

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

ФИЗИКА

Электричество

Лабораторный практикум

Минск
БГАТУ
2009

УДК 53(076.5)
ББК 22.3я7
Ф 50

Рекомендовано научно-методическим советом агроэнергетического факультета БГАТУ

Протокол № 4 от 10 декабря 2008 г.

Составители:

д-р физ.-мат. наук, доц. *В.Р. Соболев*;
канд. биол. наук, доц. *В.Н. Болодон*;
канд. физ.-мат. наук, доц. *В.П. Дымонт*;
канд. физ.-мат. наук, доц. *В.Ф. Малышевский*;
канд. техн. наук, доц. *П.Н. Логвинович*;
канд. техн. наук, доц. *В.В. Хроленок*;
канд. физ.-мат. наук, доц. *Г.М. Чобот*;
ст. преподаватель *В.А. Козик*

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, доц., зав. каф. экспериментальной и теоретической физики Учреждения образования «Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка» *И.С. Ташлыков*;
канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник Государственного научного учреждения «Институт физики им. Б.И. Степанова» *В.А. Чернявский*

Физика. Электричество : лаб. практикум / В.Р. Соболев
Ф 50 [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2009. — 68 с.

ISBN 978-985-519-136-1

Издание включает шесть лабораторных работ по электричеству. Каждая работа содержит краткое теоретическое введение, описание идеи метода измерений и экспериментальных установок, методики измерений, обработки и представления результатов, подробную схему отчета и набор контрольных вопросов и заданий.

Предназначено для студентов агротехнических специальностей.

УДК 53(076.5)
ББК 22.3я7

ISBN 978-985-519-136-1

© БГАТУ, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Требования к выполнению лабораторных работ	5
1. Проводники и диэлектрики в электрическом поле.	
Конденсаторы	10
Лабораторная работа 2.1 «Последовательное и параллельное соединение конденсаторов»	17
Лабораторная работа 2.2 «Определение диэлектрической проницаемости плоской пластины из диэлектрика»	22
2. Постоянный электрический ток	27
Лабораторная работа 2.3 «Компенсационный метод определения ЭДС»	38
Лабораторная работа 2.4 «Изучение зависимости напряжения на зажимах, мощности и КПД источника от внешнего сопротивле- ния и силы тока»	43
3. Электрический ток в металлах и электролитах	48
Лабораторная работа 2.5 «Определение температурного коэффициента сопро- тивления металлов»	57
Лабораторная работа 2.6 «Изучение температурной зависимости электрического сопротивления электролита»	61
Литература	64
Справочные сведения	65

Введение

Окружающий нас мир состоит из взаимодействующих частиц. На макроскопическом уровне кажется, что существует бесконечно много взаимодействий, однако с точки зрения современной физики, в основе лежит всего четыре типа фундаментальных взаимодействий: 1) сильное, 2) электромагнитное, 3) слабое, 4) гравитационное.

Эти взаимодействия перечислены в порядке убывания силы взаимодействия.

Сильное взаимодействие определяет структуру атомных ядер, и проявляется на малых расстояниях, ($\sim 10^{-15}$ м).

Электромагнитное взаимодействие проявляется на любых расстояниях, но оно слабее сильного на два порядка.

Слабое взаимодействие слабее сильного на пять порядков и, вообще, играет незаметную роль на макроскопическом уровне.

Гравитационное взаимодействие примерно на сорок порядков слабее электромагнитного. Но именно гравитационное взаимодействие мы ощущаем всегда. Например, вы хотите подпрыгнуть, а вас тянет вниз. Это происходит за счет того, что в этом взаимодействии участвуют все частицы, и оно тоже проявляется на любых расстояниях.

На макроскопическом уровне электромагнитное взаимодействие — самое «важное». Все то, что мы непосредственно видим вокруг нас — это все обусловлено электромагнитным взаимодействием.

Цель данного раздела физики — изучить многочисленные проявления электромагнитного взаимодействия. Показать предметность и повседневную востребованность фундаментальных физических знаний — задача данного лабораторного практикума.

Практикум содержит описания лабораторных работ по электричеству, темы которых соответствуют программе курса общей физики. Их выполнение поможет лучше усвоить изучаемый материал, приобрести навыки работы с оборудованием, научиться формулировать цели работы и делать выводы на основе полученных результатов. Для этого нужно изучить краткую теорию, приведенную в работе, при необходимости прочитать соответствующие главы учебника и конспекта лекций, разобраться в схеме экспериментальной установки и принципах ее работы, провести измерения, расчеты и сделать необходимые выводы. К каждой работе приведены вопросы и задания для контроля, на которые студент должен уметь ответить при получении допуска к выполнению работы и при последующей защите выполненной работы.

I. Требования к выполнению лабораторных работ

Допуск к лабораторной работе

Перед выполнением лабораторной работы студент должен получить у преподавателя допуск для выполнения работы. Допуск проводится преподавателем побригадно с персональным опросом каждого студента. Для того чтобы получить допуск к лабораторной работе студент должен:

- заранее оформить конспект данной лабораторной работы;
- ответить на вопросы преподавателя по теории, методике измерений, устройству установки и методике обработки результатов. (письменно в черновике конспекта или устно).

Преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на обложке).

Выполнение лабораторной работы

Учитывая указания преподавателя, студент получает и заносит в таблицы экспериментальные данные; проводит расчеты; строит графики и т. п.

Выполнив необходимые действия, показывает конспект преподавателю и при правильном результате получает его подпись в графе ИЗМЕРЕНИЯ.

Защита лабораторной работы

К защите лабораторной работы должен быть представлен полностью оформленный конспект. Должны быть выполнены все пункты раздела описания “Оформление конспекта к лабораторной работе” (в черновике представлены все расчеты, заполнены чернилами все таблицы, построены все графики).

Преподаватель проверяет правильность и полноту оформления конспекта, задает вопросы по теории, методике измерений, устройству установки, методике обработки результатов, обоснованности выводов по отдельным результатам работы и всей работе в целом. Если студент справился с заданиями, он получает подпись преподавателя в графе ЗАЧЕТ. Работа считается выполненной и защищенной.

Студент, не получивший на занятиях допуска к лабораторной работе, к выполнению работы не допускается (причина не выполнения работы считается неуважительной).

Выполненные работы должны быть защищены на текущем или на следующем занятии.

Если студент имеет две незащищенные работы, то до их защиты к выполнению следующих работ он не допускается (причина невыполнения считается неуважительной).

Выполнение всех лабораторных работ обязательно.

Лабораторные работы, не выполненные по уважительной причине, отрабатываются бесплатно (при наличии разрешения деканата) в течение двух недель от даты пропущенного занятия.

Лабораторные работы, не выполненные по неуважительной причине, отрабатываются на платной основе в течение двух недель от даты пропущенного занятия.

Порядок отработки невыполненных лабораторных работ

Студент полностью выполняет требования к выполнению лабораторных работ. Выполняет лабораторную работу под руководством лаборанта, в дни, указанные заведующим кафедрой, или по согласованию с ведущим занятия преподавателем. Показывает полученные результаты и защищает лабораторную работу на общих основаниях.

Оформление конспекта к лабораторной работе

Конспект для допуска и выполнения лабораторных работ готовится заранее на двойных листах из школьной тетради в клетку (1–5 двойных листов в зависимости от почерка).

Первая страница
(обложка): ⇒

БГАУ Кафедра физики		
Лабораторная работа № _____		
Название: _____		
Выполнил: студент группы _____		
ФИО _____		
	Допуск	Измерения
Подпись и дата		Зачет
Минск 200_		

Следующие страницы:

<p>вопросы и ответы для допуска к лабораторной работе</p> <p style="text-align: center;">ЧЕРНОВИК</p> <p>(здесь и далее на этой стороне должны быть представлены все расчеты, включая расчетные формулы и подстановку числовых значений)</p>

<p><i>Цель и задачи работы:</i> (переписать полностью из описания или сформулировать самостоятельно).</p> <p><i>Краткая теория</i> (выписать основные определения и формулы и пояснить смысл каждого символа, входящего в формулу).</p> <p><i>Экспериментальная установка</i> (нарисовать чертеж и написать наименование деталей).</p> <p><i>Таблицы</i> (состав таблиц и их количество определить самостоятельно в соответствии с методикой измерений и обработкой их результатов).</p> <p><i>Оформление отчета</i> (переписать полностью из описания). Этот раздел в описании может иметь и другое название, например, "Обработка результатов и оформление отчета".</p>

Оформление отчета

Полностью оформленная и подготовленная к зачету работа должна соответствовать следующим требованиям:

- 1) должны быть выполнены *все пункты* раздела описания «Оформление конспекта к лабораторной работе» (в черновике представлены все расчеты, заполнены чернилами все таблицы, построены все графики и т. д.);
- 2) для всех величин, представленных в таблицах, должна быть записана соответствующая единица измерения.
- 3) графики должны удовлетворять требованиям, приведенным ниже.

Г Р А Ф И К (требования):

- должен быть построен на миллиметровой бумаге или на листе в клетку, размером не менее 1/2 тетрадного листа;
- на графике: оси декартовой системы, на концах осей — стрелки, обозначения величин, единицы измерения, множитель (10^N);
- на каждой оси выбран — равномерный масштаб (риски через равные промежутки, числа через равное количество рисок);
- под графиком должно быть полное название графика СЛЮ-ВАМИ;
- на графике должны быть нанесены — экспериментальные и теоретические точки ярко, разными значками;
- экспериментальная кривая на графике должна соответствовать теоретической зависимости (не ломаная линия, соединяющая экспериментальные точки);
- должны быть записаны выводы по каждому графику (см. шаблон).

ВЫВОД по ГРАФИКУ (шаблон):

Полученный экспериментально график зависимости _____ от _____ имеет вид (прямой, название функции словами _____ название аргумента _____ проходящей через начало координат, параболы, гиперболы, плавной кривой и т.п.) и качественно совпадает (не совпадает) с теоретической зависимостью данной характеристики, имеющей вид _____ формула _____

- 4) выписан ответ по установленной форме (см. шаблон).

ОТВЕТ (шаблон): По результатам измерений и расчетов получено значение _____, название физической характеристики, равное _____, символ _____ =

$(\frac{\text{среднее}}{\text{число измерений}} \pm \frac{\text{ошибка}}{\text{число измерений}}) \cdot 10^{\text{степень}} \frac{\text{един. измерен}}{\text{един. измерен}}$

ВЫВОД по ОТВЕТУ (шаблон):

Полученное _____, экспериментально значение величины _____, равное _____, с точностью до ошибки измерений, составляющей _____, совпадает (не совпадает) с табличным (теоретическим) значением данной величины, равным _____.

1. Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Конденсаторы

Краткая теория

Вещество, внесенное в электрическое поле, может существенно изменить его. Это связано с тем, что материалы состоят из заряженных частиц. В отсутствие внешнего поля частицы распределяются внутри вещества так, что создаваемое ими электрическое поле в среднем по объемам, включающим большое число атомов или молекул, равно нулю. При наличии внешнего поля, действующего на вещество, в нем происходит перераспределение заряженных частиц и возникает собственное электрическое поле \vec{E}' . Полное электрическое поле \vec{E} определяется в соответствии с принципом суперпозиции как сумма внешнего поля \vec{E}_0 и внутреннего поля \vec{E}' . Вещества многообразны по своим электрическим свойствам и разделяются на *проводники*, *полупроводники* и *диэлектрики*.

Основная особенность проводников и полупроводников — наличие свободных зарядов, которые могут перемещаться по всему объему материала. Типичные проводники — металлы.

В отсутствие внешнего поля в любом элементе объема проводника отрицательный свободный заряд компенсируется положительным зарядом ионной решетки. В проводнике, внесенном в электрическое поле (рисунок 1), происходит перераспределение

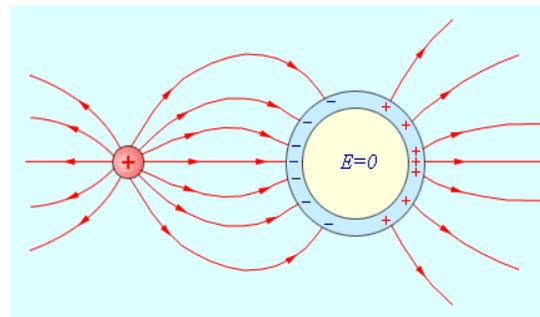


Рисунок 1 — Проводник в электростатическом поле

свободных зарядов, в результате чего на поверхности проводника возникают некомпенсированные положительные и отрицательные заряды. Этот процесс называют *электростатической индукцией*, а появившиеся на поверхности проводника заряды — *индукционными зарядами*.

Индукционные заря-

ды создают свое собственное поле \vec{E}' , которое компенсирует внешнее поле \vec{E}_0 во всем объеме внутри проводника: $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$.

Другими словами полное электростатическое поле внутри проводника равно нулю, а потенциалы во всех точках одинаковы и равны потенциалу на поверхности проводника.

Все внутренние области проводника, внесенного в электрическое поле, остаются электронеутральными. Если удалить некоторый объем, выделенный внутри проводника, и образовать пустую полость, то электрическое поле внутри полости также будет равно нулю. На этом основана *электростатическая защита* — чувствительные к электрическому полю приборы для исключения влияния внешнего постоянного во времени поля помещают в металлические ящики.

Так как поверхность проводника является эквипотенциальной, силовые линии у поверхности перпендикулярны к ней.

Диэлектриками называются вещества, которые при обычных условиях практически не проводят электрический ток. В отличие от проводников, в диэлектриках (изоляторах) нет свободных электрических зарядов. Они состоят из нейтральных атомов или молекул. Заряженные частицы в нейтральном атоме связаны друг с другом и не могут перемещаться под действием электрического поля по всему объему диэлектрика.

Различают 3 типа диэлектриков:

- 1) диэлектрики с полярными молекулами, молекулы которых в отсутствие внешнего поля вследствие асимметрии имеют ненулевой дипольный момент (например, NH_3 , H_2O , SO_2 , CO);
- 2) диэлектрики с неполярными молекулами, у таких материалов симметричные по структуре молекулы в отсутствие внешнего поля имеют нулевой дипольный момент (например, N_2 , H_2 , O_2 , CO_2);
- 3) к диэлектрикам третьего типа относятся ионные кристаллические диэлектрики (например, соли натрия и калия NaCl и KCl). Ионные кристаллы представляют собой пространственные решетки с правильным чередованием ионов разных знаков.

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле \vec{E}_0 в нем возникает некоторое перераспределение зарядов, входящих в

состав атомов или молекул. В результате такого перераспределения на поверхности диэлектрического образца появляются избыточные некомпенсированные **связанные** заряды. Все заряженные частицы, образующие макроскопические связанные заряды, по-прежнему входят в состав своих атомов.

Связанные заряды создают электрическое поле \vec{E}' , которое внутри диэлектрика направлено противоположно вектору напряженности \vec{E}_0 внешнего поля. Процесс смещения связанных зарядов с изменением электрического поля в объеме диэлектрика называется *поляризацией диэлектрика*. В результате полное электрическое поле $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$ внутри диэлектрика оказывается по модулю меньше внешнего поля \vec{E}_0 .

В соответствии с типами диэлектриков различают и виды поляризации.

1. Ориентационная, или дипольная, поляризация, характерна для диэлектриков содержащих полярные молекулы. Проявляется как результат ориентации молекул, имеющих дипольные моменты, вдоль поля (рисунок 2).

2. Поляризации — электронная поляризация, которая наблюдается в материалах также с неполярными молекулами. Осуществляется за счет деформации электронных орбит, что также приводит к появлению индуцированных дипольных моментов у атомов или молекул (рисунок 3).

3. Ионная поляризация диэлектрика. Имеет место в материале, состоящем из неполярных молекул. Реализуется за счет смещения ионов из положения равновесия, в результате чего у молекул возникает дипольный момент (рисунок 3).

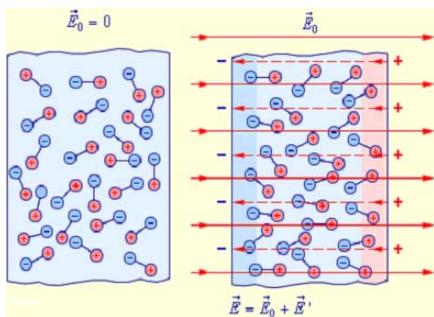


Рисунок 2 — Ориентационный механизм поляризации полярного диэлектрика

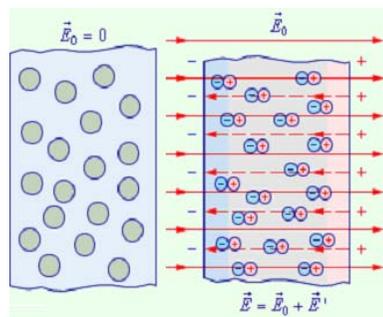


Рисунок 3 — Поляризация неполярного диэлектрика

Для количественного описания поляризации диэлектрика используется векторная величина — вектор поляризации, который определяется как дипольный момент единицы объема материала $\vec{P} = \frac{\vec{P}_V}{V} = \frac{\sum_i \vec{p}_i}{V}$, где $\vec{p}_i = \sum_i \vec{p}_i$ — дипольный момент материала в объеме V , \vec{p}_i — дипольный момент одной молекулы.

В случае изотропного диэлектрика поляризация линейно зависит от напряженности результирующего поля $\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$, здесь χ — диэлектрическая восприимчивость вещества, характеризующая способность среды к поляризации (положительная безразмерная величина), ϵ_0 — электрическая постоянная.

Вследствие поляризации на поверхности диэлектрика появляются некомпенсированные *связанные* заряды, которые не могут перемещаться в отличие от *свободных* зарядов, способных перемещаться на макроскопические расстояния и участвовать в электропроводности. Поверхностная плотность связанных зарядов равна нормальной составляющей вектора поляризации $\sigma' = P_n$.

Физическая величина, равная отношению модуля напряженности электрического поля, создаваемого свободными зарядами в вакууме \vec{E}_0 к модулю напряженности полного поля \vec{E} , создаваемого этими же зарядами в однородном диэлектрике,

называется диэлектрической проницаемостью вещества

$$\epsilon = 1 + \chi = \frac{E_0}{E}.$$

Другими словами диэлектрическая проницаемость есть величина, которая характеризует поляризацию диэлектриков под действием электрического поля.

Диэлектрическая проницаемость вещества, в частности, входит в закон Кулона и показывает во сколько раз сила взаимодействия двух свободных зарядов в диэлектрике меньше, чем в вакууме. Ослабление взаимодействия осуществляется из-за экранирования свободных зарядов связанными зарядами, возникающими в результате поляризации среды.

Для описания электрического поля системы зарядов с учетом поляризационных свойств диэлектриков вводится вектор *электрического смещения*. Связь между вектором поляризации P , вектором напряженности электрического поля в диэлектрике E и вектором электрического смещения (электрической индукции) в диэлектрике для изотропной среды записывается как $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$.

Теорема Остроградского–Гаусса для электростатического поля в диэлектрике: *поток вектора электрического смещения сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности свободных электрических зарядов.*

Конденсатором называется система из двух проводников с одинаковыми по модулю, но противоположными по знаку зарядами, форма и расположение которых таковы, что на электрическое поле, сосредоточенное между проводниками, не воздействуют внешние электрические поля. Различают сферические, цилиндрические и плоские конденсаторы. Проводники, составляющие конденсатор, называются *обкладками*.

Емкостью (емкостью) конденсатора называется физическая величина, равная отношению заряда q одного из проводников к разности потенциалов $\Delta\phi$ между его обкладками:

$$C = \frac{q}{\Delta\phi} = \frac{q}{U}.$$

Единица емкости в системе СИ есть емкость такого конденсатора, между обкладками которого возникает напряжение в 1 В

при заряде на его обкладках в 1 Кл. Эта единица называется **фарад** (Ф): $1\text{Ф} = \frac{1\text{КК}}{1\text{В}}$.

На практике чаще применяются более мелкие единицы емкости — **микрофарад** (мкФ или μF), **нанофарад** (нФ или pF) и **пикофарад** (пФ или pF): $1\text{Ф} = 10^6\text{ мкФ} = 10^9\text{ нФ} = 10^{12}\text{ пФ}$.

