс и рассчитать работу выхода по формуле (3.6). Тангенс угла наклона определяется как отношение катетов $\Delta(\lg j_s/T^2)$ к $\Delta(1/T)$.

Таблица 7.1

u_A	I_A				
	$I_H = 1,3 \text{ A}$	$I_H = 1,4 \text{ A}$	$I_H = 1,5 \text{ A}$	$I_H = 1,6 \text{ A}$	$I_H = 1,7 \text{ A}$

Таблица 7.2

№ п/п	$I_H, \text{ A}$	$I_S, \text{ mA}$	$T, \text{ K}$	$1/T, \text{ K}^{-1}$	$j_S, \text{ mA/m}^2$	j_S/T^2	$\lg(j_S/T^2)$
1							
2							
3							
4							

Контрольные вопросы

1. Подчиняется ли зависимость анодного тока от анодного напряжения для вакуумного диода закону Ома? Почему?
2. Какова причина насыщения тока в вакуумном диоде?
3. Что называют работой выхода электрона из металла?
4. В чем состоит явление электронной эмиссии?
5. Объясните качественно зависимость тока насыщения от температуры катода. Каким законом эта зависимость описывается?
6. Какие измерения необходимы для определения работы выхода электрона?

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) номер, название и цель лабораторной работы;
- 2) краткие основные теоретические положения;
- 3) результаты исследований и расчетов в виде таблиц и графиков;
- 4) окончательный результат (значение работы выхода) и выводы.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- овладел знаниями о природе явления электронной эмиссии металлов, понятием работы выхода электрона из металла, знанием законов термоэлектронной эмиссии;
- правильно выполнил экспериментальную и расчетную части работы;
- правильно построил графики $I_A(U_A)$, $\lg(j_S/T^2)$ от $1/T$;
- составил отчет, соответствующий требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М.: Академия, 2014. С. 243–245.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Академия, 2014. С. 191–193.

Лабораторная работа № 37

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА

1. Цель работы

Изучение заряда и разряда конденсатора, вычисление времени релаксации различными способами и сравнение с теоретическими значениями.

2. Задачи

1. Усвоение теоретических основ переходных процессов в цепях с конденсатором.
2. Приобретение навыков правильной эксплуатации электроизмерительных приборов.
3. Приобретение навыков графической обработки экспериментальных результатов.

3. Теоретическая часть

Многие характеристики постоянного тока сохраняются и для квазистационарных токов. *Квазистационарные токи* – это медленно меняющиеся токи. Величина таких медленно меняющихся токов в каждый момент времени остается одинаковой во всех сечениях неразветвленной проводящей цепи. Мгновенное состояние квазистационарных токов достаточно точно определяется законом Ома и правилами Кирхгофа, и тем точнее, чем медленнее меняются токи.

В качестве примера квазистационарных токов рассмотрим процессы заряда и разряда конденсатора в электрической цепи, содержащей последовательно соединенные конденсатор C , сопротивление R (включающие и внутреннее сопротивление источника) и источник ЭДС ε (рис. 3.1).

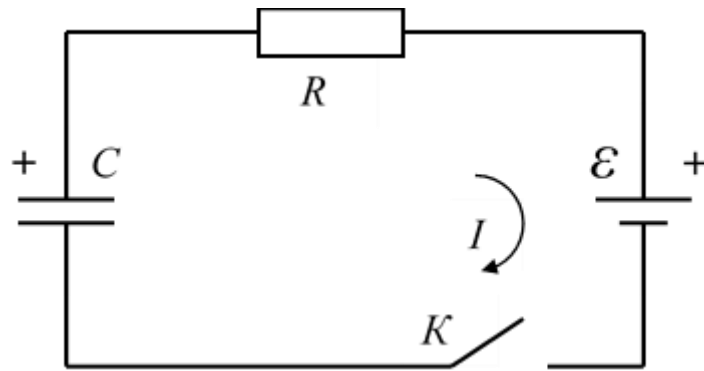


Рис. 3.1. Электрическая цепь процессов заряда и разряда конденсатора

Пусть I , q , U – мгновенные значения тока, заряда и разности потенциалов между обкладками конденсатора. Так как токи и напряжения удовлетворяют условиям квазистационарности, то соотношение I , q и U такое же, как и в цепях постоянного тока.

Рассмотрим сначала процесс заряда конденсатора. В начальный момент времени ($t = 0$) замкнем ключ K , и в цепи пойдет ток, заряжающий конденсатор. Применим закон Ома к цепи (рис. 3.1):

$$IR = \varepsilon - U. \quad (3.1)$$

Учитывая, что разность потенциалов на пластинах конденсатора $U = q/C$ и сила тока $I = dq/dt$, то выражение (3.1) можно записать в виде:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon - q/C}{R}, \quad (3.2)$$

где q – заряд конденсатора.

Разделим переменные и проинтегрируем это уравнение с учетом начального условия: при $t = 0$, $q = 0$:

$$\int_0^q \frac{Rdq}{\varepsilon - q/C} = \int_0^t dt,$$

$$RC \ln(\varepsilon - q/C) = -t.$$

Отсюда

$$q = q_m (1 - e^{-\frac{t}{RC}}), \quad (3.3)$$

где $q_m = \varepsilon C$ – максимальная величина заряда на конденсаторе.

Напряжение на конденсаторе будет изменяться по закону:

$$U = \frac{q}{c} = \varepsilon(1 - e^{-\frac{t}{RC}}). \quad (3.4)$$

Закон изменения тока в цепи можно получить дифференцированием (3.3) по времени:

$$I = \frac{dq}{dt} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (3.5)$$

где $I_0 = \varepsilon/R$.

Графики зависимостей $q(t)$ и $I(t)$ представлены на рис. 3.2, по которому видно, что сила тока имеет наибольшее значение в начальный момент времени и асимптотически стремится к нулю в процессе заряда, а заряд на обкладках конденсатора возрастает от нуля до максимального значения.

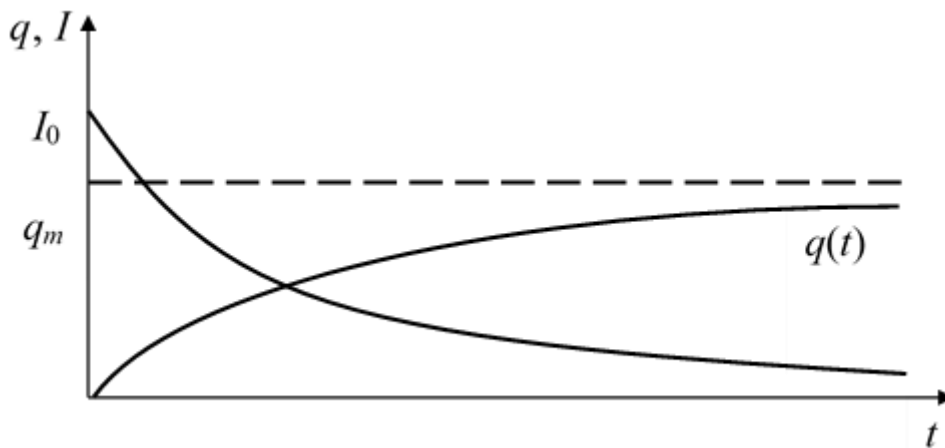


Рис. 3.2. Графики зависимостей $q(t)$ и $I(t)$

Рассмотрим процесс заряда конденсатора емкостью C , пластины которого замкнуты сопротивлением R (рис. 3.3).

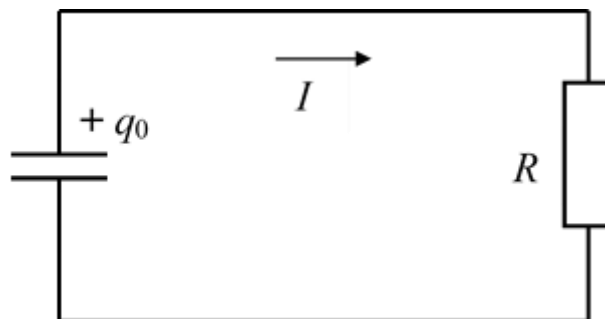


Рис. 3.3. Принципиальная схема для изучения процессов разряда и заряда конденсатора

Пусть dq – уменьшение заряда конденсатора за время dt . При разряде конденсатора в цепи протекает ток $I = -\frac{dq}{dt}$. В это выражение входит знак минус, т. к. выбранное нами положительное направление тока соответствует уменьшению заряда конденсатора. Известно, что $q = CU$, где U – разность потенциалов на конденсаторе, а следовательно, и на сопротивлении R . По закону Ома имеем $U = IR$, тогда:

$$-\frac{dq}{dt} = \frac{U}{R} = \frac{q}{CR}. \quad (3.6)$$

Это выражение показывает, что скорость уменьшения заряда конденсатора пропорциональна величине заряда. Интегрируем (3.6) при начальных условиях $t = 0$, $q = q_0$, получим:

$$\int_{q_0}^q \frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt,$$

откуда

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (3.7)$$

Зависимость заряда от времени является экспоненциальной, и график этой зависимости приведен на рис. 3.4. Закон изменения напряжения на конденсаторе в процессе разряда аналогичен (3.7):

$$U(t) = \frac{q}{C} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (3.8)$$

где $U_0 = q_0 / C$.

Отсюда видно, что напряжение на конденсаторе уменьшается и асимптотически стремится к нулю. Таков же характер изменения тока при разряде.

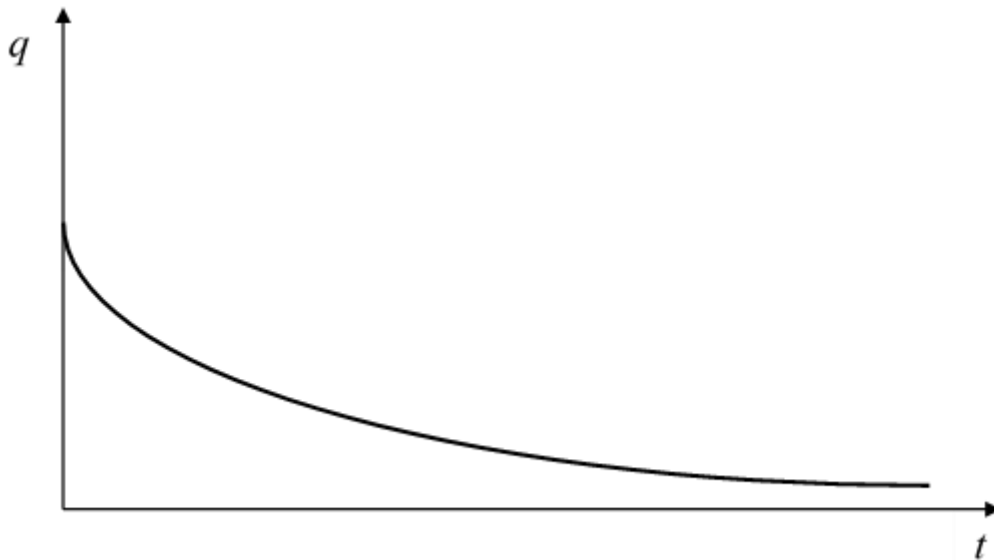


Рис. 3.4. График зависимости заряда от времени

Полученные выражения показывают, что процессы заряда и разряда происходят не мгновенно, а с конечной скоростью. Для рассмотрения контура, содержащего сопротивление и емкость, скорость установления зависит от произведения $\tau = RC$, которое имеет размерность времени и называется постоянной времени, или *временем релаксации* τ . Постоянная времени показывает, через какое время после выключения ЭДС напряжение и заряд конденсатора уменьшится в e раз. Если R и C выразить в единицах системы СИ (омах и фарадах), то τ будет выражено в секундах.

Для определения τ необходимо измерить время, за которое величина заряда уменьшится до половины первоначального значения $t_{1/2}$. Это время определяется из выражения:

$$e^{-\frac{t_{1/2}}{RC}} = 1/2. \quad (3.9)$$

Прологарифмировав обе части уравнения (3.9), получим

$$t_{1/2} = RC \ln 2 = 0,693RC. \quad (3.10)$$

То есть чтобы определить постоянную времени, нужно измерить $t_{1/2}$ и умножить полученную величину на 1,44.

Так как экспонента асимптотически приближается к оси абсцисс, то точно установить окончание процесса разряда конденсатора (так же, как и процесса заряда) не удастся. Поэтому следует измерить время $t_{1/2} = 0,693 RC$, за которое заряд на обкладках конденсатора уменьшился в 2 раза (рис. 3.5).

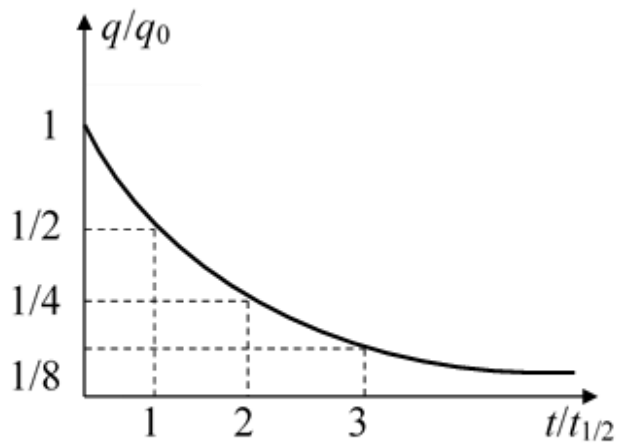


Рис. 3.5. График зависимости заряда от времени

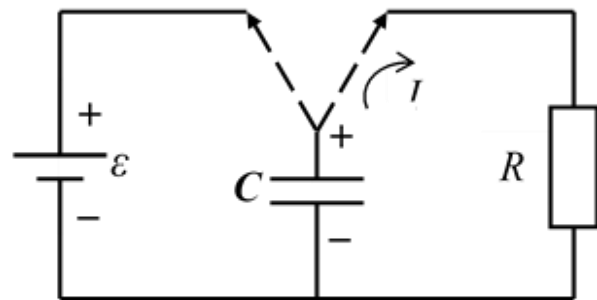


Рис. 3.6. Принципиальная схема установки

Если обкладки конденсатора попеременно подключать к источнику тока и к сопротивлению R (рис. 3.6), то график заряда – разряда конденсатора будет иметь вид, показанный на рис. 3.7. Эти процессы можно наблюдать с помощью осциллографа, подавая на вход Y напряжение конденсатора C .

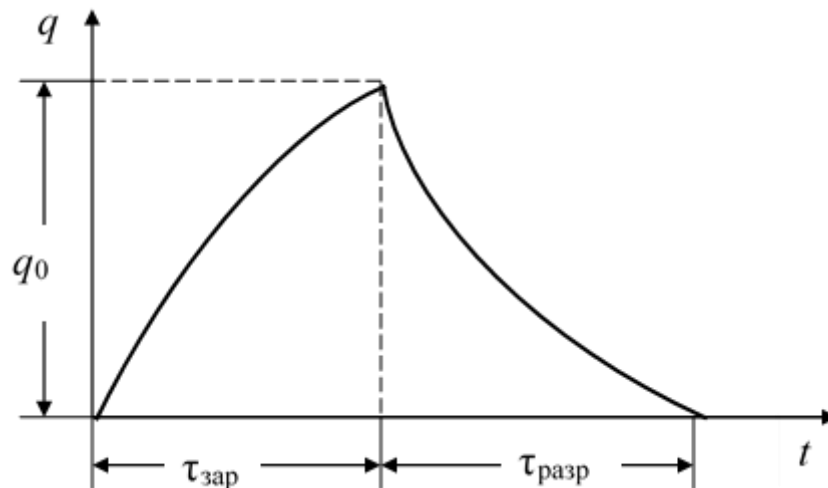


Рис. 3.7. График заряда – разряда конденсатора

4. Экспериментальная часть

4.1. Приборы и оборудование

1. PQ – звуковой генератор.
2. MC – магазин сопротивлений.
3. ME – магазин емкостей.
4. PO – электронный осциллограф.

4.2. Описание установки

Установка состоит из источника постоянного тока ИП, генератора низкочастотных импульсов (звукового генератора), двух магазинов сопротивлений R_1 и R_2 , магазина емкостей C и электронного осциллографа (рис. 4.1).

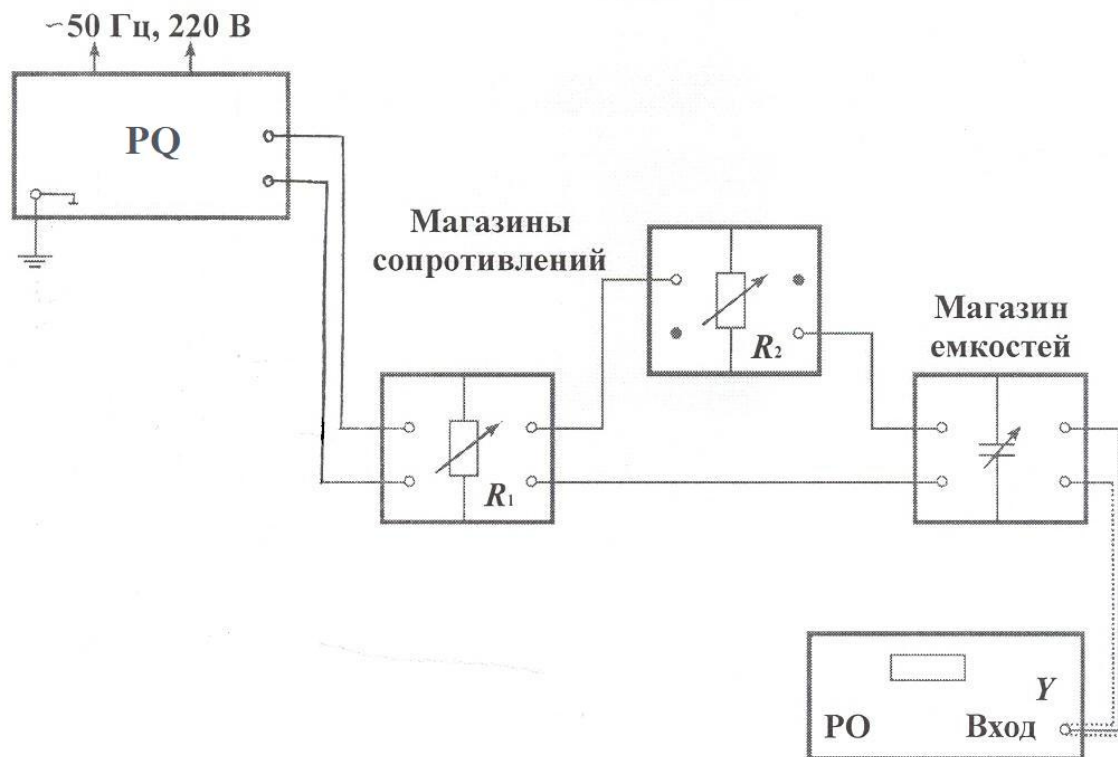


Рис. 4.1. Схема установки для изучения процессов заряда и разряда конденсатора

Подаваемый с выхода генератора прямоугольный импульс через магазин сопротивлений R_2 подается на магазин емкостей C . Конденсатор заряжается. Время заряда конденсатора C можно изменять сопротивлением R_2 . В момент паузы происходит разряд конденсатора по цепи $R_1 - R_2 - C$. Время разряда определяется параметрами этой цепи.

Визуально процесс заряда – разряда конденсатора можно наблюдать на экране осциллографа. Наиболее устойчивый режим работы данной схемы обеспечивается при изменении номинальной величины элементов цепи в следующих пределах:

$$C = 0,02 \dots 0,04 \text{ мкФ};$$

$$\nu_{\text{ген}} = 2 \text{ кГц};$$

$$R_1 = 0,3 \div 0,5 \text{ кОм};$$

$$R_2 = 4 \div 6 \text{ кОм}.$$

Наблюдаемые при этом кривые заряда и разряда изображены на рис. 3.7.

5. Требования по технике безопасности

Для электропитания лабораторной установки используется сетевое напряжение ≈ 220 В. Все токоведущие части установки закрыты, что исключает их случайное касание.

При выполнении работы необходимо:

1. Внимательно ознакомиться с заданием и оборудованием;
2. Визуально проверить целостность изоляции токоведущих проводов;
3. Не оставлять без присмотра включенную лабораторную установку;
4. Не загромождать рабочее место посторонними предметами и оборудованием, не относящимися к выполняемой работе;
5. О замеченных неисправностях немедленно сообщить преподавателю;
6. По окончании работы отключить установку от сети, привести в порядок рабочее место.

6. Задания

1. Снять по точкам кривые заряда и разряда конденсатора с экрана осциллографа.
2. Определить различными методами время релаксации для заданных параметров электрической цепи.

7. Методика выполнения заданий

Задание 1

1. Проверить правильность соединений в электрической цепи рис. 4.1.
2. Подготовить звуковой генератор и электронный осциллограф к работе:
 - а) установить на генераторе частоту 2 кГц;
 - б) включить развертку электронного усилителя канала А осциллографа и установить частоту развертки, удобную для наблюдения сигналов частотой 2 кГц;
 - в) установить на экране осциллографа устойчивую картину.

3. Установить на магазине сопротивлений R_1 ориентировочное значение $R_1 = 300$ Ом (уточнить у преподавателя).

4. Установить на магазине сопротивлений R_2 ориентировочное значение $R_2 = 4$ кОм (уточнить у преподавателя).

5. Установить на магазине емкостей ориентировочное значение $C = 2 \cdot 10^{-3}$ мкФ (уточнить у преподавателя).

6. Установить частоту развертки, чтобы на экране уместилась полная кривая заряда и разряда конденсатора.

7. Совместить начало кривой заряда с началом шкалы осциллографа.

8. Снять зависимость $U = f(t)$, измеряя t в секундах, а U – в вольтах. Записать 8–10 значений t и U для кривой заряда и столько же для кривой разряда конденсатора. Результаты занести в таблицу.

Построить кривые заряда и разряда конденсатора.

Задание 2

1. По кривым заряда и разряда конденсатора определить время, за которое величина напряжения падает до половины первоначального значения, и по формуле (3.10) вычислить время релаксации $\tau = RC$.

2. Вычислить постоянную времени RC , используя значение параметров RC – цепи. Учесть, что при заряде конденсатора $R = R_2$, а при разряде $R = R_1 + R_2$. Рассчитать отношение $t_{1/2}$ к RC для всех случаев по формуле:

$$A = \frac{t_{1/2}}{RC}. \quad (7.1)$$

3. Сравнить величину A с теоретическим значением, равным $\ln 2 = 0,693$.

4. Логарифмируя формулу (3.8), получим $\ln \frac{U_0}{U(t)} = \frac{t}{RC}$.

По данным табл. 7.1 построить логарифмическую зависимость, характеризующую изменение напряжения на конденсаторе от времени t при разряде конденсатора. Котангенс угла наклона полученной прямой есть характеристическое время релаксации заряда, или постоянная времени RC :

$$ctctg\alpha = \tau = RC. \quad (7.2)$$

Сравнить результаты, полученные для значений τ первым и вторым способами.

Таблица 7.1

	Заряд конденсатора	Разряд конденсатора
x , дел		
t , с		
Y , дел		
U , В		
$\ln \frac{U_0}{U}$	X	

где x – координата точки по оси x ; $t = K_x x$, K_x – цена деления шкалы осциллографа, устанавливаемая переключателем «Время/дел»; Y – координата точки по оси y ; $U = K_y Y$, K_y – цена деления шкалы осциллографа, устанавливаемая переключателем «Вольт/дел»; U_0 – наибольшее значение напряжения на конденсаторе.

Контрольные вопросы

1. Какие токи называются квазистационарными?
2. Что такое «кривая релаксации заряда»?
3. Получить зависимость заряда конденсатора от времени при его разряде, заряде.
4. Как определяется время релаксации τ ?
5. Описать блок-схему установки.
6. Какова зависимость напряжения на конденсаторе U и тока в цепи I от времени, т. е. $U(t)$ и $I(t)$, в процессе заряда и разряда конденсатора?

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) номер, название и цель работы;
- 2) основные теоретические положения;
- 3) принципиальную схему лабораторной установки;
- 4) графики $U(t)$ для заряда и разряда конденсатора; график зависимости $\ln(U_0/U)(t)$;
- 5) расчет времени релаксации по t и по наклону прямой $\ln(U_0/U)(t)$ и сравнение с теоретическим значением;
- 6) вывод по результатам работы.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- овладел знаниями о квазистационарных токах и методах расчета цепей с конденсатором;
- правильно выполнил экспериментальную, графическую и расчетную части работы;
- составил отчет, соответствующий требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Электричество. М.: Академия, 2014.
2. Калашников Г. С. Электричество. М.: Физматлит, 2009.

Лабораторная работа № 38

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

1. Цель работы

Изучение электрического поля в диэлектриках и определение диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков.

2. Задачи

1. Усвоение основных характеристик электрического поля в диэлектриках.

2. Овладение одним из методов измерения емкости конденсаторов и определение диэлектрической проницаемости.

3. Приобретение навыков правильной эксплуатации приборов и оборудования современной физической лаборатории, обработки и интерпретации результатов эксперимента.

3. Теоретическая часть

3.1. Типы диэлектриков

Диэлектриками называют вещества, которые при обычных условиях практически не проводят электрический ток.

Согласно представлениям классической физики в диэлектриках, в отличие от проводников, нет свободных носителей тока — заряженных частиц, которые могли бы под действием электрического поля прийти в упорядоченное движение и образовать электрический ток проводимости.

К диэлектрикам относят все газы, если они не подвергались ионизации, некоторые жидкости (дистиллированная вода, бензол и др.) и твердые тела (фарфор, слюда и др.).

Диэлектрики подразделяют на три основные группы.

К *полярным диэлектрикам* (H_2O , NH_3 , CO и др.) относят вещества, молекулы которых имеют асимметричное строение, т. е. центры положительных и отрицательных зарядов не совпадают (положительный заряд ядер и отрицательный заряд электронов находятся в различных точках пространства). Такие молекулы можно рассматривать как электрический диполь (два равных по модулю и противоположных по знаку электрических заряда, расположенных на

некотором расстоянии друг от друга) с электрическим моментом $\vec{p} = |q| \cdot \vec{l}$ (рис. 3.1). Вектор, направленный по оси диполя от отрицательного заряда к положительному и равный расстоянию между ними, называется плечом диполя \vec{l} . Вектор, совпадающий по направлению с плечом диполя и равный произведению заряда $|q|$ на плечо \vec{l} , называют *электрическим моментом диполя*, или *дипольным моментом*.

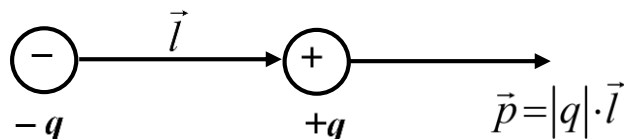


Рис. 3.1. Электрический диполь

К *неполярным диэлектрикам* относят вещества (N_2 , CO_2 , H_2 и др.), молекулы которых имеют симметричное строение, т. е. центры положительных и отрицательных зарядов совпадают, и их дипольный момент равен нулю.

Третью группу диэлектриков составляют вещества ($NaCl$, KCl , KBr и др.), молекулы которых имеют ионное строение. В таких диэлектриках дипольные моменты отсутствуют.

3.2. Поляризация диэлектриков

В отсутствие внешнего электрического поля дипольные моменты отдельных молекул диэлектриков либо равны нулю (для неполярных диэлектриков), либо вследствие теплового движения ориентированы хаотично (для полярных диэлектриков), так что в обоих случаях суммарный дипольный момент любого достаточно большого объема диэлектрика равен нулю.

Во внешнем электрическом поле диэлектрик поляризуется. Диэлектрик поляризован, если он имеет результирующий дипольный момент, отличный от нуля. Механизм поляризации различен для различных диэлектриков.

Электронная поляризация возникает в диэлектриках, состоящих из неполярных молекул. Если поместить такой диэлектрик во внешнее электрическое поле, то положительные заряды будут смещаться по направлению вектора напряженности электрического

поля \vec{E} , а отрицательные – в противоположном направлении. В результате неполярные молекулы приобретут наведенный (индуцированный) дипольный момент, направленный вдоль внешнего поля, т. е. диэлектрик поляризуется (рис. 3.2). Дипольный момент молекул пропорционален напряженности внешнего поля \vec{E}

$$\vec{p} = \alpha \varepsilon \vec{E}, \quad (3.1)$$

где α – поляризуемость молекулы, зависящая только от объема молекулы.



Рис. 3.2. Электронная поляризация:

a – внешнее поле отсутствует; *б* – молекула диэлектрика во внешнем электрическом поле

Ионная поляризация возникает в диэлектриках с ионными кристаллическими решетками. При помещении диэлектрика во внешнее электрическое поле подрешетки положительных ионов смещаются по направлению напряженности электрического поля E , а отрицательных – против поля. В результате возникают индуцированные дипольные моменты, ориентированные по полю.

В целом процессы электронной и ионной поляризации сходны между собой. Оба эти явления можно рассматривать как разновидность деформационной поляризации, представляющей собой сдвиг зарядов друг относительно друга. На деформационную поляризацию не оказывает влияния температура. Данный вид поляризации не вызывает возникновения диэлектрических потерь и отличается большой скоростью установления состояния поляризации.

Ориентационная (дипольная) поляризация диэлектрика с полярными молекулами заключается в ориентации имеющихся дипольных моментов молекул по полю. На диполь в электрическом поле действует пара сил, разворачивающая дипольный момент в направлении поля (рис. 3.3). Тепловое движение разориентирует

диполи. Поэтому эта ориентация тем сильнее, чем больше напряженность электрического поля и ниже температура.

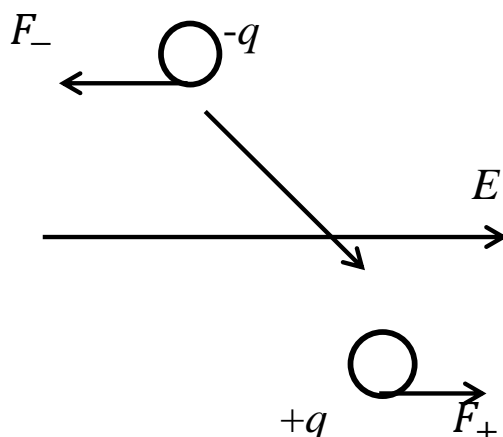


Рис. 3.3. Ориентационная поляризация

Степень поляризации диэлектрика характеризуется векторной величиной, называемой поляризованностью, которая определяется как дипольный момент единицы объема диэлектрика.

$$\vec{P} = \sum_i \vec{p} / V, \quad (3.2)$$

где $\sum_{i=1}^n \vec{p}_i$ – суммарный дипольный момент всех молекул диэлектрика в объеме V ; \vec{p}_i – дипольный момент i -ой молекулы.

Поляризованность изотропного диэлектрика любого типа связана с напряженностью поля соотношением

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}, \quad (3.3)$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость вещества; ϵ_0 – электрическая постоянная.

Диэлектрическая восприимчивость вещества характеризует способность диэлектрика к поляризации. Она не зависит от температуры у неполярных диэлектриков и ионных кристаллов и обратно пропорциональна абсолютной температуре у полярных диэлектриков.

3.3. Электрическое поле в диэлектрике

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле E_0 происходит его поляризация, которая сопровождается появлением поверхностных связанных зарядов (связанными называют заряды,

входящие в состав диполей диэлектрика) на его границах (рис. 3.4). Поверхностная плотность связанных зарядов σ' определяет поляризованность диэлектрика $P = \sigma'$.