Простейший конденсатор — система из двух плоских проводящих пластин, расположенных параллельно друг другу на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии и разделенных слоем диэлектрика. Такой конденсатор называется **плоским**. Электрическое поле плоского конденсатора в основном локализовано между пластинами. Каждая из заряженных пластин плоского конденсатора создает вблизи поверхности электрическое поле, модуль напряженности которого выражается соотношением (см. Савельев, т. 2 § 14) $E_1 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$. Применение принципа суперпозиции позволяет определить модуль напряженности поля внутри конденсатора

($E = 2E_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$) и вне конденсатора ($E = 0$). Величина емкости определяется геометрией конденсатора (формой и размерами обкладок и величиной зазора между ними), а также диэлектрическими свойствами среды, заполняющей пространство между обкладками:

$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$, где S — площадь каждой обкладки, d — расстояние между обкладками, ε — диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего пространство между обкладками.

Конденсаторы могут соединяться между собой, образуя батареи конденсаторов. При **параллельном соединении** конденсаторов (см. рисунок 4) напряжения на конденсаторах одинаковы: $U_1 = U_2 = U$, а заряды равны $q_1 = C_1 U$ и $q_2 = C_2 U$. Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор емкости C , заряженный зарядом $q = q_1 + q_2$ при напряжении между обкладками равном U . Отсюда следует $C = \frac{q_1 + q_2}{U}$ или $C = C_1 + C_2$.

Таким образом, при параллельном соединении емкости складываются.

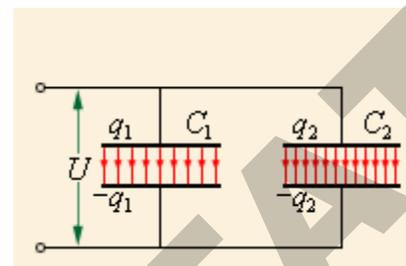


Рисунок 4 — Параллельное соединение конденсаторов

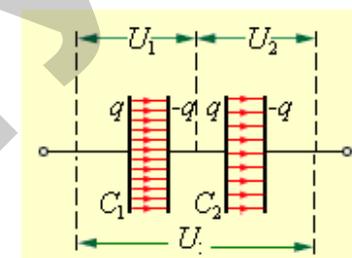


Рисунок 5 — Последовательное соединение конденсаторов

При **последовательном соединении** (см. рисунок 5) одинаковыми оказываются заряды обоих конденсаторов: $q_1 = q_2 = q$, а напряжения на них равны $U_1 = \frac{q}{C_1}$ и $U_2 = \frac{q}{C_2}$. Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор, заряженный зарядом q при напряжении между обкладками $U = U_1 + U_2$. Следовательно, $C = \frac{q}{U_1 + U_2}$

$$\text{или } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

При последовательном соединении конденсаторов складываются **обратные величины емкостей**.

Формулы для параллельного и последовательного соединения остаются справедливыми при любом числе конденсаторов, соединенных в батарею.

Лабораторная работа 2.1

«Последовательное и параллельное соединение конденсаторов»

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике (Савельев, т. 2, §§ 12–20).

Цель работы — выработать навыки проведения эксперимента, анализа экспериментальных данных и расчета погрешностей измерений.

Задачи работы:

- 1) освоить методику определения емкости неизвестного конденсатора;
- 2) экспериментально определить емкости двух конденсаторов;
- 3) экспериментально подтвердить справедливость формул для расчета общей емкости при последовательном и параллельном соединениях конденсаторов.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Что такое электрическое поле?
2. Что называется напряженностью электростатического поля?
3. Что называется потенциалом электростатического поля?
4. Дайте определение емкости конденсатора.
5. В каких единицах измеряется емкость?
6. Нарисуйте схемы последовательного и параллельного соединений двух конденсаторов.

Методика и порядок измерений

При последовательном соединении конденсаторов $q = U_1 C_1 = U_2 C_2$ (см. рисунок 5), откуда, учитывая что $U_1 = U - U_2$, получаем $\frac{C_1}{C_2} = \frac{U_2}{U - U_2}$. Если известна емкость одного из конденса-

торов, например $C_2 = C_0$, то измерив напряжения U и $U_2 = U_0$ (см. рисунок), можно определить емкость другого конденсатора

$$C_x = C_1 \cdot C_x = \frac{U_0}{U - U_0} C_0.$$

Измерения

1. Ознакомьтесь с принципиальной схемой лабораторной установки, проверьте правильность ее сборки (рисунок 6).

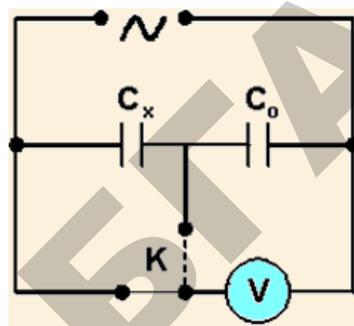


Рисунок 6 — Принципиальная схема и общий вид лабораторной установки: C_0 — конденсатор с известной емкостью, C_x — конденсатор с неизвестной емкостью, K — переключатель, V — вольтметр

2. На макете имеется два конденсатора с неизвестной емкостью C_1 и C_2 . С помощью переключек их можно включить поочередно в качестве C_x , соединить параллельно или последовательно и полученное соединение также включить в качестве C_x . Вам необходимо определить экспериментально емкости C_1 и C_2 , а также емкости при параллельном и последовательном соединении этих конденсаторов. Для этого, собрав соответствующую схему, произведите измерения U_0 при трех различных значениях U , указанных преподавателем, и заполните соответствующую таблицу.

Таблица 1 — Конденсатор C_1

№ изм.	C_0 ,	U_0 ,	U ,	C_x ,	ΔC_x
1.					
2.					
3.					
Среднее значение					

Таблица 2 — Конденсатор C_2

№ изм.	C_0 ,	U_0 ,	U ,	C_x ,	ΔC_x
1.					
2.					
3.					
Среднее значение					

Таблица 3 — Параллельное соединение C_1 и C_2

№ изм.	C_0 ,	U_0 ,	U ,	C_x ,	ΔC_x
1.					
2.					
3.					
Среднее значение					

Таблица 4 — Последовательное соединение C_1 и C_2

№ изм.	C_0 ,	U_0 ,	U ,	C_x ,	ΔC_x
1.					
2.					
3.					
Среднее значение					

3. Рассчитайте по формулам для различных соединений конденсаторов величины суммарных емкостей при параллельном и последовательном соединении конденсаторов C_1 и C_2 . Величины C_1 и C_2 возьмите из таблиц 1 и 2. Заполните таблицу.

Сравнение результатов	Рассчитанная величина емкости	Экспериментально определенная величина емкости
Параллельное соединение		Среднее значение из таблицы 3
Последовательное соединение		Среднее значение из таблицы 4

4. Запишите ответ. Сформулируйте выводы по ответу.

Вопросы и задания для контроля

I уровень

1. Что такое электрическое поле?
2. Что является силовой характеристикой электрического поля? Дайте ее определение.
3. Сформулируйте принцип суперпозиции электрических полей.
4. Что является энергетической характеристикой электрического поля? Дайте ее определение.
5. Что такое силовые линии и эквипотенциальные поверхности? Какую форму они имеют для поля точечного заряда, двух точечных зарядов?
6. Что такое конденсатор и для чего он используется?
7. Дайте определение емкости конденсатора.
8. Как можно соединять конденсаторы?
9. Чему равна общая емкость нескольких конденсаторов соединенных последовательно?
10. Чему равна общая емкость нескольких конденсаторов соединенных параллельно?
11. В каких единицах измеряется емкость?
12. Запишите формулу для емкости плоского конденсатора.

II уровень

13. Как распределяются заряды в проводнике?
14. Каким образом можно нейтрализовать влияние электростатических полей?
15. Как выглядят силовые линии и эквипотенциальные поверхности внутри плоского конденсатора?
16. Что такое однородное электрическое поле? Является ли поле внутри плоского конденсатора однородным?
17. За счет чего можно увеличить емкость плоского конденсатора, если его геометрические размеры должны оставаться постоянными?

III уровень

18. Конденсатор емкостью $C_1 = 3$ мкФ был заряжен до разности потенциалов 40 В. После отключения от источника тока конденсатор был соединен параллельно с другим незаряженным конденсатором емкостью $C_2 = 5$ мкФ. Какое количество энергии первого

конденсатора израсходуется на образование искры в момент присоединения второго конденсатора?

19. Два плоских воздушных конденсатора одинаковой емкости $C_1 = C_2 = C$ соединены в батарею последовательно и подключены к источнику тока с электродвижущей силой \mathcal{E} . Как изменится разность потенциалов U_1 на пластинах первого конденсатора, если пространство между пластинами второго конденсатора, не отключая источника тока, заполнить диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 7$?

20. Конденсаторы емкостью $C_1 = 5$ мкФ и $C_2 = 10$ мкФ заряжены до напряжений $U_1 = 60$ В и $U_2 = 100$ В соответственно. Определить напряжение на обкладках конденсаторов после их соединения обкладками, имеющими одноименные заряды.

Лабораторная работа 2.2 «Определение диэлектрической проницаемости плоской пластины из диэлектрика»

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.2, §§ 12–20).

Цель работы — выработать навыки проведения эксперимента, анализа экспериментальных данных и расчета погрешностей измерений.

Задачи работы:

- 1) изучить устройство плоского конденсатора;
- 2) экспериментально определить диэлектрическую проницаемость плоской пластины из диэлектрика.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Дайте определение диэлектрической проницаемости вещества.
2. Какие вещества называются диэлектриками?
3. Какие типы диэлектриков Вы знаете? Назовите вещества, относящиеся к диэлектрикам различных типов.
4. Расскажите о процессе поляризации диэлектриков различных типов. Дайте характеристику различным видам поляризации: электронной, ориентационной и ионной.

Методика и порядок измерений

Пусть пространство между обкладками плоского конденсатора заполнено различными диэлектриками (рисунок 7), располагающимися в виде слоев параллельно обкладкам (многослойный конденсатор). С помощью теоремы Остроградского–Гаусса для электростатического поля в диэлектрике можно доказать, что емкость такого многослойного конденсатора рассчитывается по формуле

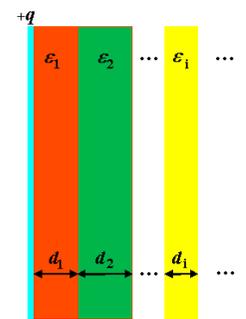


Рисунок 7 — Многослойный конденсатор

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} + \dots + \frac{d_i}{\varepsilon_i} + \dots}$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ — электрическая по-

стоянная, S — площадь одной обкладки, d_i, ε_i — соответственно толщина и диэлектрическая проницаемость i -го слоя диэлектрика.

Пусть имеется плоский воздушный конденсатор с расстоянием между пластинами d . Емкость такого конденсатора $C_B = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$ (для

воздуха $\varepsilon \cong 1$). Если в пространство между его обкладками внести параллельно обкладкам плоскую пластину из диэлектрика толщиной $d_2 < d$, то получится трехслойный конденсатор, у которого первый и третий слои представляют собой воздушный диэлектрик ($d_1 + d_3 = d - d_2$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 1$), а второй — слой исследуемого диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε_2 .

Емкость получившегося конденсатора:

$$C_d = \frac{\varepsilon_0 S}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_3}{\varepsilon_3} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S}{d_2 + (d - d_2) \varepsilon_2} = \frac{C_B d \varepsilon_2}{d_2 + (d - d_2) \varepsilon_2}.$$

Отсюда выразим $\varepsilon_2 = \frac{C_d d_2}{C_B d - C_d (d - d_2)}$. Это и есть искомое значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon_2$ плоской пластины из диэлектрика.

Измерения

1. Ознакомьтесь с принципиальной схемой лабораторной установки, проверьте правильность ее сборки (рисунок 8).

2. Экспериментально определите величины емкостей $C_B^{\text{эксп}}$ и $C_d^{\text{эксп}}$. Для этого используйте методику и порядок измерений, описанные в лабораторной работе 2.1. Величины напряжений U задает преподаватель. U_0 — напряжение на конденсаторе C_0 до введения пластины из диэлектрика в воздушный конденсатор; U_0^d — напряжение на конденсаторе C_0 после введения пластины из диэлектрика в воздушный конденсатор.

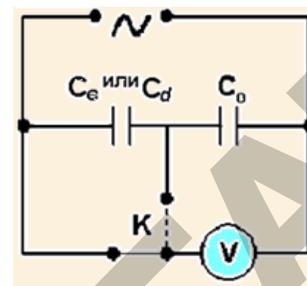


Рисунок 8 — Принципиальная схема и общий вид лабораторной установки: C_0 — конденсатор с известной емкостью, C_B — плоский воздушный конденсатор с неизвестной емкостью, C_d — тот же конденсатор с плоской пластиной из диэлектрика, K — переключатель, V — вольтметр

3. Определенные таким образом величины $C_B^{\text{эксп}}$ и $C_d^{\text{эксп}}$ включают в себя монтажную емкость схемы ΔC , которую приблизительно можно определить как разность между значением $C_B^{\text{эксп}}$ и рассчитанным значением $C_B = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$, т. е. $\Delta C = C_B^{\text{эксп}} - C_B$. Рассчитайте C_B и найдите ΔC .

4. По рассчитанному значению ΔC определите $C_d = C_d^{\text{эксп}} - \Delta C$.

5. Определите ε по формуле $\varepsilon = \frac{C_d d_2}{C_B d - C_d (d - d_2)}$. Заполните таблицу.

Материал диэлектрика _____; $d_2 =$ _____; $d =$ _____;								
$S =$ _____; $C_B = \frac{\varepsilon_0 S}{d} =$ _____; $C_0 =$ _____								
№ пп	U	U_0	U_0^d	$C_B^{\text{эксп}} = \frac{U_0 C_0}{U - U_0}$	$\Delta C = C_B^{\text{эксп}} - C_B$	$C_d^{\text{эксп}} = \frac{U_0^d C_0}{U - U_0^d}$	$C_d = C_d^{\text{эксп}} - \Delta C$	ε
1.								
2.								
3.								
Среднее								

6. Запишите ответ. Сформулируйте выводы по ответу.

Вопросы и задания для контроля

I уровень

1. Какие вещества называются диэлектриками?
2. Как различают диэлектрики по типам? Назовите вещества, относящиеся к диэлектрикам различных типов.
3. Дайте определение поляризованности диэлектрика.
4. Как зависит поляризованность диэлектрика от напряженности результирующего электрического поля?
5. Что такое связанные заряды?
6. Дайте определение диэлектрической проницаемости вещества.
7. Что такое вектор электрического смещения?
8. Во сколько раз сила взаимодействия между точечными зарядами в веществе меньше силы взаимодействия их в вакууме?

II уровень

9. Расскажите о процессе поляризации диэлектрика. Дайте характеристику различным видам поляризации: электронной, ориентационной и ионной.
10. Сформулируйте и запишите связь вектора поляризованности с поверхностной плотностью связанных зарядов.
11. Сформулируйте и запишите теорему Остроградского–Гаусса для электростатического поля в диэлектрике.
12. Выведите формулу для определения общей емкости нескольких последовательно соединенных конденсаторов.
13. Конденсатор C_1 выдерживает напряжение U_1 , а конденсатор C_2 — напряжение U_2 . Какое напряжение выдержит батарея из двух последовательно соединенных конденсаторов?
14. Плоский конденсатор с площадью пластин $S = 200 \text{ см}^2$ каждая заряжен до разности потенциалов $U = 2 \text{ кВ}$. Расстояние между пластинами $d = 2 \text{ см}$. Диэлектрик — стекло. Определить энергию W поля конденсатора.

III уровень

15. Определить электрическую емкость плоского конденсатора с двумя слоями диэлектриков: фарфора толщиной $d_1 = 2 \text{ мм}$ и эбонита толщиной $d_2 = 1,5 \text{ мм}$, если площадь S пластин равна 100 см^2 .
16. Между пластинами плоского конденсатора, находящимися на расстоянии 5 мм друг от друга, приложена разность потенциалов

150 В. К одной из пластин прилежит плоскопараллельная пластинка фарфора толщиной 3 мм . Найти напряженность электрического поля в воздухе и фарфоре.

17. Плоский воздушный конденсатор емкостью $C = 10 \text{ пФ}$ заряжен до разности потенциалов $U_1 = 500 \text{ В}$. После отключения конденсатора от источника напряжения расстояние между пластинами конденсатора было увеличено в 3 раза. Определить: 1) разность потенциалов на обкладках конденсатора после их раздвижения; 2) работу внешних сил по раздвижению пластин.

2. Постоянный электрический ток

Краткая теория

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов. За направление тока принимают направление движения положительных зарядов, которое противоположно направлению движения отрицательных зарядов.

Количественной мерой электрического тока служит **сила тока** I — **скалярная физическая величина, равная отношению заряда dq , переносимого через поперечное сечение проводника за интервал времени dt , к этому интервалу времени:**
$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Если сила тока и его направление не изменяются со временем, то такой ток называется **постоянным**.

В Международной системе единиц СИ сила тока измеряется в **амперах** (А). Единица измерения тока 1А устанавливается по магнитному взаимодействию двух параллельных проводников с током.

В качестве характеристики, задающей распределение силы тока по поперечному сечению проводника служит **вектор плотности тока** \vec{j} . **Плотностью электрического тока** называется вектор \vec{j} , совпадающий с направлением электрического тока в рассматриваемой точке и численно равный отношению силы тока dI сквозь малый элемент поверхности, перпендикулярной направлению тока, к площади dS_{\perp} этого элемента:
$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}.$$

Сила тока сквозь произвольную поверхность S определяется как поток вектора плотности тока $I = \int_S \vec{j} d\vec{S}$, где $d\vec{S} = \vec{n} dS$, \vec{n} — единичный вектор нормали к площадке dS .

Если за время dt через поперечное сечение S проводника переносится заряд $dq = nevSdt$ (n, e, v — концентрация, заряд и средняя скорость упорядоченного движения зарядов), то сила тока
$$I = \frac{dq}{dt} = nevS,$$
 а плотность тока $\vec{j} = ne\vec{v}$.

Постоянный электрический ток может быть создан только в **замкнутой цепи**, в которой свободные носители заряда циркулируют по замкнутым траекториям. Электрическое поле в разных точках такой цепи неизменно во времени. Следовательно, электрическое поле в цепи постоянного тока имеет характер замороженного электростатического поля. Известно, что при перемещении электрического заряда в электростатическом поле по замкнутой траектории, работа электрических сил равна нулю. Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие в замкнутой цепи устройства, способного создавать и поддерживать разность потенциалов на участках цепи за счет работы сил **неэлектростатического происхождения**. Такие устройства называются **источниками постоянного тока**. Силы неэлектростатического происхождения, действующие на свободные носители заряда со стороны источников тока, называются **сторонними силами**.

Природа сторонних сил может быть различной. В гальванических элементах или аккумуляторах они возникают в результате электрохимических процессов, в генераторах постоянного тока сторонние силы возникают при движении проводников в магнитном поле. Источник тока в электрической цепи играет ту же роль, что и насос в замкнутой гидравлической системе, который необходим для поднятия жидкости на более высокий потенциальный уровень в некоторой точке замкнутой гидравлической цепи. Под действием сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника тока **против** сил электростатического поля, соответственно в остальных точках цепи заряды движутся под действием электрических сил, и таким образом существует непрерывное направленное движение зарядов во всей замкнутой цепи или постоянный электрический ток.

При перемещении зарядов по замкнутой цепи работа постоянно во времени электрического поля равна нулю. Эта работа складывается из суммы работ электростатического поля во внешней цепи и работы поля сторонних сил, действующих внутри источника тока.

Физическая величина, равная отношению работы $A_{ст}$ сторонних сил при перемещении заряда q по замкнутой электрической цепи или ее участку к величине этого заряда, называется

электродвижущей силой (ЭДС): $\varepsilon = \frac{A_{ст}}{q}$. Электродвижущая сила,

как и разность потенциалов, измеряется в *вольтах* (В).

Вне источника напряженность поля сторонних сил отсутствует, т.е. равна нулю, поэтому при перемещении положительного заряда по замкнутой цепи работу сторонних сил можно представить как интеграл по всему замкнутому контуру $A_{ст} = q \oint \vec{E}_{ст} d\vec{l}$ ($\vec{E}_{ст}$ — напряженность поля сторонних сил, определяемая сторонней силой, действующей на единичный положительный заряд внутри источника). Отсюда ЭДС, действующая в замкнутой цепи — это циркуляция вектора напряженности поля сторонних сил: $\varepsilon = \oint \vec{E}_{ст} d\vec{l}$. Если цепь разомкнута, то ЭДС останется по величине такой же, поскольку определяется только на промежутке источника тока.

Цепь постоянного тока можно разбить на определенные участки. Те участки, на которых не действуют сторонние силы (т. е. участки, не содержащие источников тока), называются **однородными**. Участки, включающие источники тока, называются **неоднородными**.