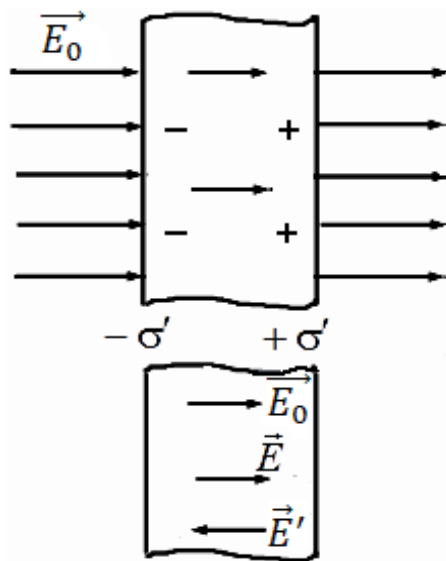


Рис. 3.4. Диэлектрик во внешнем электрическом поле

Появление связанных зарядов приводит к возникновению внутри диэлектрика дополнительного электрического поля с напряженностью $E' = \frac{\sigma'}{\epsilon_0}$ (поле, созданное двумя бесконечными заряженными плоскостями, т. е. гранями), которое направлено против внешнего поля E_0 , создаваемого свободными зарядами (внешними по отношению к диэлектрику), и ослабляет его.

Результирующее поле внутри диэлектрика E меньше, чем внешнее поле E_0 .

$$E = E_0 - E' = E_0 - \frac{\sigma'}{\epsilon_0}. \quad (3.4)$$

С учетом $P = \sigma' = \epsilon_0 \chi E$ получим

$$E = E_0 - \chi E, \quad E = \frac{E_0}{1 + \chi} = \frac{E}{\epsilon}. \quad (3.5)$$

Величина, показывающая, во сколько раз поле в вакууме больше, чем поле в диэлектрике, называется *диэлектрической проницаемостью вещества* $\epsilon = \frac{E_0}{E}$. Диэлектрическая проницаемость

связана с диэлектрической восприимчивостью вещества: $\varepsilon = 1 + \chi$. Она характеризует электрические свойства диэлектрика, т. е. способность диэлектрика к поляризации.

Вектор напряженности \vec{E} , пересекая границу диэлектриков, претерпевает скачкообразные изменения, поскольку определяется как свободными, так и связанными зарядами. Поэтому для характеристики электрического поля в диэлектрике вводят вектор электрического смещения, который для электрически изотропной среды равен $\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$.

Используя (3.1) и (3.2), можно записать

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \text{ Кл/м}^2.$$

Если напряженность электрического поля создается всеми зарядами, поляризованность – только связанными, то электрическое смещение определяется только свободными зарядами, $D = \sigma$ (σ – поверхностная плотность связанных зарядов) и таким образом показывает, какое поле было бы в вакууме: $D = \varepsilon_0 E_0 = \varepsilon \varepsilon_0 E_0$ (если поле нормально границе диэлектрика).

В данной работе определяется диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков (оргстекло, текстолит, гетинакс и стекло), которая является одной из их электрических характеристик.

4. Экспериментальная часть

4.1. Приборы и принадлежности

Для измерения относительной диэлектрической проницаемости применяется схема, изображенная на рис. 4.1.

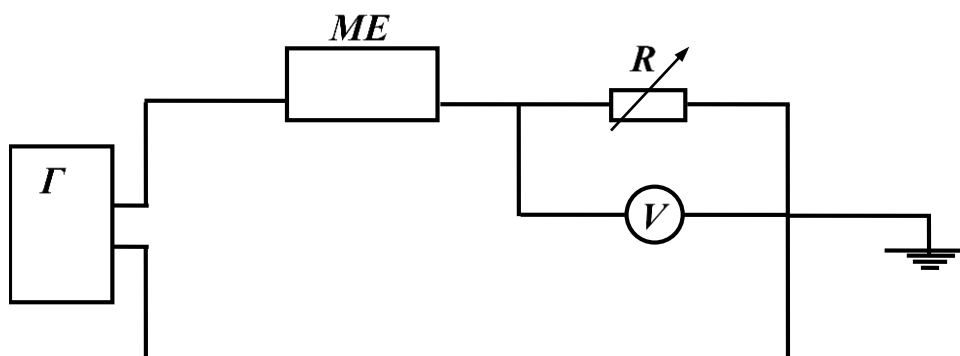


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки:

Г – генератор синусоидальных колебаний; МЕ – набор эталонных конденсаторов и набор исследуемых конденсаторов; R – переменное

4.2. Теория метода

Эквивалентная схема электрической цепи для измерения диэлектрической проницаемости представлена на рис. 4.2.

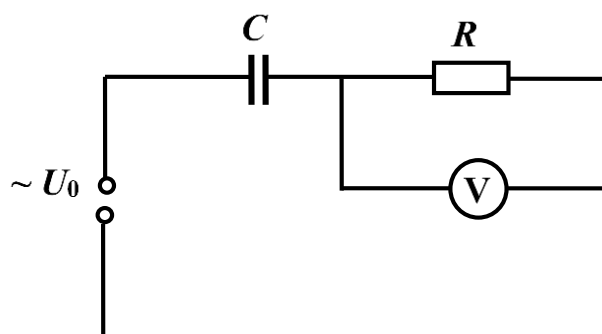


Рис. 4.2. Схема электрической цепи

Реактивное сопротивление конденсатора цепи переменного синусоидального тока определяется выражением

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C}, \quad (4.1)$$

где C – емкость конденсатора; ν – частота переменного напряжения (тока); $\omega = 2\pi\nu$.

Величину переменного тока можно определить по закону Ома, обобщенному для цепей переменного тока:

$$I = \frac{u_0}{Z}, \quad Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} \quad (4.2)$$

или

$$I = \frac{u_0}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} = \frac{u_0}{R}, \quad (4.3)$$

где u_0 – напряжение на выходе генератора; Z – полное сопротивление цепи; R – активное сопротивление; u – падение напряжения на активном сопротивлении, регистрируемое цифровым вольтметром.

Возведя выражение (4.3) в квадрат, получим

$$\frac{u^2}{R^2} = \frac{u_0^2}{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}, \quad (4.4)$$

откуда

$$C = \frac{u}{\omega R \sqrt{u_0^2 - u^2}}.$$

Используя формулу для расчета емкости плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \quad (4.5)$$

можно получить выражение для вычисления диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon = \frac{ud}{2\pi \nu \varepsilon_0 S R \sqrt{u_0^2 - u^2}}. \quad (4.6)$$

Если величины R и C подобрать таким образом, чтобы в используемом диапазоне частот выполнялось условие

$$R \ll \frac{1}{\omega C}, \quad (4.7)$$

то значением u в подкоренном выражении соотношения (4.7) можно пренебречь, т. к. $u \ll u_0$.

Тогда выражение (4.7) можно упростить и представить в виде

$$\varepsilon = \frac{ud}{2\pi \nu \varepsilon_0 R u_0 S}. \quad (4.8)$$

В данной работе исследуют конденсаторы с различными твердыми диэлектриками (оргстекло, текстолит, стекло, гетинакс). Для определения емкости исследуемых конденсаторов необходимо построить градуированный график. Для этого используют эталонные конденсаторы известной емкости с керамическими диэлектриками (их емкость не зависит от частоты до 10^5 Гц). Значения R , ω , C выбраны так, что выполняется условие $R \ll \frac{1}{\omega C}$ ($R = 1$ кОм, $\nu = \frac{\omega}{2\pi} = 5 \cdot 10^3$ Гц, $C = 450 \div 1260$ пФ).

Тогда формула (4.6) упрощается и принимает вид

$$C = \frac{u}{\omega R u_0}. \quad (4.9)$$

При постоянных ω , R , u_0 сигнал на вольтметре будет линейно зависеть от емкости C . Номера клавиш 1–4 на приборе соответствуют номерам эталонных конденсаторов в табл. 7.1, а следующие клавиши соответствуют исследуемым конденсаторам C_{oc} (оргстекло), C_T (гетинакс), C_T (текстолит), C_c (стекло).

5. Требования по технике безопасности

1. Прежде чем приступить к работе, внимательно ознакомьтесь с заданием и оборудованием.
2. Проверьте заземление лабораторной установки и изоляцию токоведущих проводов. Немедленно сообщите преподавателю или лаборанту о замеченных неисправностях.
3. Не загромождайте свое рабочее место оборудованием, не относящимся к выполняемой работе.
4. Не оставляйте без присмотра свою лабораторную установку, это может привести к несчастному случаю.
5. По окончании работ приведите в порядок свое рабочее место. Обесточьте приборы.

6. Задания

1. Измерить зависимости напряжения на обкладках эталонных конденсаторов от их емкости и построить градуировочный график $u = f(c)$.
2. Измерить напряжение на конденсаторах с исследуемыми диэлектриками и определить с помощью градуировочного графика их емкость.
3. Вычислить диэлектрическую проницаемость исследуемых диэлектриков и сравнить полученные значения с табличными.

7. Методика выполнения заданий

1. Включить лабораторный стенд и приборы в сеть. Прогреть приборы в течение 5 мин.
2. Установить на выходе генератора максимальное значение выходного напряжения u_0 .
3. Установить на генераторе частоту 5000 Гц.
4. Для проведения измерения с помощью универсального цифрового вольтметра подключить кабель к гнездам uR , O , установить тумблер «Сеть» в положение вкл., нажать кнопки $u \sim$ и АВП.
5. Подключить эталонные конденсаторы, поочередно нажимая на клавиши 1, 2, 3, 4 кассеты, измерить соответствующие значения напряжения u_1, u_2, u_3, u_4 . Показания вольтметра занести в табл. 7.1.
6. Подключить конденсаторы с исследуемыми диэлектриками, поочередно нажимая на клавиши $C_{ос}$, C_T , $C_{т}$, C_c кассеты, измерить

соответствующие значения напряжения $u_{ГТ}$, $u_{ОС}$, $u_{С}$, $u_{Т}$. Показания вольтметра занести в табл. 7.2.

7. Построить градуировочный график $u = f(C)$, пользуясь табл. 7.1. Градуировочный график представляет собой зависимость напряжения эталонных конденсаторов от их емкости.

8. По градуировочному графику определить емкости конденсатора с исследуемыми диэлектриками. Результаты занести в табл. 7.2.

9. По формуле $\varepsilon = \frac{Cd}{S\varepsilon_0}$ рассчитать диэлектрическую проница-

емость исследуемых диэлектриков. Результаты занести в табл. 7.2.

Исследуемые конденсаторы имеют следующие параметры:

площадь обкладок – $S = 165 \text{ мм}^2$,

толщина диэлектрика – $d_{ОС} = 10 \text{ мкм}$ (оргстекло), $d_{Т} = 8,0 \text{ мкм}$ (текстолит), $d_{Г} = 18 \text{ мкм}$ (гетинакс), $d_{С} = 10 \text{ мкм}$ (стекло).

Электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

Таблица 7.1

Номер конденсатора	C, пФ	u, В
1	470	
2	750	
3	1000	
4	1500	

Таблица 7.2

u, В				C, пФ				E			
$u_{ГТ}$	$u_{ОС}$	$u_{С}$	$u_{Т}$	$C_{ГТ}$	$C_{ОС}$	$C_{С}$	$C_{Т}$	$\varepsilon_{ГТ}$	$\varepsilon_{ОС}$	$\varepsilon_{С}$	$\varepsilon_{Т}$

Контрольные вопросы

1. Какие вещества называются диэлектриками?
2. Что такое «электрический диполь»? Как определяется его дипольный момент?
3. Какая физическая величина служит количественной мерой поляризации диэлектрика?
4. Что общего и в чем различие поляризации диэлектриков с неполярными и полярными молекулами?
5. Что называется диэлектрической проницаемостью среды?

6. Какая связь существует между диэлектрической восприимчивостью и диэлектрической проницаемостью среды?

7. Почему диэлектрик ослабляет внешнее электрическое поле?

Ответ поясните с помощью рисунка.

8. Что такое «поляризованность»?

9. Как определяется вектор электрического смещения?

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) Ф.И.О., номер группы студента, выполнившего работу;
- 2) номер, название и цель работы;
- 3) краткие основные теоретические положения;
- 4) схему установки;
- 5) таблицы с результатами измерений и расчетов;
- 6) график зависимости напряжения эталонных конденсаторов от их емкости на миллиметровой бумаге;
- 7) сравнение полученных значений диэлектрической проницаемости с табличными значениями из справочной литературы;
- 8) выводы к работе.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- усвоил основные характеристики электрического поля в диэлектриках: поляризованность, напряженность, диэлектрическая проницаемость среды, вектор электрического смещения;
- выполнил измерения зависимости напряжения на обкладках конденсаторов от их емкости;
- правильно выполнил вычисления и получил достоверные значения диэлектрической проницаемости исследуемых диэлектриков;
- составил отчет, соответствующий предъявленным к нему требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе.

Список литературы

1. Детлаф А. А., Яворский В. М. Курс физики. М.: Академия, 2014.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Академия, 2014.
3. Савельев И. В. Курс физики. СПб.: Лань, 2016. Т. 2.

Лабораторная работа № 39

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ИСТОЧНИКА ТОКА КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

1. Цель работы

Изучение компенсационного метода измерения ЭДС, определение неизвестной ЭДС.

2. Задачи

1. Изучение законов постоянного тока.
2. Экспериментальное получение значения неизвестной ЭДС.

3. Теоретическая часть

Электрический ток представляет собой направленное движение электрических зарядов. Эти заряды называют *носителями тока*. Основной характеристикой электрического тока является сила тока. Это величина заряда, прошедшего через сечение проводника за единицу времени: $I = dq/dt$. Положительное направление тока совпадает с направлением движения положительно заряженных частиц.

Направленное движение зарядов возможно, если в проводнике существует электрическое поле. Если бы в электрической цепи действовали только электростатические силы, то положительные носители тока под действием этих сил перемещались бы от большего потенциала к меньшему и, таким образом, снижали больший и повышали меньший потенциал. Это привело бы к выравниванию потенциала во всех точках проводника и прекращению тока. В связи с этим для поддержания тока в течение достаточно длительного времени в электрической цепи наряду с участками, на которых положительные носители движутся в сторону убывания потенциала, должны быть участки, на которых перенос положительных зарядов происходит в направлении возрастания потенциала, т. е. против сил электростатического поля. Перемещение носителей на этих участках возможно лишь с помощью сил неэлектростатического происхождения, называемых *сторонними силами*.

Сторонние силы характеризуются работой, которую они совершают над перемещающимися по цепи зарядами.

Работа сторонних сил над единичным положительным зарядом называется *электродвижущей силой* (ЭДС)

$$\varepsilon = A_{\text{ст}} / q, \quad (3.1)$$

где $A_{\text{ст}}$ – работа сторонних сил; q – величина перемещаемого заряда.

Если на участке цепи между точками 1 и 2 действует ЭДС ε_{12} , а разность потенциалов электростатического поля между этими точками равна $\varphi_1 - \varphi_2$, то величина

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12} \quad (3.2)$$

называется *падением напряжения*, или просто *напряжением на данном участке*. Напряжение представляет собой суммарную работу электростатических и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда между концами участка цепи.

Опыт показывает, что напряжение на участке неразветвленной цепи равно произведению силы тока I на сопротивление участка R_{12}

$$U_{12} = IR_{12}. \quad (3.3)$$

Это равенство выражает закон Ома. Если цепь замкнута, то $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$, (т. к. начало и конец совпадают) и

$$\varepsilon = I(R + r), \quad (3.4)$$

где ε – ЭДС, действующая в замкнутой цепи; r – внутреннее сопротивление источника ЭДС; R – сопротивление внешней цепи.

При подключении вольтметра к клеммам источника ЭДС показания вольтметра окажутся равными

$$U = IR_V = \varepsilon - Ir. \quad (3.5)$$

Таким образом, с помощью вольтметра можно приблизительно определить величину ЭДС, если пренебречь падением напряжения Ir внутри источника.

Точное значение ЭДС можно определить с помощью компенсационного метода измерения ЭДС. Особенность этого метода состоит в том, что измерение ЭДС производится при нулевом токе через источник. На рис. 3.1 изображена принципиальная схема установки для измерения ЭДС компенсационным методом.