При перемещении положительного заряда по некоторому участку 1–2 цепи работу совершают как электростатические (кулоновские), так и сторонние силы:

$$A_{12} = q \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} + q \int_1^2 \vec{E}_{ст} d\vec{l} = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q\varepsilon_{12}.$$

Величину $U_{12} = \frac{A_{12}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}$ принято называть **напряжением** на участке цепи 1–2. В случае однородного участка напряжение равно разности потенциалов: $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$

Немецкий физик Г. Ом в 1826 году экспериментально установил, что сила тока I , текущего по однородному металлическому проводнику (т. е. проводнику, в котором не действуют сторонние силы), пропорциональна напряжению U на концах проводника: $I = \frac{1}{R} U$, где $R = \text{const}$.

Это соотношение выражает **закон Ома для однородного участка цепи**: сила тока в проводнике прямо пропорциональна при-

ложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.

Величину R принято называть **электрическим сопротивлением**. Проводник, обладающий электрическим сопротивлением, называется **резистором**.

В системе СИ единицей электрического сопротивления проводников служит **ом** (Ом). Сопротивлением в 1 Ом обладает такой участок цепи, в котором при напряжении 1 В возникает ток силой 1 А. Проводники, подчиняющиеся закону Ома, называются **линейными**. Графическая зависимость силы тока I от напряжения U (такие графики называются **вольтамперными характеристиками**, сокращенно ВАХ) изображается прямой линией, проходящей через начало координат. Следует отметить, что существует много материалов и устройств, не подчиняющихся закону Ома, например, полупроводниковый диод или газоразрядная лампа. Даже у металлических проводников при достаточно больших токах наблюдается отклонение от линейной зависимости между током и напряжением, т. е. нарушение закона Ома. Это обусловлено тем, что электрическое сопротивление металлических проводников

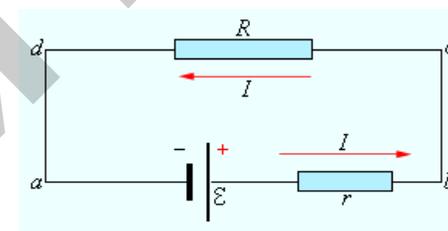


Рисунок 9 — Замкнутая цепь постоянного тока

растет с ростом температуры, что и скажется при разогреве проводника протекающим током. Для участка цепи, содержащего ЭДС, закон Ома записывается в следующей форме:

растет с ростом температуры, что и скажется при разогреве проводника протекающим током. Для участка цепи, содержащего ЭДС, закон Ома записывается в следующей форме:

$$IR = U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon = \Delta\varphi_{12} + \varepsilon.$$

Это соотношение принято называть **обобщенным законом Ома**.

На рисунке 9 изображена замкнутая цепь постоянного тока. Участок цепи (cd) является однородным. По закону Ома, $IR = \Delta\varphi_{cd}$. Участок (ab) содержит источник тока с ЭДС, равной ε . По закону Ома для неоднородного участка, $Ir = \Delta\varphi_{ab} + \varepsilon$.

Сложив оба равенства, получим: $I(R + r) = \Delta\varphi_{cd} + \Delta\varphi_{ab} + \mathcal{E}$. Но

$$\Delta\varphi_{cd} = \Delta\varphi_{ba} = -\Delta\varphi_{ab}. \text{ Поэтому } I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Эта формула выражает **закон Ома для полной цепи**: Сила тока в полной цепи равна электродвижущей силе источника, деленной на сумму сопротивлений однородного и неоднородного участков цепи.

Сопротивление r неоднородного участка на рисунке можно рассматривать как **внутреннее сопротивление источника тока**. В этом случае участок (ab) на рисунке 9 является внутренним участком источника. Если точки a и b замкнуть проводником, сопротивление которого мало по сравнению с внутренним сопротивлением источника ($R \ll r$), тогда в цепи потечет **ток короткого замыкания**

$$I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

Сила тока короткого замыкания — максимальная сила тока, которую можно получить от данного источника с электродвижущей силой \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r . У источников с малым внутренним сопротивлением ток короткого замыкания может быть очень велик и вызывать разрушение электрической цепи или источника. Например, у свинцовых аккумуляторов, используемых в автомобилях, сила тока короткого замыкания может составлять несколько сотен ампер. Особенно опасны короткие замыкания в осветительных сетях, питаемых от подстанций (тысячи ампер). Чтобы избежать разрушительного действия таких больших токов, в цепь включаются предохранители или специальные автоматы защиты сетей.

В ряде случаев для предотвращения опасных значений силы тока короткого замыкания к источнику подсоединяется некоторое внешнее балластное сопротивление. Тогда сопротивление r равно сумме внутреннего сопротивления источника и внешнего балластного сопротивления.

Если внешняя цепь разомкнута, то $\Delta\varphi_{ba} = -\Delta\varphi_{ab} = \mathcal{E}$, т. е. разность потенциалов на полюсах разомкнутой батареи равна ее ЭДС.

Если внешнее нагрузочное сопротивление R включено и через батарею протекает ток I , разность потенциалов на ее полюсах становится равной $\Delta\varphi_{ba} = \mathcal{E} - Ir$.

В зависимости от соотношения между величинами сопротивления внешней нагрузки и внутреннего сопротивления источник тока может работать в режиме генератора напряжения (внутреннее сопротивление мало по сравнению с сопротивлением нагрузки) и режиме генератора тока (внутреннее сопротивление велико в сравнении с сопротивлением нагрузки). Автомобильная аккумуляторная батарея вначале при запуске двигателя работает в режиме короткого замыкания как генератор тока, а при работающем двигателе действует как генератор напряжения.

На рисунке 10 дано схематическое изображение источника постоянного тока с ЭДС равной \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r в трех режимах: «холостой ход» (1), работа на нагрузку (2) и режим короткого замыкания (к. з.) (3). Указаны напряженность \vec{E} электрического поля внутри батареи и силы, действующие на положительные заряды: $\vec{F}_э$ — электрическая сила и $\vec{F}_{ст}$ — сторонняя сила. В режиме короткого замыкания электрическое поле внутри батареи исчезает.

Для измерения напряжений и токов в электрических цепях постоянного тока используются специальные приборы — **вольтметры** и **амперметры** (рисунок 11).

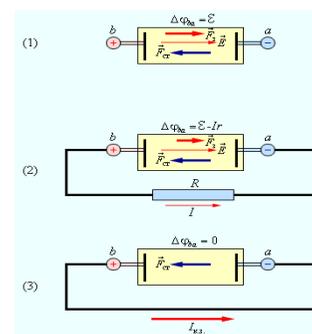


Рисунок 10 — Работа источника постоянного тока в различных режимах: (1) — режим «холостого хода», (2) — работа на нагрузку, (3) — режим короткого замыкания

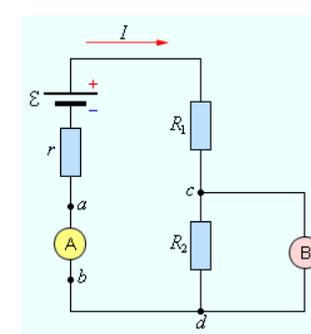


Рисунок 11 — Схема включения вольтметра и амперметра

Вольтметр предназначен для измерения разности потенциалов, приложенной к его клеммам. Он подключается **параллельно** уча-

стку цепи, на котором производится измерение разности потенциалов. Любой вольтметр обладает некоторым внутренним сопротивлением R_B . Для того чтобы вольтметр не вносил заметного перераспределения токов при подключении к измеряемой цепи, его внутреннее сопротивление должно быть велико по сравнению с сопротивлением того участка цепи, к которому он подключен. Для цепи, изображенной на рисунке 11, это условие записывается в виде: $R_B \gg R_2$. Это условие означает, что ток $I_B = \Delta\varphi_{cd} / R_B$, протекающий через вольтметр, много меньше тока $I = \Delta\varphi_{cd} / R_2$, который протекает по измеряемому участку цепи.

Поскольку внутри вольтметра не действуют сторонние силы, разность потенциалов на его клеммах совпадает по определению с напряжением. Поэтому можно говорить, что вольтметр измеряет напряжение.

Амперметр предназначен для измерения силы тока в цепи. Амперметр включается последовательно в разрыв электрической цепи, чтобы через него проходил весь измеряемый ток. Амперметр также обладает некоторым внутренним сопротивлением R_A . В отличие от вольтметра, внутреннее сопротивление амперметра должно быть достаточно малым по сравнению с полным сопротивлением всей цепи. Для цепи на рисунке сопротивление амперметра должно удовлетворять условию $R_A \ll (r + R_1 + R_2)$, чтобы при включении амперметра ток в цепи не изменялся.

Проводники в электрических цепях могут соединяться последовательно и параллельно.

При последовательном соединении проводников (рисунок 12) сила тока во всех проводниках одинакова: $I_1 = I_2 = I$.

По закону Ома, напряжения U_1 и U_2 на проводниках равны $U_1 = IR_1$, $U_2 = IR_2$. Общее напряжение U на обоих проводниках равно сумме напряжений U_1 и U_2 : $U = U_1 + U_2 = I(R_1 + R_2) = IR$, где R — электрическое сопротивление всей цепи. Отсюда следует: $R = R_1 + R_2$.

При последовательном соединении полное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных проводников.

Этот результат справедлив для любого числа последовательно соединенных проводников.

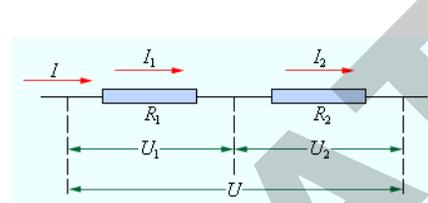


Рисунок 12 — Последовательное соединение проводников

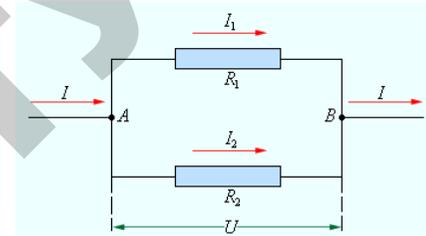


Рисунок 13 — Параллельное соединение проводников

При параллельном соединении (рисунок 13) напряжения U_1 и U_2 на обоих проводниках одинаковы: $U_1 = U_2 = U$. Сумма токов $I_1 + I_2$, протекающих по обоим проводникам, равна току в неразветвленной цепи: $I = I_1 + I_2$. Этот результат следует из того, что в точках разветвления токов (узлы A и B) в цепи постоянного тока не могут накапливаться заряды. Например, к узлу A за время Δt подтекает заряд $I\Delta t$, а утекает от узла за то же время заряд $I_1\Delta t + I_2\Delta t$. Следовательно, $I = I_1 + I_2$.

Записывая на основании закона Ома $I_1 = \frac{U}{R_1}$, $I_2 = \frac{U}{R_2}$, $I = \frac{U}{R}$,

где R — электрическое сопротивление всей цепи, получим $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

При параллельном соединении проводников величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям параллельно включенных проводников.

Этот результат справедлив для любого числа параллельно включенных проводников.

Практически любую сложную электрическую цепь (например, содержащую несколько замкнутых контуров, которые могут иметь общие участки, а каждый из контуров может иметь несколько источников тока и т. д.) можно рассчитать используя обобщенный закон Ома. Однако такой расчет достаточно сложен. Более просто эта задача решается с помощью двух **правил Кирхгофа**. Любая точка разветвления цепи, в которой сходится не менее трех про-

водников с током, называется **узлом**. Ток, входящий в узел, обычно, считается положительным, а выходящий из узла — отрицательным.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю, $\sum_i I_i = 0$.

Данное уравнение можно написать для всех N узлов цепи. Однако независимыми будут только $N-1$ уравнение, N -е будет следствием остальных.

Из обобщенного закона Ома, примененного для замкнутого контура, получается **второе правило Кирхгофа:** в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС, встречающихся в этом контуре, $\sum_i I_i R_i = \sum_k \mathcal{E}_k$.

Данное соотношение эквивалентно $\sum_i I_i R_i + \sum_k (-\mathcal{E}_k) = 0$, что означает — в замкнутой цепи алгебраическая сумма падений напряжений на всех элементах цепи равна нулю. Здесь \mathcal{E}_k — падение напряжения на источнике тока, которое равно ЭДС источника с обратным знаком.

При составлении указанных сумм положительными считаются те токи, направление которых совпадает с условно выбранным направлением обхода контура. Положительными считаются те ЭДС, которые внутри источника повышают потенциал положительных зарядов движущихся в выбранном направлении обхода, т. е. когда направление обхода совпадает с переходом положительных зарядов внутри источника от отрицательного полюса к положительному. Данное уравнение можно написать для всех замкнутых контуров, которые можно выделить в данной цепи. Однако независимыми будут только уравнения для тех контуров, которые нельзя получить наложением других контуров. Число независимых уравнений, составленных по первому и второму правилам Кирхгофа, равно количеству токов, текущих в разных звеньях цепи. Поэтому если заданы ЭДС и сопротивления, то могут быть вычислены все токи. Если для какого-либо тока получено отрицательное значение, это означает,

что в действительности он течет в направлении, противоположном, чем условно принятое при составлении уравнений.

При протекании тока по однородному участку цепи электрическое поле совершает работу. За время Δt по цепи протекает заряд $\Delta q = I\Delta t$. Электрическое поле на выделенном участке совершает работу:

$$\Delta A = (\varphi_1 - \varphi_2)\Delta q = \Delta\varphi_{12}I\Delta t = UI\Delta t,$$

где $U = \Delta\varphi_{12}$ — напряжение.

Эту работу называют **работой электрического тока**.

Если обе части формулы $RI = U$, выражающей закон Ома для однородного участка цепи с сопротивлением R , умножить на $I\Delta t$, то получится соотношение $RI^2\Delta t = UI\Delta t = \Delta A$. Это соотношение выражает закон сохранения энергии для однородного участка цепи.

Работа ΔA электрического тока I , протекающего по неподвижному проводнику с сопротивлением R , преобразуется в тепло ΔQ , выделяющееся на проводнике: $\Delta Q = \Delta A = RI^2\Delta t$

Закон преобразования работы тока в тепло был экспериментально установлен независимо друг от друга Дж. Джоулем и Э. Ленцем и носит название **закона Джоуля–Ленца**.

Мощность электрического тока равна отношению работы тока ΔA к интервалу времени Δt , за которое эта работа была совершена:

$$P = \frac{\Delta A}{\Delta t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Работа электрического тока в СИ выражается в **джоулях** (Дж), мощность — в **ваттах** (Вт).

Рассмотрим полную цепь постоянного тока, состоящую из источника с электродвижущей силой \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r и внешнего однородного участка с сопротивлением R . **Закон Ома для полной цепи** записывается в виде $(R + r)I = \mathcal{E}$.

Умножив обе части этой формулы на $\Delta q = I\Delta t$, мы получим соотношение, выражающее закон сохранения энергии для полной цепи постоянного тока: $RI^2\Delta t + rI^2\Delta t = \mathcal{E}I\Delta t = \Delta A_{\text{ист}}$.

Первый член в левой части $\Delta Q = RI^2\Delta t$ — тепло, выделяющееся на внешнем участке цепи за время Δt , второй член $\Delta Q_{\text{ист}} = rI^2\Delta t$ — тепло, выделяющееся внутри источника за то же время. Выражение

$\mathcal{E} I \Delta t$ равно работе сторонних сил $\Delta A_{\text{ст}}$, действующих внутри источника.

При протекании электрического тока по замкнутой цепи работа сторонних сил $\Delta A_{\text{ст}}$ преобразуется в тепло, выделяющееся во внешней цепи (ΔQ) и внутри источника ($\Delta Q_{\text{ист}}$).
 $\Delta Q + \Delta Q_{\text{ист}} = \Delta A_{\text{ст}} = \mathcal{E} I \Delta t$.

Следует обратить внимание, что в это соотношение не входит работа электрического поля. При протекании тока по замкнутой цепи электрическое поле работы не совершает; поэтому тепло производится одними только сторонними силами, действующими внутри источника. Роль электрического поля сводится к перераспределению тепла между различными участками цепи.

Внешняя цепь может представлять собой не только проводник с сопротивлением R , но и какое-либо устройство, потребляющее мощность, например, электродвигатель постоянного тока. В этом случае под R нужно понимать *эквивалентное сопротивление нагрузки*. Энергия, выделяемая во внешней цепи, может частично или полностью преобразовываться не только в тепло, но и в другие виды энергии, например, в механическую работу, совершаемую электродвигателем. Поэтому вопрос об использовании энергии источника тока имеет большое практическое значение.

Лабораторная работа 2.3 «Компенсационный метод определения ЭДС»

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т. 2, §§ 24–28).

Цель работы — выработать навыки проведения эксперимента, анализа экспериментальных данных и расчета погрешностей измерений.

Задачи работы:

- 1) ознакомиться с компенсационным методом определения ЭДС;
- 2) экспериментально определить ЭДС источника тока.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Дайте определение электродвижущей силы (ЭДС).
2. Что такое сторонние силы? Приведите примеры сторонних сил различной природы.
3. В каких единицах измеряется электродвижущая сила?
4. В чем состоит различие однородных и неоднородных участков цепи постоянного тока?
5. Дайте определение понятия напряжения на любом участке цепи.

Методика и порядок измерений

Дана электрическая цепь, схема которой представлена на рисунке 14. Здесь ab — реохорд — тонкая длинная однородная проволока. По ней может скользить подвижный контакт c . Сопротивление реохорда R . ЭДС источника \mathcal{E} и его внутреннее сопротивление r .

По реохорду течет ток $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$.

Падение напряжения между точками bc $U_{bc} = IR_{bc}$, где R_{bc} — сопротивление участка bc .

Дополним схему гальваническим элементом с ЭДС $\mathcal{E}_1 < \mathcal{E}$ и нульгальванометром Γ (рисунок 15). Участок цепи $b\mathcal{E}_1cb$ можно рассматривать как два источника, соединенные параллельно. ЭДС одного источника равна \mathcal{E}_1 , а второго $U_{bc} = IR_{bc}$ — падению напряжения между точками b и c . Если $\mathcal{E}_1 < U_{bc}$, ток потечет от c к

\mathcal{E}_1 и стрелка нульгальванометра отклонится в одну сторону. Если же, $\mathcal{E}_1 > U_{bc}$ ток потечет от b к c и стрелка нульгальванометра отклонится в другую сторону.

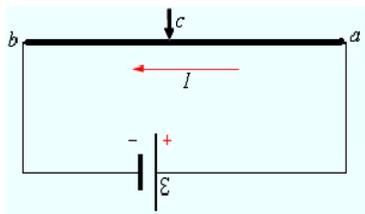


Рисунок 14

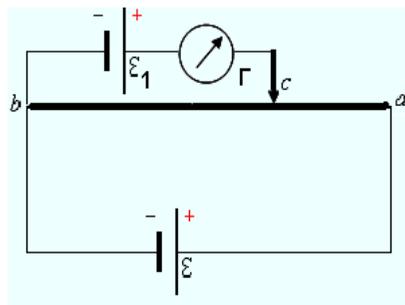


Рисунок 15

Поскольку $U_{bc} = IR_{bc}$, то, перемещая подвижный контакт, можно найти точку C такую, что $\mathcal{E}_1 = U_{bc}$ и ток на участке bC (через нульгальванометр) будет равен нулю. В этом случае ЭДС элемента компенсируется падением напряжения U_{bc} , т. е.

$\mathcal{E}_1 = U_{bc} = IR_1 = \frac{\mathcal{E}}{R+r} R_1$, где R_1 — сопротивление участка реохорда bc при условии компенсации.

Если вместо \mathcal{E}_1 включить другой элемент с ЭДС $\mathcal{E}_2 < \mathcal{E}$, то, рассуждая аналогично, получим $\mathcal{E}_2 = \frac{\mathcal{E}}{R+r} R_2$. Тогда

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho \frac{l_1}{S}}{\rho \frac{l_2}{S}} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Здесь l_1 и l_2 — длины участков реохорда, соответствующие сопротивлениям R_1 и R_2 .

Используя вместо элемента \mathcal{E}_2 нормальный элемент Вестона, ЭДС которого известна и равна \mathcal{E}_0 , можно из последнего равенства определить ЭДС неизвестного элемента \mathcal{E}_x , а именно $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_0 \frac{l_x}{l_0}$, где l_0 — длина участка bc при условии компенсации ЭДС \mathcal{E}_0 нормального элемента Вестона падением напряжения на этом участке.

Измерения

При выполнении данной работы необходимо соблюдать следующие условия:

- к одному концу реохорда необходимо присоединить одинаковые полюсы всех трех элементов;
- цепь должна замыкаться на очень короткое время, достаточное только для обнаружения наличия или отсутствия тока в цепи гальванометра (во избежание нагрева реохорда и поляризации источников);
- замыкание цепи с источником \mathcal{E} должно предшествовать замыканию цепи гальванометра (это достигается с помощью двойного ключа К).