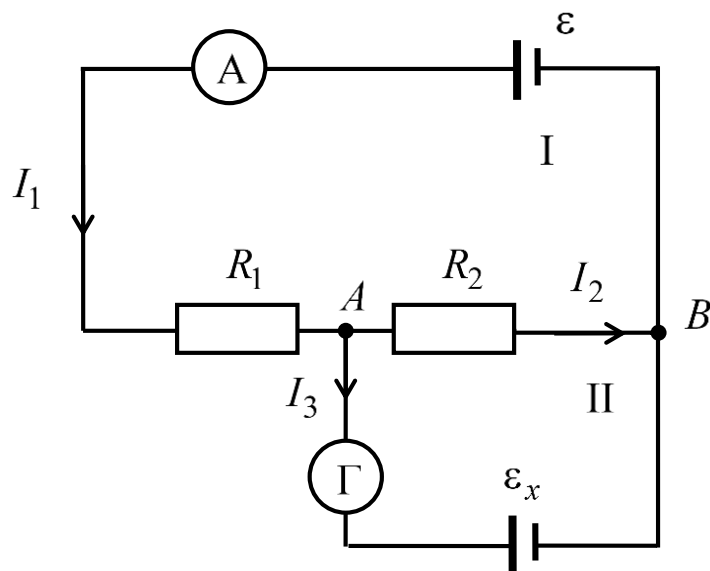


Рис. 3.1. Принципиальная схема установки для измерения ЭДС

Для расчета такой цепи требуется применить правила Кирхгофа.

Согласно *первому правилу Кирхгофа* алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле (точке разветвления проводов), равна нулю

$$\sum_{k=1}^N I_k = 0, \quad (3.6)$$

где N – число проводников, сходящихся в узле. Токи, входящие в узел и выходящие из него, берутся с противоположными знаками.

Это правило выражает закон сохранения электрического заряда: какое количество электричества за единицу времени вошло в узел – такое же должно выйти.

Второе правило Кирхгофа: в произвольном замкнутом контуре алгебраическая сумма произведений сил тока на сопротивления участков контура равна алгебраической сумме действующих в нем ЭДС

$$\sum_{k=1}^L I_k R_k = \sum_{m=1}^N \varepsilon_m, \quad (3.7)$$

где L – количество неразветвленных участков контура; N – число источников ЭДС в контуре.

Направление обхода контура, разбитого на L участков, по которым текут токи I_k , выбирается произвольно. Положительными считаются токи, текущие в направлении обхода. ЭДС ε_m берется со знаком «+», если обход контура производится от отрицательного

полюса к положительному, и со знаком « \rightarrow » – в противоположном случае. Это правило следует из закона Ома.

Схема на рис. 3.1 состоит из двух замкнутых контуров I и II. Между узлами A и B на участке, включающем неизвестную ЭДС и гальванометр, источники ε и ε_x действуют в противоположных направлениях, и, меняя величины сопротивлений R_1 и R_2 , можно добиться, чтобы ток через гальванометр обратился в нуль.

В соответствии с первым правилом Кирхгофа для узла A (или B)

$$I_1 = I_2, \quad (3.8)$$

т. к. $I_3 = 0$.

По второму правилу Кирхгофа для контура II

$$I_2 R_2 + 0 = \varepsilon_x. \quad (3.9)$$

Отсюда следует, что при отсутствии тока через гальванометр величина неизвестной ЭДС ε_x компенсируется падением напряжения на сопротивлении R_2 . В качестве гальванометра используют приборы с высокой чувствительностью, и компенсационный метод позволяет определить величину ЭДС с высокой точностью.

В данной работе используется более удобная для практического применения разновидность компенсационного метода измерения ЭДС (рис. 3.2). Здесь имеется возможность включать в контур II либо эталонную ЭДС ε_N , либо неизвестную ε_x .

Включив в контур источник с эталонной ЭДС ε_N при помощи ключа K_3 и перемещая на реохорде AB подвижный контакт C , можно добиться нулевого показания гальванометра, т. е. компенсации ЭДС ε_N падением напряжения на участке реохорда AC

$$\varepsilon_N = IR_{AC} = (I\rho l_N) / S, \quad (3.10)$$

где I – ток в цепи реохорда; ρ – удельное сопротивление материала реохорда; S – поперечное сечение; l_N – длина участка AC .

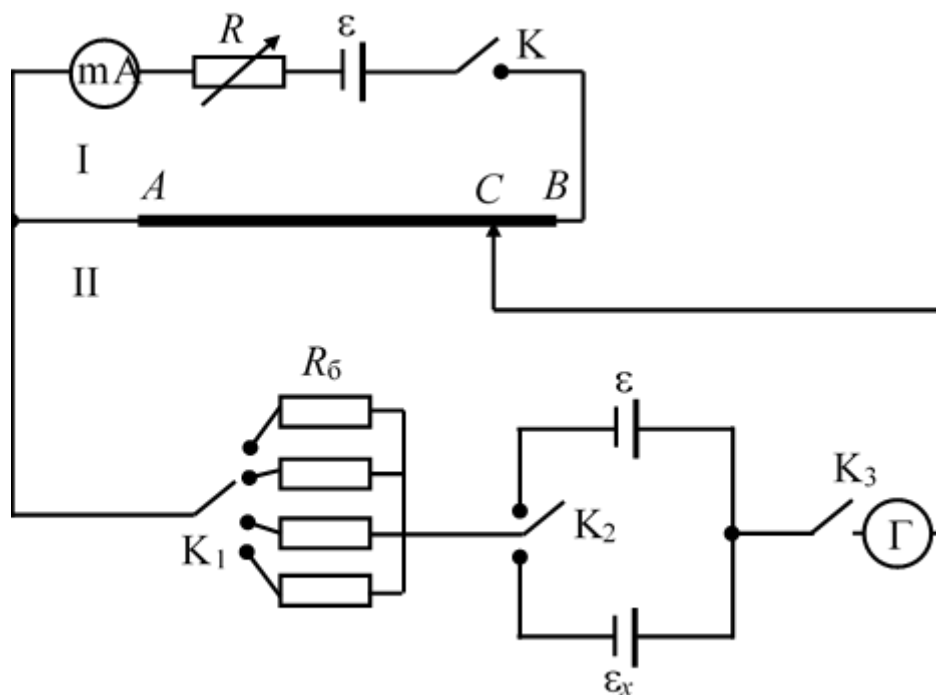


Рис. 3.2. Схема лабораторной установки для измерения ЭДС компенсационным методом

Если переключить ключ K_2 на неизвестную ЭДС ε_x , то получим

$$\varepsilon_x = IR_{AC} = (I\rho l_x) / S. \quad (3.11)$$

Из (3.10) и (3.11) следует соотношение

$$\varepsilon_x = (\varepsilon_N l_x) / l_N. \quad (3.12)$$

Таким образом, процесс измерения неизвестной ЭДС сводится к измерению длины участков AC , падение напряжения на которых приводит к компенсации ЭДС ε_N и ε_x .

4. Экспериментальная часть

Лабораторная установка (рис. 4.1) состоит из основания 1 с регулируемыми ножками 2, к которому крепятся блок питания 3 и стойка 4. На стойке 4 установлены два неподвижных кронштейна 5 и 6, к которым крепится нихромовый провод 7. Подвижный зажим 8 с контактом позволяет менять величину сопротивлений R_1 и R_2 (рис. 3.1). Длина провода отсчитывается по линейке 9, нанесенной на стойке 4.

На лицевой панели блока питания 3 расположены тумблер 10 включения установки в сеть, сигнальная лампочка 11, вольтметр 12, миллиамперметр 13, кнопки «мост-V-mA» (14) и «Сх1-Сх2» (15).

Переменный резистор 16 служит для изменения силы тока через реохорд 7.

На верхнюю панель блока 3 выведены ключи K_1 , K_2 , K_3 (см. рис. 3.2) и гальванометр Г.

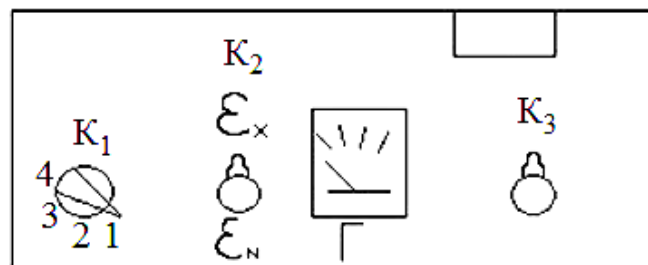
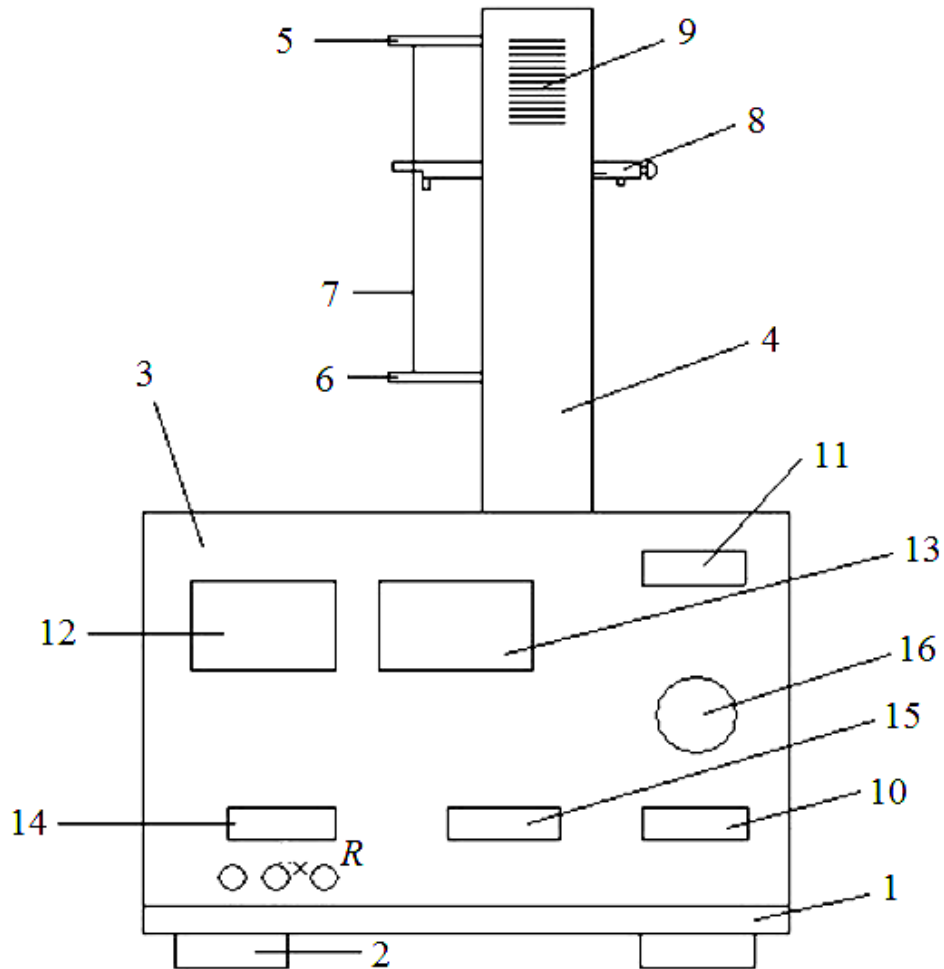


Рис. 4.1. Лабораторная установка

5. Требования по технике безопасности

Для электропитания лабораторной установки используется сетевое напряжение 220 В. Все токоведущие части установки, кроме реохорда, закрыты, что исключает их случайное касание.

При выполнении работы необходимо:

1. Внимательно ознакомиться с заданием и оборудованием;
2. Визуально проверить целостность изоляции токоведущих проводов;
3. Не оставлять без присмотра включенную лабораторную установку;
4. Не загромождать рабочее место посторонними предметами и оборудованием, не относящимся к выполняемой работе;
5. О замеченных неисправностях немедленно сообщить преподавателю;
6. По окончании работы отключить установку от сети, привести в порядок рабочее место.

6. Задание

Определить неизвестную ЭДС.

7. Методика выполнения задания

1. Нажать кнопку «V-мА» и отжать кнопку «Сх1-Сх2» на передней панели блока питания (рис. 4.1).
2. Установить галетный переключатель K_1 на верхней панели блока в положение 4 ($R_6 = 0$ кОм).
3. Установить ключ K_3 в вертикальное положение для отключения гальванометра, а ключ K_2 – в положение «от себя» для включения в цепь источника с эталонной ЭДС $\varepsilon_N = 1,0183$ В.
4. Повернуть ручку регулировки силы тока на передней панели блока против часовой стрелки до упора.
5. Нажать на передней панели блока питания кнопку «Сеть».
6. Установить зажим 8 (рис. 4.1) в верхней части реохорда 7. Определить его положение на стойке с помощью миллиметровой шкалы. Результат занести в графу l_N табл. 7.1.
7. Установить ключ K_3 в положение «от себя», включив таким образом гальванометр в цепь.
8. Изменяя силу тока ручкой 16 (рис. 4.1), добиться нулевого показания гальванометра.

9. Измерить силу тока по прибору 13 (рис. 4.1) и результат занести в графу I_N табл. 7.1. В таблицу заносят только результат измерения в положении 4 ключа K_1 .

10. Установить ключ K_2 в положение «к себе», т. е. включить в цепь источник с неизвестной ЭДС ε_x .

11. Перемещая зажим 8, добиться нулевого показания гальванометра. Если это не удастся при том же значении силы тока, что и в п. 9, изменить силу тока. Полученные значения положения зажима 8 и силы тока занести в табл. 7.1.

12. По окончании работы перевести ключи K_2 и K_3 в вертикальное положение.

13. Рассчитать величину ЭДС ε_x по формуле $\varepsilon_x = \varepsilon_N I_x \cdot l_x / I_N \cdot l_N$. Результат занести в табл. 7.1.

14. Ключ K_2 вернуть в положение «от себя». Поставить зажим 8 в другое положение и проделать вновь пп. 6–13.

15. Повторить п. 14 с новым положением зажима 8.

16. Усреднить полученные значения измеренной ЭДС и определить абсолютную и относительную погрешности в определении неизвестной ЭДС. Результаты занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

I_N	l_N	I_x	l_x	ε_x	$\Delta\varepsilon_x$	$\Delta\varepsilon_x/\varepsilon_x, \%$

Контрольные вопросы

1. Что называют электрическим током и каковы условия его существования?

2. Какие силы называют сторонними? В чем заключается их необходимость?

3. В чем состоит физический смысл напряжения на участке цепи?

4. Сформулируйте правила Кирхгофа. Для каких цепей они используются?

5. Объясните суть компенсационного метода измерения ЭДС. Почему он является наиболее точным?

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет должен содержать:

- 1) номер, название и цель работы;
- 2) краткий конспект теоретической части, включая расчетные формулы;
- 3) схематическое описание лабораторной установки и метода измерений;
- 4) таблицу с результатами измерений и вычислений;
- 5) вывод по результатам работы.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- овладел теоретическими знаниями о переносе электрического заряда;
- правильно выполнил экспериментальную и расчетную части работы;
- составил отчет, соответствующий требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 5 т. М.: Академия, 2014.
Т. 3.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. В 4 т. СПб.: Лань, 2014.
Т. 2.

Лабораторная работа № 41

ИЗУЧЕНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

1. Цель работы

Изучение газового разряда, измерение вольт-амперной характеристики газонаполненной лампы, определение ее напряжений зажигания и гашения, изучение релаксационных колебаний.

2. Задачи

1. Усвоение важного физического явления – электрического газового разряда.

2. Приобретение навыков правильной эксплуатации электроизмерительных приборов и оборудования современной физической лаборатории, получение экспериментальных зависимостей между физическими величинами.

3. Измерение электрофизических характеристик газонаполненной лампы.

3. Теоретическая часть

Прохождение электрического тока через газы называют *газовым разрядом*. Газы в нормальном состоянии являются изоляторами, носители тока в них отсутствуют. Лишь при создании особых условий в них появляются заряженные частицы (электроны, ионы) и возникает электрический разряд.