1. Ознакомьтесь с принципиальной схемой лабораторной установки, проверьте правильность ее сборки (рисунок 16).

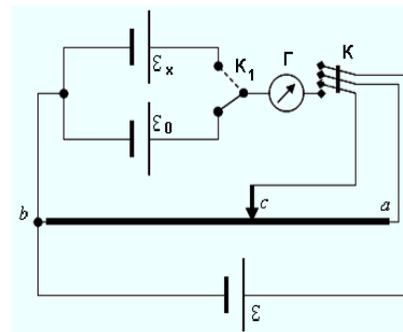


Рисунок 16 — Принципиальная схема и общий вид лабораторной установки. \mathcal{E}_0 — элемент Вестона, \mathcal{E}_x — исследуемый элемент, \mathcal{E} — источник постоянного тока, Γ — нульгальванометр, K_1 — ключ, К — двойной ключ, ab — реохорд

2. Ключ K_1 поставьте в нейтральное положение.
3. Включите в сеть источник постоянного тока \mathcal{E} . Если он регулируемый, установите напряжение $3 \div 5$ В.
4. Ключом K_1 включите в цепь элемент \mathcal{E}_x . Замыкая на очень короткое время ключ K и перемещая подвижный контакт C , добейтесь отсутствия тока через гальванометр. Запишите в таблицу значение l_x .
5. Ключом K_1 включите в цепь элемент \mathcal{E}_0 . Замыкая на очень короткое время ключ K и перемещая подвижный контакт C , добейтесь отсутствия тока через гальванометр. Запишите в таблицу значение l_0 .
6. Повторите измерения (пп. 4–5) не менее 10 раз.
7. Рассчитайте значения $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_0 \frac{l_x}{l_0}$ для каждого измерения, среднее значение \mathcal{E}_x , абсолютную и относительную погрешности.

№ измерения	l_x , см	l_0 , см	\mathcal{E}_x , В	$\Delta \mathcal{E}_x$, В
1				
⋮				
10				
Среднее				

8. Запишите ответ. Сформулируйте выводы по ответу.

Вопросы и задания для контроля

I уровень

1. Что такое электрический ток и что является его количественной мерой?
2. Что называется плотностью электрического тока?
3. Что такое линии тока и как они проводятся?
4. В каких единицах в системе СИ измеряется сила тока?
5. Как в системе СИ определяется сила тока в один ампер?
6. Запишите закон Ома для замкнутой неоднородной цепи.

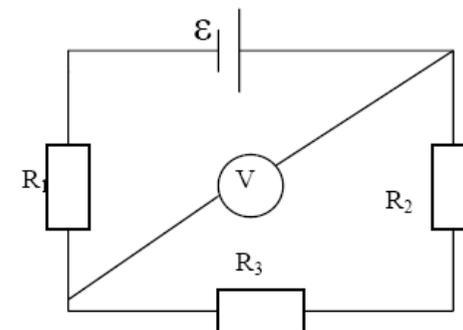
7. Каким прибором измеряется напряжение? Как он подключается? Какую величину внутреннего сопротивления должен иметь этот прибор?
8. Каким прибором измеряют силу электрического тока? Как он подключается? Какую величину внутреннего сопротивления должен иметь этот прибор?
9. Для чего в работе используется нормальный элемент Вестона?

II уровень

10. Каковы условия существования тока в электрической цепи?
11. Какова связь ЭДС, действующей в замкнутой цепи, с вектором напряженности поля сторонних сил?
12. Какие превращения энергии происходят в электрической цепи?
13. Почему метод измерения ЭДС называется компенсационным? В чем физическая сущность метода?
14. На что расходуется работа сторонних сил при протекании тока по замкнутой цепи?
15. Совершает ли работу электрическое поле при протекании тока по замкнутой цепи?

III уровень

16. Сопротивление $R_1 = 5$ Ом, вольтметр и источник тока соединены параллельно. Вольтметр показывает напряжение $U_1 = 19$ В. Если заменить сопротивление R_1 на $R_2 = 12$ Ом, то вольтметр показывает напряжение $U_2 = 12$ В. Определить ЭДС источника тока и его внутреннее сопротивление. Током через вольтметр пренебречь



17. ЭДС батареи $\mathcal{E} = 100$ В, сопротивления $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 200$ Ом и $R_3 = 300$ Ом, сопротивление вольтметра $R_V = 2$ кОм. Какую разность потенциалов показывает вольтметр?
18. ЭДС батареи $\mathcal{E} = 12$ В. При силе тока $I = 4$ А КПД батареи $\eta = 0,6$. Определить внутреннее сопротивление r батареи.

Лабораторная работа 2.4

«Изучение зависимости напряжения на зажимах, мощности и КПД источника от внешнего сопротивления и силы тока»

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.2, §§ 24–28).

Цель работы — выработать навыки проведения эксперимента, анализа экспериментальных данных и расчета погрешностей измерений.

Задачи работы:

- 1) закрепить знания законов постоянного электрического тока.
- 2) экспериментальное изучение зависимостей:
- 3) напряжения на зажимах источника от внешнего сопротивления и тока;
- 4) полезной мощности от внешнего сопротивления и тока;
- 5) КПД источника от внешнего сопротивления и тока.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Какой участок цепи называется однородным?
2. Сформулируйте и запишите закон Ома для однородного участка цепи.
3. Какой участок цепи называется неоднородным?
4. Сформулируйте и запишите закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС (обобщенный закон Ома).
5. Что такое электрическое сопротивление, в каких единицах оно измеряется? Что такое резистор?
6. Какие приборы используются для измерения напряжений и токов в электрических цепях?

Методика и порядок измерений

Для источника с ЭДС, равной \mathcal{E} , и внутренним сопротивлением r в замкнутой цепи при изменении внешнего сопротивления R от нуля до бесконечности, напряжение на зажимах источника будет меняться от нуля до максимального значения, равного ЭДС источника.

Полная мощность источника, то есть работа, совершаемая сторонними силами за единицу времени, равна $P_{\text{ист}} = \mathcal{E}I = \frac{\mathcal{E}^2}{R+r}$.

Во внешней цепи выделяется мощность

$$P = PI^2 = \mathcal{E}I - rI^2 = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}$$

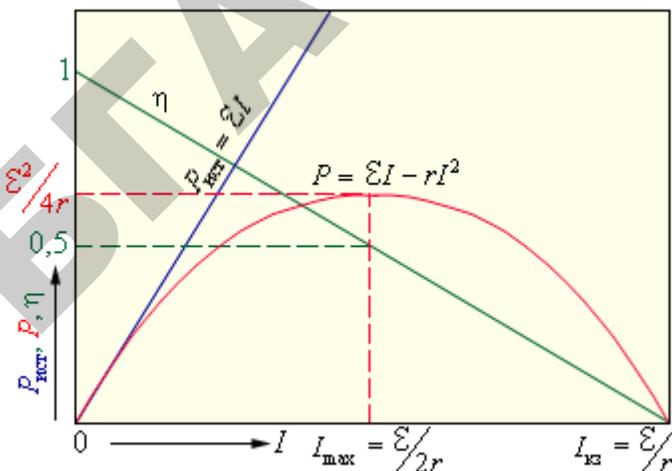


Рисунок 17 — Зависимость мощности источника $P_{\text{ист}}$, мощности во внешней цепи P и КПД источника η от силы тока

Отношение $\eta = \frac{P}{P_{\text{ист}}}$, равное $\eta = \frac{P}{P_{\text{ист}}} = 1 - \frac{rI}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R+r}$, называется

коэффициентом полезного действия источника.

На рисунке 17 графически представлены зависимости мощности источника $P_{\text{ист}}$, полезной мощности P , выделяемой во внешней цепи, и коэффициента полезного действия η от тока в цепи I для источника с ЭДС, равной \mathcal{E} , и внутренним сопротивлением r . Ток в цепи может изменяться в пределах от $I=0$ (при $R=\infty$) до

$$I = I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r} \quad (\text{при } R=0).$$

Из приведенных графиков видно, что максимальная мощность во внешней цепи P_{\max} , равная $P_{\max} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}$, достигается при $R = r$.

При этом ток в цепи $I_{\max} = \frac{1}{2} I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{2r}$, а КПД источника равен 50 %.

Максимальное значение КПД источника достигается при $I \rightarrow 0$, т. е. при $R \rightarrow \infty$. В случае короткого замыкания полезная мощность $P = 0$ и вся мощность выделяется внутри источника, что может привести к его перегреву и разрушению. КПД источника при этом обращается в нуль.

Измерения

1. Ознакомьтесь с принципиальной схемой лабораторной установки, проверьте правильность ее сборки (рисунок 18).

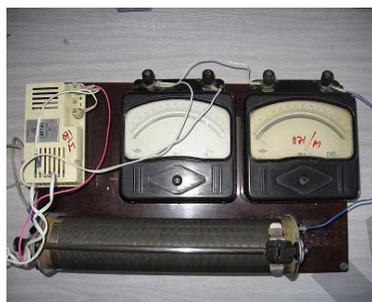
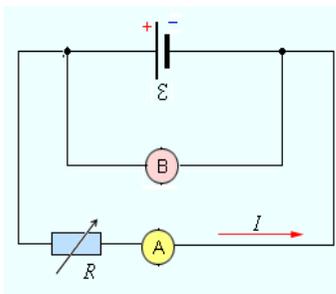


Рисунок 18 — Принципиальная схема и общий вид лабораторной установки.

\mathcal{E} — исследуемый источник тока, R — реостат, В — вольтметр, А — амперметр

2. Включите в сеть источник постоянного тока \mathcal{E} . Если он регулируемый, установите напряжение по указанию преподавателя.

3. Изменяйте сопротивление реостата в соответствии с рекомендациями преподавателя, записывая при этом показания амперметра и вольтметра в таблицу.

4. Закончив измерения, рассчитайте соответствующие значения $R = \frac{U}{I}$ и $P = IU$.

5. Выберите два значения тока I_1 и I_2 , существенно отличающихся друг от друга, и определите внутреннее сопротивление (r) и ЭДС (\mathcal{E}) источника, решив систему уравнений:

$$\begin{cases} U_1 = \mathcal{E} - I_1 r; \\ U_2 = \mathcal{E} - I_2 r. \end{cases}$$

6. Рассчитайте значения КПД источника $\eta = \frac{R}{R+r}$ в каждой

точке.