Различают несамостоятельную и самостоятельную проводимость газа. Несамостоятельный разряд имеет место, когда носители тока возникают под действием внешнего ионизатора. Если они появляются в результате процессов, обусловленных только электрическим полем, проводимость называют *самостоятельной*.

Под действием ионизатора в единице объема газа за секунду образуется Δn_i пар ионов. Наряду с ионизацией происходит рекомбинация ионов при их столкновении. Вероятность их встречи пропорциональна как числу положительных, так и числу отрицательных ионов. Таким образом, число Δn_r пар ионов, рекомбинирующих за 1 секунду в единице объема, пропорционально квадрату концентрации этих пар

$$\Delta n_r = rn^2, \quad (3.1)$$

где r – коэффициент рекомбинации; n – концентрация пар ионов.

В состоянии равновесия $\Delta n_i = \Delta n_r = r n^2$ и равновесная концентрация пар равна

$$n = \sqrt{(\Delta n_i / r)}. \quad (3.2)$$

Если пространство между электродами, на которые подано напряжение, заполнено газом, то часть ионов будет уходить на электроды, создавая ток. За 1 секунду из единицы объема газа на электроды уходит Δn_j пар ионов

$$\Delta n_j = \frac{j}{e \cdot l}, \quad (3.3)$$

где j – плотность тока; e – заряд иона; l – расстояние между электродами.

В равновесии

$$\Delta n_i = \Delta n_r + \Delta n_j. \quad (3.4)$$

Плотность тока обусловлена движением положительных и отрицательных ионов со скоростями v^+ и v^- соответственно

$$j = e \cdot n \cdot v^+ + e \cdot n \cdot v^- = e \cdot n (u^+ + u^-) E. \quad (3.5)$$

Здесь введено обозначение $u^\pm = \frac{v^\pm}{E}$ – подвижность носителей тока. При слабых полях плотность тока мала и $\Delta n_r \gg \Delta n_j$. Тогда

$$n \approx \sqrt{\frac{\Delta n_i}{r}} = \text{const} \text{ и}$$

$$j = \sqrt{\frac{\Delta n_i}{r}} e (u^+ + u^-) E. \quad (3.6)$$

Сравнивая выражение (3.6) с законом Ома

$$j = \sigma E, \quad (3.7)$$

можно определить удельную электропроводность газа

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Delta n_i}{r}} e (u^+ + u^-). \quad (3.8)$$

При сильных полях $r n^2 \ll \frac{j}{e \cdot l}$ и $\Delta n_i = \Delta n_j$

$$j \approx e \Delta n_i l. \quad (3.9)$$

Эта плотность тока образована всеми ионами, создаваемыми ионизатором в единицу времени.

Зависимость плотности тока от напряженности поля показана на рис. 3.1. При очень сильных полях ионы приобретают такую энергию, что сами могут ионизировать нейтральные атомы. Происходит лавинообразное размножение первичных ионов, созданных ионизатором, и плотность тока резко растет.

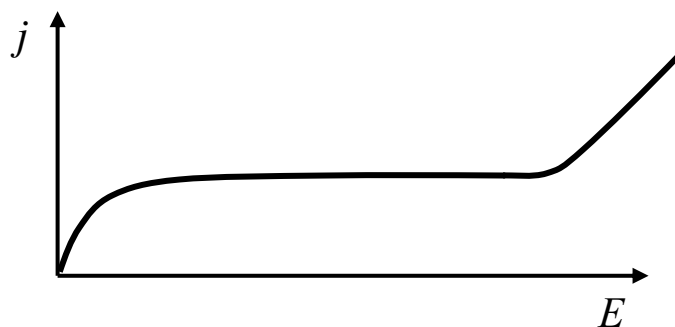


Рис. 3.1. Зависимость плотности тока от напряженности поля

Самостоятельный разряд может возникнуть, если в газе происходит процесс, непрерывно производящий новые электроны взамен ушедших на анод. Например, это может быть вторичная электронная эмиссия с катода под действием бомбардировки его положительными ионами. Если положительный ион при своем движении к катоду приобретает достаточную энергию, то он может выбить из катода несколько электронов. Повышая напряжение на электродах, можно возбудить подобные процессы и осуществить переход от несамостоятельного к самостоятельному разряду. Этот переход называется электрическим пробоем газа, а соответствующее напряжение — напряжением зажигания U_3 . Оно зависит от давления и химической природы газа, материала катода, формы, размеров электродов и расстояния между ними.

Идеальная вольт-амперная характеристика изучаемой в данной работе газонаполненной лампы приведена на рис. 3.2. При напряжениях $U < U_3$ токи в лампе пренебрежимо малы. Если увеличивать разность потенциалов на электродах лампы, то при значении $U = U_3$ скачком устанавливается значение тока, равное I_3 , и лампа «загорается». При дальнейшем росте напряжения ток растет по закону, близкому к линейному. Если уменьшать напряжение на

«горящей» лампе, то при напряжении, равном U_3 , лампа еще не гаснет. Продолжая уменьшать напряжение, можно увидеть, что лишь при некотором напряжении (напряжении гашения U_Γ), которое меньше, чем U_3 , лампа «гаснет» и ток резко падает. При этом самостоятельный разряд в лампе прекращается. У реальной лампы зависимость $I = f(U)$ является не вполне линейной, где $U > U_3$. Кривые, снятые при возрастании и убывании напряжения, не совпадают. Однако эти отличия не существенны, и ими можно пренебречь.

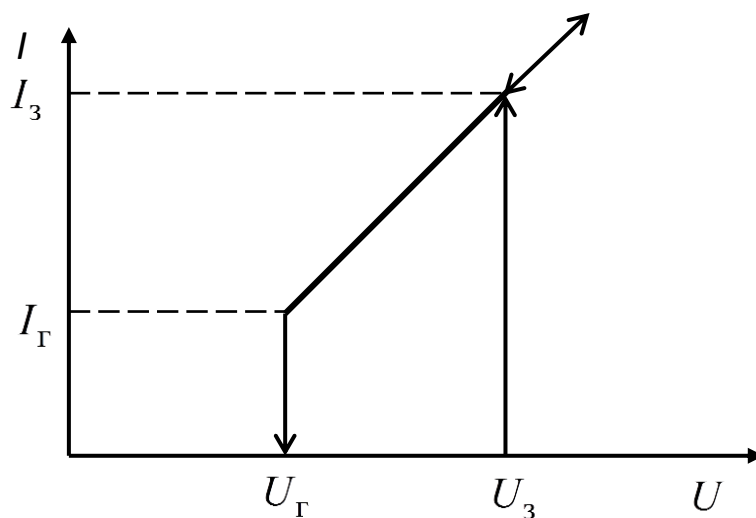


Рис. 3.2. Вольт-амперная характеристика газонаполненной лампы

Газонаполненные лампы часто используют для получения релаксационных колебаний. Принципиальная схема генератора релаксационных колебаний показана на рис. 3.3. Этот генератор включает источник постоянного напряжения U_0 , конденсатор емкостью C , сопротивление R и газоразрядную лампу L . Если включить источник, то в цепи пойдет ток, который будет заряжать конденсатор. Разность потенциалов на обкладках конденсатора будет расти. Одновременно растет разность потенциалов на электродах лампы. Когда она достигнет величины напряжения зажигания U_3 , лампа зажжется, ее сопротивление скачком уменьшится, и она начнет проводить ток. В зажженном состоянии сопротивление лампы значительно ниже сопротивления R , поэтому поддерживать ток в основном будут заряды на обкладках конденсатора. Это приведет к быстрому падению напряжения на конденсаторе, и когда оно достигнет величины напряжения гашения U_Γ , лампа погаснет

и процесс повторится. В результате возникнут релаксационные колебания, происходящие по закону, изображенному в виде графика на рис. 3.4.

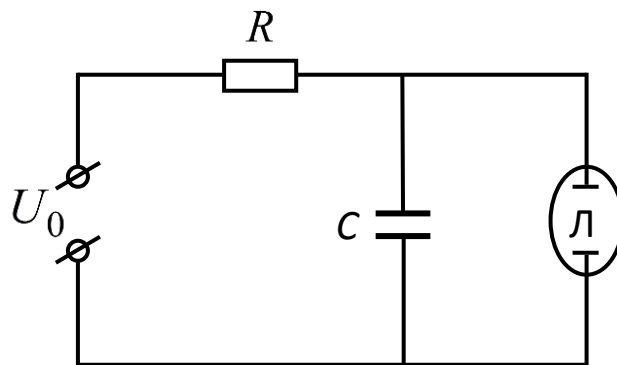


Рис. 3.3. Принципиальная схема генератора релаксационных колебаний

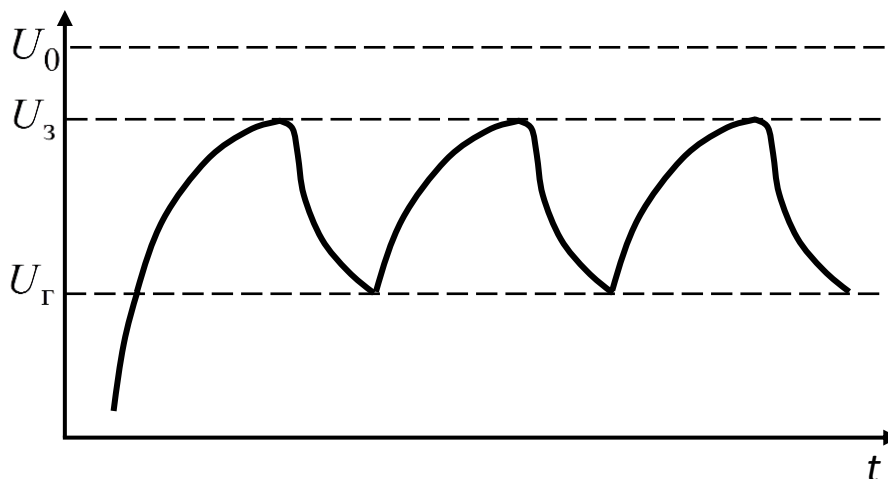


Рис. 3.4. График релаксационных колебаний

Время заряда конденсатора определяется величиной сопротивления R , а время разряда – сопротивлением лампы в проводящем состоянии $R_{л}$. Поскольку $R \gg R_{л}$, то время разряда мало по сравнению со временем заряда (рис. 3.4).

4. Экспериментальная часть

Электрическая схема установки собрана в кассете ФПЭ-12 (рис. 4.1).

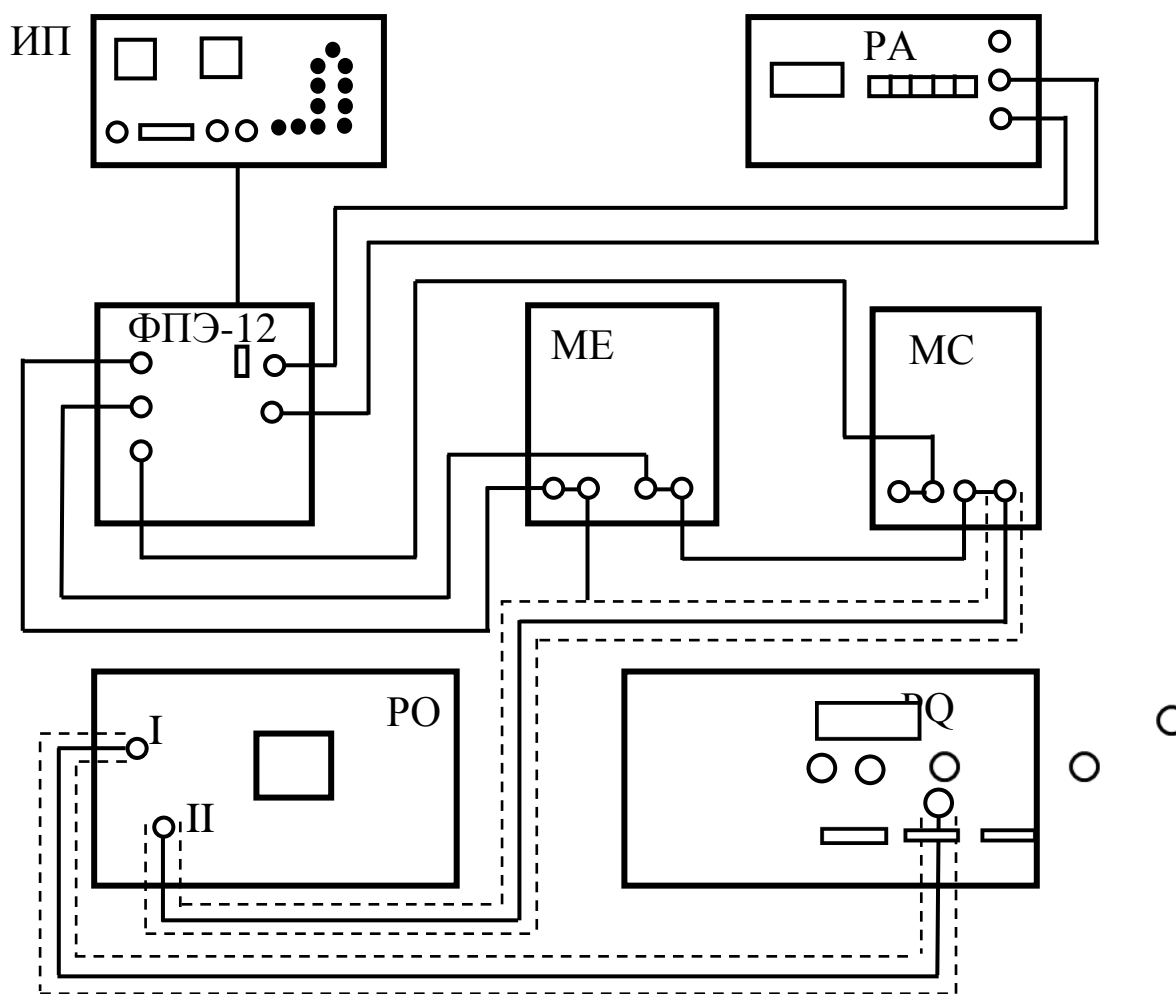


Рис. 4.1. Электрическая схема установки

При отжатой кнопке «Режим» подключается схема измерения вольт-амперной характеристики газонаполненной лампы. При нажатой кнопке «Режим» подключается схема генератора релаксационных колебаний (рис. 3.3). Магазины емкостей ME и сопротивления MC выполняют роль емкости C и сопротивления R упомянутого генератора.

В работе определяется период релаксационных колебаний двумя способами. Первый способ заключается в том, что сигнал от полученных в цепи релаксационных колебаний поступает на вход осциллографа, и на экране последнего можно наблюдать изображение этих колебаний. Период можно измерить непосредственно с экрана при работе осциллографа в режиме измерения длительности сигнала.

Второй способ, более точный, заключается в том, что дополнительно на второй вход осциллографа поступает сигнал определенной частоты. В электронно-лучевой трубке происходит сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний:

релаксационных колебаний лампы и синусоидальных колебаний, подаваемых на второй вход осциллографа с генератора PQ . В результате на экране появятся фигуры Лиссажу. Если частоты складываемых колебаний относятся как целые числа, то картина на экране неподвижна. Зная частоту подаваемого сигнала, по виду фигуры Лиссажу можно определить соотношение частот и частоту релаксационных колебаний.

В отличие от сложения гармонических колебаний, фигура Лиссажу при соотношении частот 1:1 не имеет вид эллипса (рис. 4.2). Кривые a и b отличаются разностью фаз колебаний.

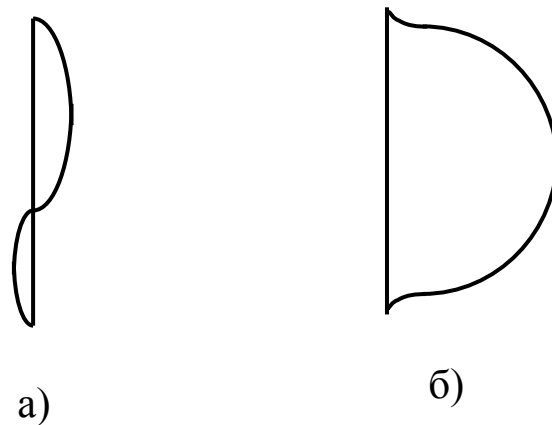


Рис. 4.2. Фигуры Лиссажу

5. Требования по технике безопасности

Для электропитания лабораторной установки используется переменное напряжение 220 В. Все токоведущие части установки изолированы, что исключает случайное прикосновение к ним.

При выполнении работы необходимо:

1. Внимательно ознакомиться с заданием и оборудованием;
2. Визуально проверить целостность изоляции токоведущих проводов;
3. Не оставлять без присмотра включенную установку;
4. Не загромождать рабочее место посторонними предметами и оборудованием, не относящимся к выполняемой работе;
5. О замеченных неисправностях немедленно сообщить преподавателю;
6. По окончании работы отключить установку от сети, привести в порядок рабочее место.

Задание 2. Изучение работы генератора релаксационных колебаний

1. Подготовить приборы к работе: нажать кнопку «Режим» кассеты ФПЭ-12. Установить на магазине сопротивлений $R = 10^6$ Ом. На магазине емкостей установить емкость $C = 3 \cdot 10^{-3}$ мкФ. На источнике питания ручку регулирования выходного напряжения 120 В установить в крайнее левое положение. Осциллограф подготовить к работе в режиме измерения длительности сигнала. Для этого должны быть нажаты кнопки: слева $X - Y$ и справа I, II.

2. Включить лабораторный стенд, источник питания и осциллограф. Установить ручкой регулировки такое напряжение источника питания, чтобы на экране осциллографа появилось изображение релаксационных колебаний, подобное изображенным на рис. 3.4. Это напряжение в дальнейшем не менять. Усиление по оси Y осциллографа установить таким, чтобы размер изображения на экране осциллографа по вертикали составлял $2 \div 4$ см. Установить такую частоту развертки, чтобы на экране были видны 1–2 релаксационных колебания. Зарисовать форму релаксационных колебаний.

3. Измерить период релаксационных колебаний с помощью звукового генератора PQ . На осциллографе справа и слева нажать кнопки $X - Y$. Включить генератор. Подобрать выходное напряжение с генератора и чувствительность I канала осциллографа, чтобы горизонтальный и вертикальный размеры изображения на экране были соизмеримы. Изменяя частоту выходного сигнала генератора, получить на экране осциллографа устойчивую фигуру Лиссажу, соответствующую соотношению частот 1:1 (рис. 4.2). Зарисовать фигуру и записать значение частоты генератора. Увеличивая частоту сигнала, получить фигуру Лиссажу, соответствующую соотношению частот 1:2. Зарисовать форму и записать значение частоты. Уменьшая частоту сигнала, получить фигуру Лиссажу, соответствующую соотношению частот 2:1. Зарисовать форму и записать значение частоты.

4. Рассчитать частоту релаксационных колебаний по формуле $f = \frac{f_n}{n}$, где f – частота сигнала генератора PQ , измеренная в первом, втором, третьем случаях: $n = 1, 2, 1/2$. Число n может быть целым или дробным в зависимости от того, частота которого генератора больше.

5. Выключить осциллограф, генератор, источник питания и лабораторный стенд.

6. Рассчитать погрешность определения периода релаксационных колебаний, используя относительную погрешность генератора $\delta f \approx 1\%$. Случайную погрешность определить по разбросу полученных значений частоты и полную погрешность рассчитать по формуле: $\Delta f = \sqrt{(\Delta f_{сл})^2 + (\Delta f_{пр})^2}$.

Контрольные вопросы

1. От чего зависит электропроводность газов?
2. Объясните вольт-амперную характеристику несамостоятельного газового разряда.
3. Каков механизм возникновения самостоятельного разряда?
4. Как работает генератор релаксационных колебаний?
5. Что такое фигуры Лиссажу и как они получаются в данной работе?

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет должен содержать:

- 1) номер, название и цель работы;
- 2) краткий конспект теоретической части;
- 3) схематическое описание лабораторной установки и метода измерений;
- 4) таблицу с результатами измерений;
- 5) график вольт-амперной характеристики газоразрядной лампы;
- 6) график релаксационных колебаний $U(t)$;
- 7) рисунки фигур Лиссажу, полученные при трех значениях частоты генератора и расчет средней частоты генератора релаксационных колебаний с указанием погрешности;
- 8) выводы по выполненной работе.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- овладел знаниями о природе электрического разряда в газах, особенностях несамостоятельного и самостоятельного разрядов;
- правильно выполнил экспериментальную и расчетную части работы;

- составил отчет, соответствующий требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М.: Академия, 2014.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Академия, 2014.

Лабораторная работа № 43

ИЗУЧЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

1. Цель работы

Изучение поляризации сегнетоэлектриков в зависимости от напряженности электрического поля E , получение кривой $\varepsilon = f(E)$, изучение диэлектрического гистерезиса, определение диэлектрических потерь в сегнетоэлектриках.

2. Задачи

1. Изучение электрических характеристик диэлектриков и особенностей сегнетоэлектриков.

2. Экспериментальное получение петли гистерезиса при различных условиях.

3. Обработка результатов эксперимента и получение значения коэрцитивной силы, остаточной поляризации, работы по переполяризации сегнетоэлектрика и зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля.

3. Теоретическая часть

3.1. Диэлектрические свойства веществ. Особенности сегнетоэлектриков

Все вещества по их способности проводить ток подразделяются на проводники, полупроводники и диэлектрики. Диэлектрики практически не проводят электрический ток. Это связано с тем, что они не содержат зарядов, способных направленно перемещаться под действием электрического поля. Диэлектрики состоят из атомов и молекул, в которых электроны прочно связаны с ядром. Но заряженные частицы диэлектрика, безусловно, реагируют на электрическое поле, в котором они оказываются. Внешнее электрическое поле либо упорядочивает ориентацию жестких диполей (ориентационная поляризация в диэлектриках с полярными молекулами), либо приводит к появлению полностью упорядоченных индуцированных диполей (поляризация электронного и ионного смещения в диэлектриках с неполярными молекулами). Во всех этих случаях диэлектрики поляризуются.

Поляризация диэлектрика заключается в том, что под действием внешнего электрического поля суммарный электрический момент молекул диэлектрика становится отличным от нуля.

Количественной характеристикой поляризации диэлектрика служит вектор поляризованности (или вектор поляризации), который равен электрическому моменту единицы объема диэлектрика

$$\vec{P} = \frac{\sum_{\Delta V} \vec{p}_e}{\Delta V}, \quad (3.1)$$

где $\sum_{\Delta V} \vec{p}_e$ – векторная сумма дипольных электрических моментов всех молекул диэлектрика в физически бесконечно малом объеме ΔV .

У изотропных диэлектриков поляризованность \vec{P} связана с напряженностью электрического поля \vec{E} в той же точке соотношением

$$\vec{P} = \varkappa \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (3.2)$$

где \varkappa – коэффициент, не зависящий в первом приближении от E и называемый диэлектрической восприимчивостью вещества; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Для описания электрического поля в диэлектриках, кроме напряженности \vec{E} , поляризованности \vec{P} , используют вектор электрического смещения \vec{D} , определяемый равенством

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (3.3)$$

С учетом (2.2) вектор смещения можно представить в виде

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (3.4)$$

где $\varepsilon = 1 + \varkappa$ – безразмерная величина, называемая диэлектрической проницаемостью среды. Для всех диэлектриков $\varkappa > 0$, а $\varepsilon > 1$.

Сегнетоэлектрики представляют собой особую группу кристаллических диэлектриков, обладающих в отсутствие внешнего электрического поля в определенном интервале температур и давлений спонтанной (самопроизвольной) поляризацией, направление которой может быть изменено электрическим полем и в ряде случаев механическими напряжениями.

1. Сегнетоэлектрики характеризуются очень высокими значениями диэлектрической проницаемости ε . Она может достигать величины порядка 10^3 – 10^6 . Например, диэлектрическая

проницаемость сегнетовой соли $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ при комнатной температуре ($\sim 20^\circ\text{C}$) близка к 10 000.

2. Особенностью сегнетоэлектриков является нелинейный характер зависимости поляризованности P , а значит, и электрического смещения D от напряженности поля E (рис 3.1). При этом диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков ε оказывается зависящей от E . На рис. 3.2 показана зависимость ε от E для сегнетовой соли при температуре 20°C .

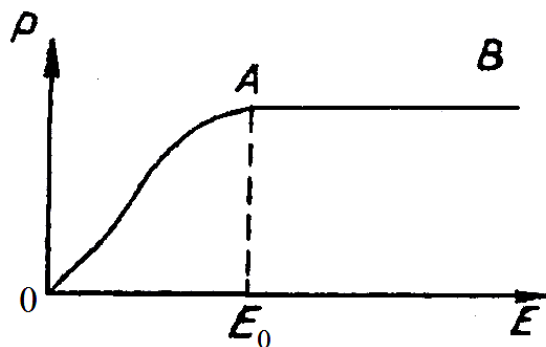


Рис. 3.1. График зависимости поляризованности P от напряженности E

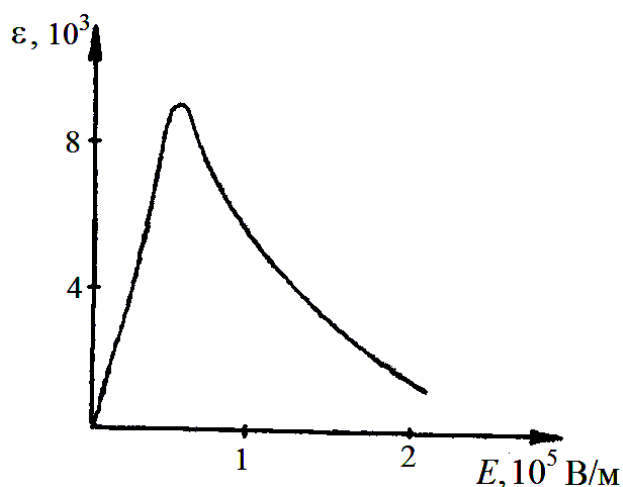


Рис. 3.2. График зависимости ε от E для сегнетовой соли при температуре 20°C

3. Всем диэлектрикам свойственно явление диэлектрического гистерезиса, заключающееся в запаздывании изменения поляризованности P (или смещения D) при изменении напряженности поля E . Это запаздывание связано с тем, что величина P (или D) не только определяется значением поля E , но и зависит еще от предшествовавшего состояния поляризации образца. При циклических

изменениях напряженности поля E зависимость поляризованности P и смещения D от напряженности E выражается кривой, называемой *петлей гистерезиса* (рис. 3.3).

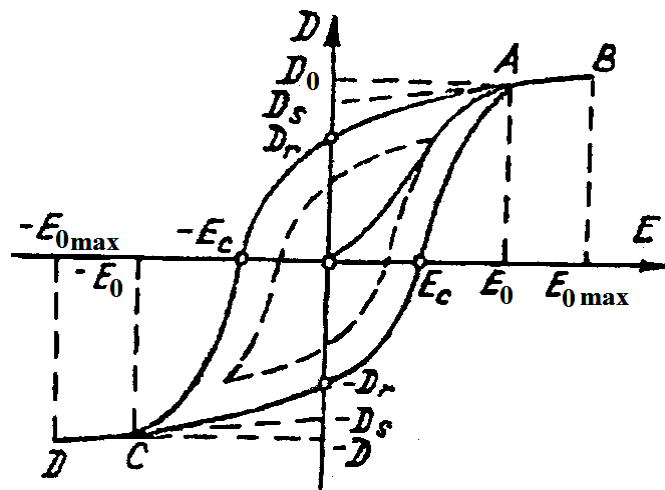


Рис. 3.3. Петля гистерезиса

С увеличением поля E смещение D в образце, который первоначально не был поляризован, изменяется по кривой OAB (рис. 3.1 и 3.3). Эта кривая называется начальной (или основной) кривой поляризации.

Если уменьшать напряженность внешнего поля из точки B (рис. 3.3), то сначала смещение уменьшается по кривой BA (т. е. на участке BA гистерезис отсутствует), а затем (от точки A) изменение смещения отстает от изменения напряженности. Когда напряженность поля $E = 0$, сегнетоэлектрик остается поляризованным, величина электрического смещения, равная D_r , называется *остаточным смещением*. Для снятия остаточного смещения к сегнетоэлектрику необходимо приложить электрическое поле противоположного направления с напряженностью $-E_c$. Величину E_c принято называть *коэрцитивным полем*.

Если максимальное значение напряженности поля таково, что спонтанная поляризация достигает насыщения, то получается петля гистерезиса, называемая *петлей предельного цикла* (сплошная кривая на рис. 3.3). Если же при максимальной напряженности поля насыщение не достигается, то получается так называемая *петля частного цикла*, лежащая внутри предельного цикла (пунктирная кривая на рис. 3.3). Частных циклов поляризации может существовать бесконечное множество, но при этом максимальные

значения смещения D частных циклов всегда лежат на основной кривой поляризации OA .

4. Сегнетоэлектрические свойства сильно зависят от температуры. Для каждого сегнетоэлектрика существует такая температура T_c , выше которой его сегнетоэлектрические свойства исчезают, и он превращается в обычный полярный диэлектрик. Температура T_c называется *точкой Кюри*.

Все характерные свойства сегнетоэлектриков связаны с существованием у них спонтанной (самопроизвольной) поляризации. Спонтанная поляризация означает, что макроскопические области (т. е. содержащие очень большое количество атомов) кристалла поляризованы до насыщения, т. е. электрические моменты всех молекул вещества в этих областях направлены одинаково. Такое состояние связано с электрохимическими особенностями данных веществ. Эти области спонтанной поляризации называют доменами, их линейные размеры не превышают 10^{-6} м.

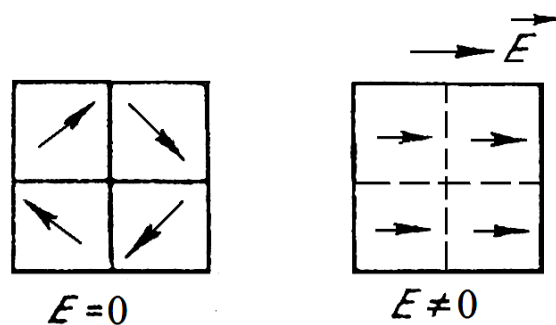


Рис. 3.4. Поляризация сегнетоэлектриков

В отсутствие внешнего электрического поля поляризованность всех доменов различна по направлению, поэтому в целом кристалл оказывается неполяризованным. Это показано на рис. 3.4, а, где схематически изображены домены образца, стрелками показаны направления спонтанной поляризации различных доменов. Под влиянием внешнего электрического поля в многодоменном кристалле происходит переориентация спонтанной поляризации. Этот процесс осуществляется: а) смещением доменных стенок (домены, поляризованность которых составляет острый угол θ с внешним полем, растут за счет доменов, у которых $\theta > \frac{\pi}{2}$; б) поворотом электрических моментов доменов в направлении поля;

в) образованием и прорастанием зародышей новых доменов, электрические моменты которых направлены по полю.

Перестройка доменной структуры, происходящая при наложении и увеличении внешнего электрического поля, приводит к появлению и росту суммарной поляризованности P кристалла (нелинейный участок OA на рис. 3.1 и 3.3).

При некоторой напряженности поля (в точке A) во всем кристалле устанавливается единое направление спонтанной поляризации, совпадающее с направлением поля (на рис. 3.4, б). Говорят, что кристалл становится однодоменным с направлением спонтанной поляризации, параллельным полю. Это состояние называется *насыщением*.

Площадь петли гистерезиса определяет работу по поляризации единицы объема сегнетоэлектрика за один цикл изменения электрического поля. Убедимся в этом: рассмотрим сегнетоэлектрик, расположенный внутри плоского конденсатора. Элементарная работа, совершаемая при поляризации диэлектрика и связанная с переносом заряда dq с одной пластины на другую, равна

$$dA = dq(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Разность потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$ между обкладками конденсатора можно найти, зная напряженность поля E и расстояние между пластинами l ,

$$\varphi_1 - \varphi_2 = El.$$

Величину переносимого заряда dq найдем, учитывая, что:

1) поверхностная плотность свободного заряда на обкладках конденсатора σ равна абсолютному значению вектора смещения D , $\sigma = D$;

2) при изменении напряженности поля \vec{E} будет меняться и вектор \vec{D} , тогда элементарный заряд равен

$$dq = d(\sigma S) = S \cdot d\sigma = S \cdot dD,$$

где S – площадь обкладок.

Искомая работа dA равна

$$dA = S \cdot l \cdot E \cdot dD = V \cdot E \cdot dD, \quad (3.5)$$

где $V = S \cdot l$ – объем диэлектрика, заполняющего пространство между пластинами конденсатора.

Учитывая выражение (3.3), элементарную работу можно рассчитывать по формуле

$$dA = V(\vec{E} \cdot d(\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P})) = \epsilon_0 V(\vec{E} \cdot d\vec{E}) + V(\vec{E} \cdot d\vec{P}). \quad (3.6)$$

Полная работа по поляризации диэлектрика, совершаемая при изменении напряженности поля от E_1 до E_2 и, соответственно, вектора поляризации от P_1 до P_2 , будет равна

$$A = \int_1^2 dA = \epsilon_0 V \int_{E_1}^{E_2} (\vec{E} \cdot d\vec{E}) + V \int_{P_1}^{P_2} (\vec{E} \cdot d\vec{P}). \quad (3.7)$$

Первое слагаемое в последнем выражении определяет изменение энергии электрического поля в вакууме, второе – при поляризации диэлектрика. Величина $\int_{P_1}^{P_2} (\vec{E} \cdot d\vec{P}) = A_n / V$ равна работе по поляризации единицы объема диэлектрика. При наблюдении петли гистерезиса величина P меняется циклически, в этом случае интеграл $\oint (\vec{E} \cdot d\vec{P})$ определяет работу по переполяризации единицы объема диэлектрика

$$A_{n/n} = \oint (\vec{E} \cdot d\vec{P}). \quad (3.8)$$

Работа по переполяризации сегнетоэлектрика отражает диэлектрические потери энергии в нем.

3.2. Метод измерения

Измерения диэлектрических характеристик керамического сегнетоэлектрика проводят по схеме, изображенной на рис. 3.5.

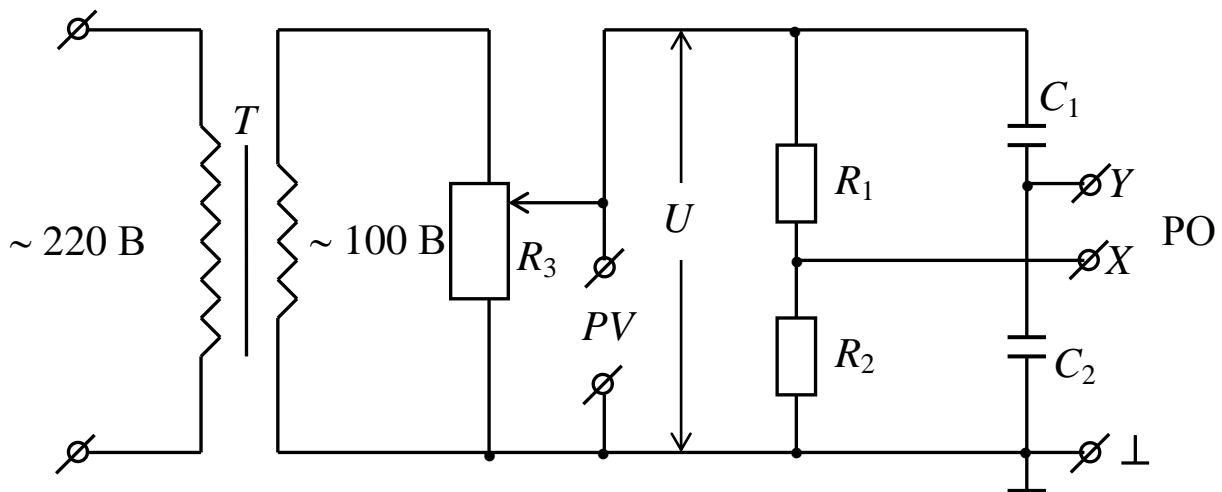


Рис. 3.5. Схема для измерения диэлектрических характеристик керамического сегнетоэлектрика

Напряжение, снимаемое со вторичной цепи понижающего трансформатора T (220/100), через потенциометр R_3 подается на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений R_1 и R_2 . Параллельно делителю R_1 и R_2 включены последовательно два конденсатора, образующие емкостной делитель: исследуемый керамический сегнетоэлектрический конденсатор C_1 и эталонный конденсатор C_2 . Вольтамперметр PV обеспечивает измерение величины напряжения, подаваемого на делители R_1, R_2 и C_1, C_2 .

Осциллограф PO служит для наблюдения и изучения поляризации сегнетоэлектрического конденсатора C_1 при подаче на него переменного гармонического напряжения.

На вертикально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение U_y с эталонного конденсатора C_2 , причем

$$U_y = \frac{q}{C_2},$$

где q – заряд на обкладках конденсатора C_2 , включенного последовательно с C_1 .

При последовательном соединении конденсаторов заряды на их обкладках одинаковы, поэтому величину q можно найти по характеристикам конденсатора C_1

$$q = \sigma S,$$

где σ – поверхностная плотность заряда на обкладках конденсатора C_1 , равная в свою очередь абсолютному значению вектора электрического смещения \vec{D} поля в сегнетоэлектрике; S – площадь пластин конденсатора C_1 . С учетом всего этого

$$q = DS \text{ и } U_y = DS / C_2. \quad (3.9)$$

Таким образом, на вертикально отклоняющие пластины осциллографа подается сигнал, пропорциональный электрическому смещению в сегнетоэлектрике.

На горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение U_x , снимаемое с сопротивления R_2 , причем

$$U_x = IR_2 = \frac{U}{R_1 + R_2} R_2,$$

где U – напряжение, измеряемое цифровым вольтметром PV .

Величину этого напряжения можно менять потенциометром R_3 . Напряжение $U = U_{C1} + U_{C2}$, при этом $U_{C1} = q/C_1$ и $U_{C2} = q/C_2$. Конденсаторы подбирают так, что $C_1 \ll C_2$. Тогда $U_{C1} \gg U_{C2}$ и

$U \approx U_{C_1}$, т. е. цифровой вольтметр измеряет напряжение, подаваемое на конденсатор C_1 с сегнетоэлектриком. Принимая электрическое поле внутри конденсатора однородным, можно считать, что

$$U = U_{C_1} = El, \quad (3.10)$$

где E – напряженность электрического поля в конденсаторе C_1 (или в сегнетоэлектрике); l – толщина сегнетоэлектрика.

В итоге можно утверждать, что

$$U_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} El, \quad (3.11)$$

т. е. на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подается сигнал, пропорциональный напряженности электрического поля в исследуемом сегнетоэлектрике.

Таким образом, на экране осциллографа будет представлена зависимость между электрическим смещением D и напряженностью E поля в сегнетоэлектрике.

Зная чувствительность K_x и K_y осциллографа по осям x и y , можно найти величины

$$U_x = K_x \cdot x \quad \text{и} \quad U_y = K_y \cdot y, \quad (3.12)$$

где x и y – отклонения электронного луча по осям x и y . Из соответствия (3.9) и (3.10) с учетом (3.11) можно найти

$$D = \frac{C_2 K_y}{S} y \quad \text{и} \quad E = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \frac{K_x}{l} x. \quad (3.13)$$

Из соотношений (3.4), (3.10) и (3.13) можно получить значение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика

$$\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 E} = \frac{C_2 l K_y}{S \varepsilon_0 U} y = \frac{C_2 l R_2 K_y y}{S \varepsilon_0 (R_1 + R_2) K_x x} \quad (3.14)$$

и изучить зависимость ε (E), измеряя отклонения y при разных U . Работу по переполяризации единицы объема сегнетоэлектрика можно рассчитать по формуле (3.8), которая для рассматриваемого случая преобразуется следующим образом. В сегнетоэлектрике всегда $P \gg \varepsilon_0 E$, тогда $\vec{D} \approx \vec{P}$ и $A = \oint (\vec{E} \cdot d\vec{D})$. Учитывая (2.13) и одинаковое направление векторов \vec{E} и \vec{D} , получим

$$A = \frac{C_2 K_y}{S} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \frac{K_x}{l} \oint x dy = \text{const} \cdot \sum, \quad (3.15)$$

т. е. работа по переполяризации единицы объема сегнетоэлектрика пропорциональна площади Σ петли гистерезиса. Эта площадь выражается в квадратных делениях.

4. Приборы и оборудование

1. ФПЭ-02 – модуль;
2. PV – цифровой вольтметр;
3. PO – осциллограф.

На рис. 4.1 приведена структурная схема, с помощью которой изучаются свойства сегнетоэлектриков. В модуле ФПЭ-02 собрана схема, изображенная на рис. 3.5.

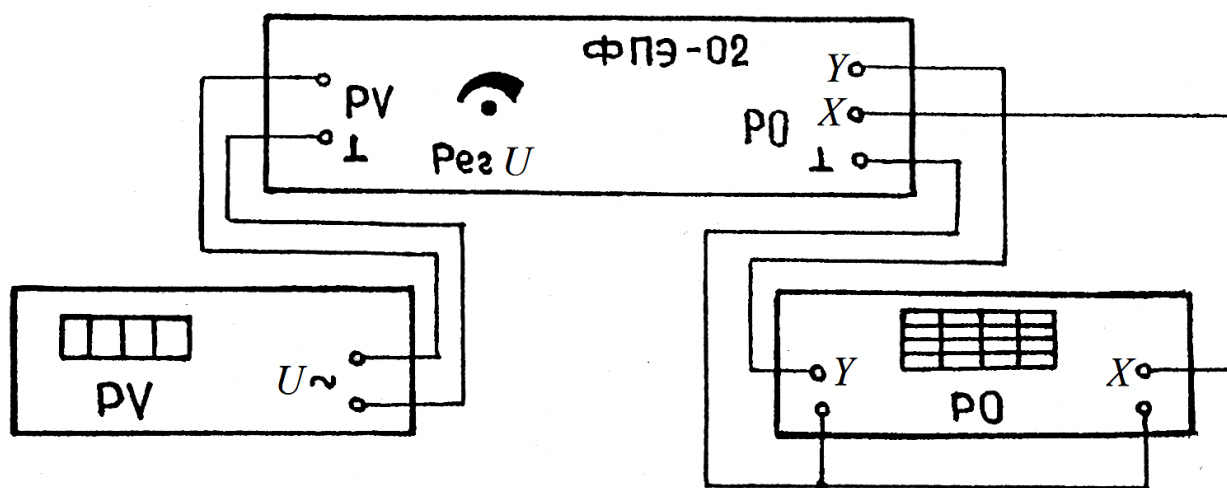


Рис. 4.1. Схема лабораторной установки для изучения свойств сегнетоэлектриков

На передней панели модуля имеются: 1) ручка «Рег U » потенциометра R_3 ; 2) гнезда «PV» – для подключения вольтметра; 3) гнезда «PO» («Y», «X», « \perp ») – для подключения осциллографа. От источника питания на схему поступает напряжение сети ~ 220 В, 50 Гц.

5. Требования по технике безопасности

Все приборы экспериментальной установки подключаются к клеммам специального стенда, который в свою очередь подключается к источнику напряжения 220 В. Токоведущие части установки закрыты, что исключает случайное прикосновение к ним. Стенд заземлен.

При выполнении работы необходимо:

1. Внимательно ознакомиться с заданием и оборудованием;
2. Проверить изоляцию токоведущих проводов и замкнутость электрической цепи установки;
3. Не загромождать рабочее место посторонними предметами;
4. Не оставлять без присмотра включенную лабораторную установку;
5. Сообщать преподавателю или лаборанту о замеченных неисправностях;
6. По окончании работы отключить установку от сети и убрать рабочее место.

6. Задания

1. Определить коэрцитивную силу, остаточную поляризацию, работу по переполяризации сегнетоэлектрика.
2. Определить зависимость диэлектрической проницаемости ε сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля.

7. Методика выполнения заданий

Задание 1. Определение коэрцитивного поля, остаточной поляризации, работы по переполяризации сегнетоэлектрика

1. Проверить целостность соединений блоков экспериментальной установки в соответствии с рис. 4.1.
2. Установить ручку «Напряжение» на панели кассеты ФПЭ-02 в крайнее левое положение.
3. Включить осциллограф, кассету ФПЭ-02 и цифровой вольтметр.
4. Установить род работы вольтметра в положение « $\sim U$ », нажать кнопку «АВП». На осциллографе переключатель TIME/DIV – в положение « $x - y$ ». Ручками POSITION $\updownarrow \leftrightarrow$ привести изображение в центр экрана.
5. Поворачивая ручку «Напряжение» на панели кассеты ФПЭ-02, получить на экране петлю гистерезиса.
6. Изменяя положение ручки «Напряжение» на панели кассеты и чувствительность осциллографа переключателями VOLTS/DIV, добиться, чтобы полная петля занимала большую часть экрана.
7. Измерить координаты x и y нескольких точек полученной петли гистерезиса, результаты измерений занести в табл. 7.1.

Чувствительность осциллографа по осям x и y определять по положению переключателей VOLTS/DIV.

8. По полученным результатам начертить на миллиметровой бумаге петлю гистерезиса и измерить ее площадь в квадратных делениях.

9. По формулам (3.13) рассчитать остаточную поляризацию D_r и коэрцитивную силу E_c сегнетоэлектрика (см. рис. 3.3).

10. По формуле (3.15) рассчитать работу по переполяризации сегнетоэлектрика. Для вычислений использовать следующие данные: $C_2 = 0,047$ мкФ ± 10 %, $R_1 = 470$ кОм ± 5 %, $R_2 = 20$ кОм ± 5 %, $d = 5$ мм ± 10 %, $l = 1,5$ мм ± 10 % (d – диаметр обкладок; l – толщина сегнетоэлектрика).

Таблица 7.1

Оси	Чувствительность, В/дел	Координаты, дел					Остаточная поляризация, Кл/м ²	Коэрцитивная сила, В/м	Работа, Дж/м ³
x									
y									

Задание 2. Определение зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля

1. Регулятор «Напряжение» на панели кассеты поставить в положение, близкое к максимальному.

2. Установить петлю на всей площади экрана осциллографа.

3. Измерить напряжение U на сегнетоэлектрике цифровым вольтметром. Результаты записать в табл. 7.2.

4. Измерить координату y_0 , соответствующую точке A (рис. 3.3) насыщения поляризации сегнетоэлектрика. В табл. 7.2 записать измеренное значение y_0 и чувствительность k_y .

5. Уменьшить напряжение U , снова измерить значения k_y , y_0 и U для новой петли. Если нет насыщения, то измерить координату y_0 , соответствующую вершине петли.

6. Измерения по п. 15 провести еще 5 раз для различных значений U .

7. Рассчитать величину диэлектрической проницаемости по формуле (3.14) для всех измеренных значений U .

8. Построить график зависимости $\varepsilon(U)$.

Таблица 7.2

U									
K_y									
Y_0									
ε									

Контрольные вопросы

1. Какие существуют типы диэлектриков?
2. Что такое «поляризованность диэлектрика»?
3. Что такое «вектор электрического смещения»?
4. Что такое «домены» и как они ведут себя в электрическом поле?
5. Что называют петлей гистерезиса?
6. Что такое «остаточная поляризация» и «коэрцитивная сила»? Как их определить по петле гистерезиса?
7. Какие вещества относятся к сегнетоэлектрикам? Как свойства сегнетоэлектрика зависят от температуры?
8. Какую физическую величину количественно определяет площадь петли гистерезиса?
9. Как зависит диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика от напряженности поля?

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет должен содержать:

- 1) номер, название и цель работы;
- 2) краткий конспект теоретической части с расчетными формулами;
- 3) экспериментальные данные, представленные в табл. 7.1, 7.2;
- 4) расчеты коэрцитивной силы, остаточной поляризации и работы по переполяризации сегнетоэлектрика;
- 5) график зависимости диэлектрической проницаемости от приложенного напряжения;
- б) вывод по результатам работы.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- овладел понятием поляризации диэлектриков, особенностями электрических свойств сегнетоэлектриков;

- правильно выполнил экспериментальную и расчетную части работы;
- правильно построил кривую гистерезиса и зависимость $\epsilon(E)$;
- составил отчет, соответствующий требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Савельев И. В. Курс общей физики. В 4 т. СПб.: Лань, 2014. Т. 2. С. 74–79, 85–88, 98–99.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Академия, 2014. С. 160–164, 166–167.

Лабораторная работа № 45

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС ИСТОЧНИКА ТОКА С ПОМОЩЬЮ ЗАКОНА ОМА

1. Цели работы

1. Изучение закона Ома для однородного и неоднородного участков цепи.
2. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока.

2. Задачи

1. Усвоение смысла характеристик электрического тока и закона Ома для различных случаев.
2. Экспериментальное получение значения неизвестных ЭДС.

3. Теоретическая часть

3.1. Закон Ома

Электрическим током называется направленное движение электрических зарядов. Количественной мерой электрического тока служит *сила тока* – скалярная величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (3.1)$$

Ток, сила и направление которого с течением времени не изменяются, называется *постоянным* (или *стационарным*). Для постоянного тока

$$I = \frac{q}{t}. \quad (3.2)$$

Единица силы тока – ампер (А), $1 \text{ А} = \text{Кл/с}$. Физическая величина, определяемая силой тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярной направлению тока, называется *плотностью тока*

$$j = \frac{I}{S}. \quad (3.3)$$

Плотность тока – величина векторная. Направление вектора \vec{j} совпадает с направлением тока. За направление тока принимается направление движения положительных зарядов. Сила тока через произвольную поверхность S определяется как поток вектора \vec{j} через нее

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S}. \quad (3.4)$$

Ток возникает при условии, что внутри проводника существует электрическое поле, под действием которого положительные заряды будут смещаться по направлению вектора напряженности \vec{E} поля, отрицательные – против поля. Таким образом, наличие свободных электрических зарядов и электрического поля – два необходимых условия для возникновения тока. Однако если на носители тока действуют только силы электростатического поля, то происходит перемещение положительных носителей тока от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом, что приводит к выравниванию потенциалов во всех точках цепи и к исчезновению электрического поля. Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие устройства, способного создавать и поддерживать разность потенциалов за счет работы сил неэлектростатического происхождения. Такие устройства называются *источниками тока*. Силы неэлектростатического происхождения, действующие на заряды со стороны источника тока, называются *сторонними*.

Природа сторонних сил может быть различной. В гальванических элементах они возникают за счет энергии химических реакций между электродами и электролитами; в генераторе – за счет механической энергии вращения ротора генератора и т. д.

Сторонние силы, перемещая электрические заряды против действия сил электростатического поля, совершают работу. Физическая величина, определяемая работой сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда, называется электродвижущей силой (ЭДС) ε , действующей в цепи,

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}, \quad (3.5)$$

где $A_{\text{ст}}$ – работа сторонних сил; q – величина перемещаемого заряда. В системе СИ единицей измерения ЭДС служит вольт (В), $1 \text{ В} = \text{Дж/Кл}$.

Эта работа совершается за счет энергии, затрачиваемой в источнике тока, поэтому величину ε называют также электродвижущей силой источника тока, включенного в цепь.

Сторонние силы, так же как электростатические, можно описывать с использованием понятия напряженности поля. Напряженность поля сторонних сил $\vec{E}_{\text{ст}}$ определяется аналогично напряженности поля электрических сил

$$\vec{E}_{\text{ст}} = \frac{\vec{F}_{\text{ст}}}{q}, \quad (3.6)$$

где $\vec{F}_{\text{ст}}$ – величина сторонней силы.

Работа сторонних сил над зарядом на участке 1–2 равна

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F}_{\text{ст}} d\vec{l} = \int_1^2 q \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}. \quad (3.7)$$

Разделив эту работу на q , получим ЭДС, действующую на данном участке

$$\varepsilon = \frac{A_{12}}{q} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}. \quad (3.8)$$

Аналогичный интеграл, вычисленный для замкнутой цепи, дает ЭДС, действующую в этой цепи

$$\varepsilon = \oint \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}. \quad (3.9)$$

Таким образом, ЭДС, действующая в замкнутой цепи, может быть вычислена как циркуляция вектора напряженности поля сторонних сил по замкнутому контуру.

Участок цепи, на котором действуют сторонние силы, называют неоднородным. Кроме сторонних сил, на таком участке на заряд действуют силы электростатического поля. Следовательно, результирующая сила, действующая в каждой точке цепи на заряд q , равна

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{эл}} + \vec{F}_{\text{ст}} = q(\vec{E} + \vec{E}_{\text{ст}}). \quad (3.10)$$

Работа, совершаемая этой силой над зарядом q на участке цепи 1–2, определяется выражением

$$A_{12} = q \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} + q \int_1^2 \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l} = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q\varepsilon_{12}. \quad (3.11)$$

Физическая величина, численно равная работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении

единичного положительного заряда, называется падением напряжения, или просто напряжением u , на данном участке цепи. Разделив последнее соотношение на q , получим

$$u_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}. \quad (3.12)$$

В замкнутой цепи $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$, и напряжение равно ЭДС в данной цепи

$$u = \varepsilon. \quad (3.13)$$

Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы, называется однородным. Для однородного участка цепи

$$u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (3.14)$$

т. е. напряжение совпадает с разностью потенциалов на концах участка.

С другой стороны, напряжение на участке цепи равно произведению силы тока на электрическое сопротивление участка – закон Ома в интегральной форме

$$u_{12} = IR_{12}. \quad (3.15)$$

Сопротивление проводника зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого изготовлен проводник. Для проводника с постоянной площадью поперечного сечения сопротивление определяется соотношением

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.16)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление; l – длина проводника; S – площадь его поперечного сечения. Величина $G = 1/R$ называется электропроводностью проводника.

Закон Ома можно представить в дифференциальной форме. Подставив в выражение (3.15) соотношение (3.16), получим

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{u}{l}. \quad (3.17)$$

Величина $\sigma = 1/\rho$ носит название удельной электропроводности вещества. Учитывая, что $\frac{u}{l} = E$ – напряженность электрического поля в проводнике, а $\frac{I}{S} = j$ – плотность тока, соотношение (3.17) можно представить в виде

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (3.18)$$

Последнее выражение представляет собой закон Ома в дифференциальной форме, связывающий плотность тока в любой точке внутри проводника с напряженностью электрического поля в этой же точке. В случае неоднородного участка цепи в соотношении (3.17) под \vec{E} понимается суммарная напряженность электростатического поля и поля сторонних сил.

3.2. Элементарная классическая теория электропроводности металлов

Основателями классической электронной теории проводимости металлов являются Друде и Лоренц, которые, основываясь на экспериментальных данных, предполагали, что внутри пространственной решетки, образованной ионами металла, имеется значительное количество свободных электронов. Участвуя в тепловом движении, электроны образуют электронный газ, заполняющий пространство между ионами, и ведут себя подобно молекулам идеального газа. В отсутствие электрического поля электроны перемещаются в проводнике с некоторой средней тепловой скоростью $\langle v \rangle$. В промежутке между соударениями они движутся свободно, пробегая путь $\langle \lambda \rangle$ (средняя длина свободного пробега). Однако, в отличие от молекул идеального газа, длина свободного пробега электронов определяется не соударениями их друг с другом, а столкновениями с ионами кристаллической решетки металла.

При включении электрического поля на хаотическое движение электронов со скоростью \vec{v} накладывается упорядоченное перемещение зарядов в направлении электрического поля, происходящее со скоростью \vec{u} . Причем средний модуль скорости теплового движения $\langle v \rangle$ на несколько порядков превышает среднюю скорость упорядоченного движения. Поскольку тепловые скорости электронов направлены хаотично, то усреднение вектора \vec{v} дает ноль. Таким образом, электроны будут перемещаться под действием электрического поля со скоростью $\langle \vec{u} \rangle$.

Со стороны электрического поля на электроны действует сила $F = eE$, поэтому в промежутке между двумя столкновениями с ионами кристаллической решетки электроны движутся с

постоянным ускорением, равным $a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m}$, и к концу пробега приобретают скорость u_{\max} .

При соударении с ионом вся приобретенная электроном энергия передается иону, и скорость электрона при этом падает до нуля. Если $\langle \tau \rangle$ – время между двумя последовательными соударениями электрона с ионами решетки, то

$$u_{\max} = a \langle \tau \rangle = \frac{eE}{m} \langle \tau \rangle.$$

Так как $\langle \tau \rangle = \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle v \rangle}$, то

$$u_{\max} = \frac{eE \langle \lambda \rangle}{m \langle v \rangle}.$$

Скорость направленного движения электронов \bar{u} изменяется за время пробега линейно. Поэтому среднее значение ее равно половине максимального

$$\langle u \rangle = \frac{u_{\max}}{2} = \frac{eE \langle \lambda \rangle}{2m \langle v \rangle}.$$

Направленное движение электронов образует ток, плотность которого равна

$$j = ne \langle u \rangle = \frac{ne^2 \langle \lambda \rangle}{2m \langle v \rangle} E,$$

где n – концентрация электронов. Плотность тока оказалась пропорциональной напряженности поля, таким образом, мы получили закон Ома в дифференциальной форме (3.18)

$$j = \sigma E,$$

где $\sigma = \frac{ne^2 \langle \lambda \rangle}{2m \langle v \rangle}$ – удельная электрическая проводимость металла.

4. Экспериментальная часть

Электрическая схема установки изображена на рис. 4.1. Установка включает в себя набор источников напряжения $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, набор известных сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 , неизвестное сопротивление R_x и электроизмерительные приборы – вольтметр и миллиамперметр.

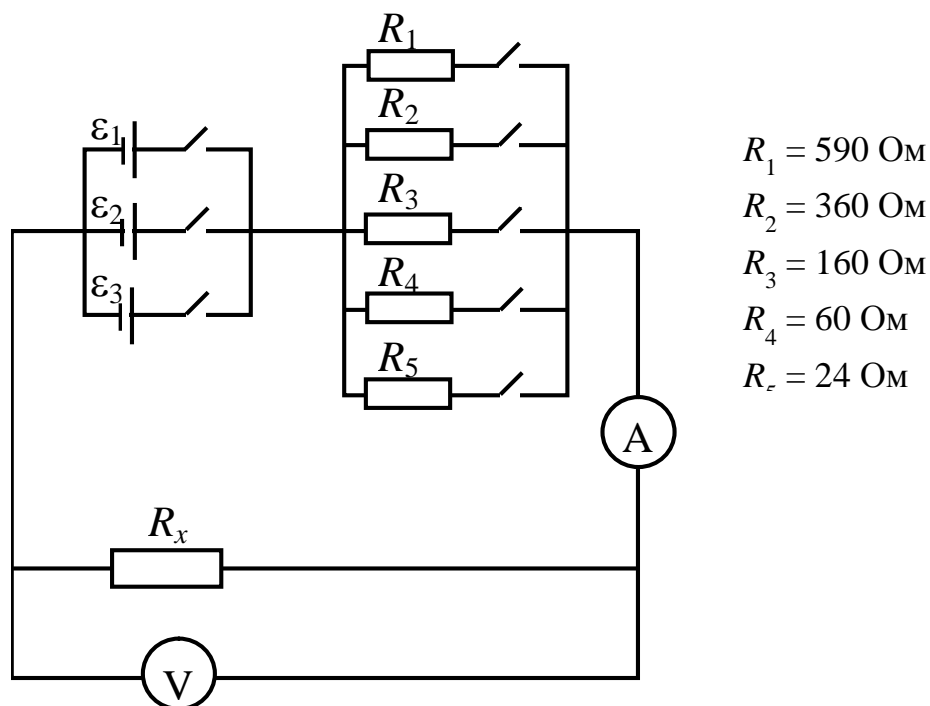


Рис. 4.1. Электрическая схема установки

5. Требования по технике безопасности

1. Прежде чем приступить к работе, внимательно ознакомьтесь с электрической схемой, оборудованием и заданием.
2. Перед включением установки в сеть проверьте, чтобы источники питания были отключены (крайнее левое положение переключателей).
3. По окончании работы отключите питание установки и приведите в порядок рабочее место.
4. Не оставляйте без присмотра лабораторную установку.
5. Об обнаруженных неисправностях доложите преподавателю.

6. Задания

1. Определить неизвестное сопротивление R_x .
2. Определить ЭДС и внутренние сопротивления источников.

7. Методика выполнения заданий

Задание 1. Определение неизвестного сопротивления

1. Установить пределы измерений тока и напряжения 500 мА и 20 В, для чего нажать соответствующие кнопки на панели прибора.
2. Включить прибор, для чего повернуть верхний переключатель на панели прибора вправо в положение «Источник 1», нижний

переключатель «Нагрузка» поставить в положение 5 (к схеме подключено сопротивление R_5).

3. Снять показания амперметра и вольтметра и по закону Ома для однородного участка цепи (3.15) найти неизвестное сопротивление R_x . Данные занести в табл. 7.1.

4. Аналогично провести измерения R_x при включенных источниках 2, 3. Данные занести в табл. 7.1.

5. Рассчитать среднее значение R_x , а также относительную и абсолютную погрешности измерения R_x . Класс точности приборов $\gamma = 0,5$, $I_{\max} = 500$ мА, $u_{\max} = 20$ В.

Таблица 7.1

Источник	R , Ом	I , А	U , В	R_x , Ом	$R_{\text{ср}}$, Ом	ΔR_x , Ом
1						
2						
3						

Задание 2. Определение ЭДС и внутренних сопротивлений источников

1. Включить источник 1. Последовательно подключать к схеме сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 , измеряя каждый раз ток в цепи. Данные занести в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Нагрузка	I , А		
	Источник 1	Источник 2	Источник 3
R_1			
R_2			
R_3			
R_4			
R_5			

2. Взять пару любых комбинаций сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 (например, R_1 и R_2), записать дважды закон Ома для замкнутой цепи и решить полученную систему уравнений относительно ε_1 и r_1 :

$$I_1 = \frac{\varepsilon_1}{R_1 + R_x + r_1} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{\varepsilon_1}{R_2 + R_x + r_1}.$$

В качестве R_x использовать величину, полученную в первом задании.

3. Взять другие пары сопротивлений и рассчитать при этих сопротивлениях значения ε_1 и r_1 . Всего получить не менее трех значений ε_1 и r_1 , усреднить полученные значения и занести их в табл. 7.3.

4. Прodelать то же самое для источников 2 и 3. Данные занести в табл. 7.3.

5. Рассчитать относительную погрешность измерений.

Таблица 7.3

ε_1	ε_2	ε_3	r_1	r_2	r_3

Контрольные вопросы

1. Какая физическая величина называется силой тока, плотностью тока? Каковы единицы их измерения?

2. Какие условия необходимы для поддержания тока в цепи?

3. Дайте определение электродвижущей силы источника. В каких единицах она измеряется?

4. В чем состоит физический смысл напряжения на данном участке цепи?

5. Дайте определение однородного и неоднородного участков цепи. Как записать для них закон Ома?

6. От каких величин зависит сопротивление проводника? Запишите формулу для расчета сопротивления.

7. Каковы основные положения классической теории электропроводности металлов?

8. Как записывается закон Ома в дифференциальной форме?

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1) номер, название, цель работы и краткий конспект теоретической части;

2) схему экспериментальной установки;

3) таблицы с результатами измерений и вычислений, а также сами вычисления;

4) вывод по проделанной работе.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- овладел теоретическими знаниями о переносе электрического заряда;
- составил отчет, соответствующий требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- грамотно ответил на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. Савельев И. В. Курс общей физики. В 4 т. СПб.: Лань, 2014. Т. 2.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Академия, 2014.