7. По полученным данным, постройте графики зависимостей:

- напряжения от сопротивления;
- напряжения от силы тока;
- полезной мощности от сопротивления;
- полезной мощности от силы тока;
- КПД от сопротивления
- КПД от силы тока.

8. Сравните рассчитанное значение ЭДС с максимальным измеренным напряжением, рассчитанное значение внутреннего сопротивления с определенным по графику $P(R)$ для источника с ЭДС, равной \mathcal{E} , и внутренним сопротивлением r .

Таблица

№ измерения	U , В	I , А	R , Ом	P , Вт	η
1					
⋮					
15					

9. Запишите ответ. Сформулируйте выводы по ответу.

Вопросы и задания для контроля

I уровень

1. Как практически измерить напряжение и силу тока на участке цепи?
2. Каким образом могут соединяться проводники в электрических цепях?
3. Как определить общее сопротивление цепи при последовательном соединении проводников?
4. Как определить общее сопротивление цепи при параллельном соединении проводников?
5. Что такое ток короткого замыкания и от чего зависит его величина?
6. Как избежать разрушительного действия тока короткого замыкания?
7. Что такое вольтамперная характеристика (ВАХ)? Приведите примеры ВАХ. Все ли материалы и устройства подчиняются закону Ома?
8. Сформулируйте и запишите формулу закона Джоуля–Ленца.
9. Что такое работа и мощность электрического тока? В каких единицах они измеряются?
10. Дайте определение полезной мощности и коэффициента полезного действия (КПД) электрической цепи.

II уровень

11. Изобразите схематически электрические цепи при работе источника тока в различных режимах — «холостого хода», работы на нагрузку и короткого замыкания.
12. Получите выражение для КПД электрической цепи.
13. За счет каких сил совершается полезная работа при движении зарядов по замкнутой цепи?
14. При каком внешнем сопротивлении от источника тока можно получить максимальную полезную мощность?

III уровень

15. Выведите выражение для определения величины внешнего сопротивления, при котором от источника ЭДС можно получить максимальную полезную мощность.
16. ЭДС элемента равен 1,6 В и внутреннее его сопротивление — 0,5 Ом. Чему равен КПД элемента при силе тока 2,4 А?

3. Электрический ток в металлах и электролитах

Краткая теория

Электрический ток в металлах

Электрический ток в металлах — это упорядоченное движение электронов под действием электрического поля. Опыты показывают, что при протекании тока по металлическому проводнику не происходит переноса вещества, следовательно, ионы металла не принимают участия в переносе электрического заряда.

Наиболее убедительное доказательство электронной природы тока в металлах было получено в опытах с проявлением сил инерции электронов. Идея таких опытов и первые качественные результаты принадлежат русским физикам Л. И. Мандельштаму и Н. Д. Папалекси (1913 г.). В 1916 году американский физик Р. Толмен и шотландский физик Б. Стюарт усовершенствовали методику этих опытов и выполнили количественные измерения, неопровержимо доказавшие, что ток в металлических проводниках обусловлен движением электронов.

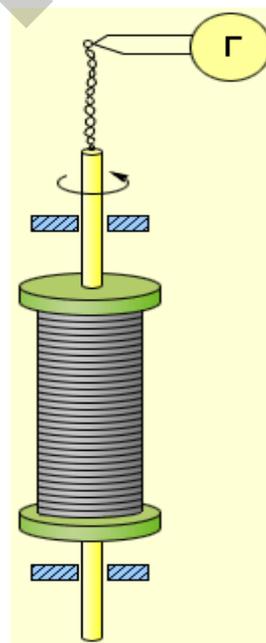


Рисунок 19

Схема опыта Толмена и Стюарта показана на рисунке 19. Катушка с большим числом витков тонкой проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси. Концы катушки с помощью гибких проводов были присоединены к чувствительному баллистическому гальванометру Г. Раскрученная катушка резко тормозилась, и в цепи возникал кратковременный ток, обусловленный инерцией носителей заряда. Полный заряд, протекающий по цепи, измерялся по отбросу стрелки гальванометра.

При торможении вращающейся катушки на каждый носитель заряда e действует тормозящая сила $F = -m \frac{dv}{dt}$, которая играет роль сторонней силы, то есть силы не-

электрического происхождения. Сторонняя сила, отнесенная к единице заряда, по определению является напряженностью $E_{ст}$ поля сторонних сил:

$$E_{ст} = -\frac{m}{e} \frac{dv}{dt}.$$

Следовательно, в цепи при торможении катушки возникает электродвижущая сила:

$$\mathcal{E} = E_{ст} l = -\frac{m}{e} \frac{dv}{dt} l,$$

где l — длина проволоки катушки. За время торможения катушки по цепи протечет заряд:

$$q = \int I dt = \frac{1}{R} \int \mathcal{E} dt = \frac{m}{e} \frac{lv_0}{R},$$

где I — мгновенное значение силы тока в катушке, R — полное сопротивление цепи, v_0 — начальная линейная скорость проволоки.

Удельный заряд e/m свободных носителей тока в металлах:

$$\frac{e}{m} = \frac{lv_0}{Rq}.$$

Все величины, входящие в правую часть этого соотношения, можно измерить. На основании результатов опытов Толмена и Стюарта было установлено, что носители свободного заряда в металлах имеют отрицательный знак, а отношение заряда носителя к его массе близко к удельному заряду электрона, полученному из других опытов. Так было установлено, что носителями свободных зарядов в металлах являются электроны.

Хорошая электропроводность металлов объясняется высокой концентрацией свободных электронов, равной по порядку величины числу атомов в единице объема.

Предположение о том, что за электрический ток в металлах ответственны электроны, возникло значительно раньше опытов Толмена и Стюарта. Еще в 1900 году немецкий ученый П. Друде на основе гипотезы о существовании свободных электронов в метал-

лах создал электронную теорию проводимости металлов. Эта теория получила развитие в работах голландского физика Х. Лоренца и носит название *классической электронной теории*. Согласно этой теории электроны в металлах ведут себя как электронный газ, во многом похожий на идеальный газ. Электронный газ заполняет пространство между ионами, образующими кристаллическую решетку металла (рисунок 20).

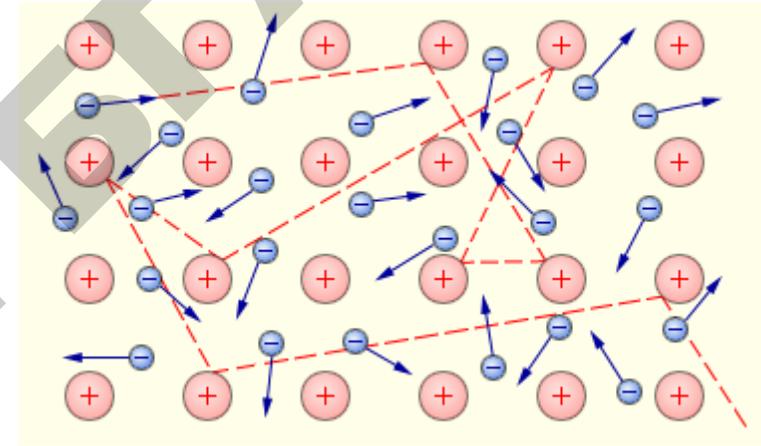


Рисунок 20

Из-за взаимодействия с ионами электроны могут покинуть металл, лишь преодолев так называемый *потенциальный барьер*. Высота этого барьера называется *работой выхода*. При обычных (комнатных) температурах у электронов не хватает энергии для преодоления потенциального барьера.

Как ионы, образующие решетку, так и электроны участвуют в тепловом движении. Ионы совершают тепловые колебания вблизи положений равновесия — узлов кристаллической решетки. Свободные электроны движутся хаотично и при своем движении сталкиваются с ионами решетки. На рисунке 20 показана траектория одного из электронов. В результате таких столкновений устанавливается термодинамическое равновесие между электронным газом и

решеткой. Согласно теории Друде–Лоренца электроны обладают такой же средней энергией теплового движения, как и молекулы одноатомного идеального газа. Это позволяет оценить среднюю скорость v теплового движения электронов по формулам молекулярно-кинетической теории. При комнатной температуре она оказывается примерно равной 10^5 м/с. Как установлено в последствии рассматривать электроны как классические частицы возможно только для так называемых полупроводников, у которых концентрация электронного газа сравнительно мала. В металлах, у которых концентрация атомов и соответственно электронов составляет 10^{28} – 10^{29} м⁻³ их свойства описываются так называемой квантовой статистикой Ферми–Дирака, согласно которой скорость движения и энергия частиц определяются не температурой кристаллической решетки, а самим числом этих частиц. В объеме металла электроны находятся на энергетических уровнях, которые распределяются от самого низкого до максимального значения. Максимальное значение энергии электронов называется энергией Ферми, которому отвечает скорость Ферми. При любой температуре металла уровни энергии вплоть до уровня Ферми заняты и электроны отвечающие энергии Ферми обладают скоростью порядка одной десятой скорости света 10^7 м/с. Электроны находящиеся вблизи уровня Ферми и определяют свойства металлов по переносу заряда и тепла. Рассеиваются электроны Ферми на тепловых колебаниях ионов кристаллической решетки, а также на дефектах кристаллической структуры — примесных атомах, вакансиях, включениях в металл других материалов.

Хаотическое беспорядочное движение электронов со скоростью Ферми не приводит к направленному переносу заряда — протеканию электрического тока. При наложении внешнего электрического поля в металлическом проводнике кроме хаотического фермиевского движения возникает их упорядоченное движение (дрейф), то есть электрический ток. Средняя скорость упорядоченного дрейфа u прямо пропорциональна произведению заряда электрона e , напряженности электрического поля E , времени свободного пробега между столкновениями τ и обратно пропорциональна массе электрона m , т. е. $u = \frac{teE}{m}$.

Среднюю скорость u дрейфа можно оценить следующим образом. За интервал времени Δt через поперечное сечение S проводника пройдут все электроны, находившиеся в объеме $Su\Delta t$. Число таких электронов равно $nSu\Delta t$, где n — средняя концентрация свободных электронов, примерно равная числу атомов в единице объема металлического проводника. Через сечение проводника за время Δt пройдет заряд $\Delta q = enSu\Delta t$. Следовательно, $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = enSu$,

$$\text{или } u = \frac{I}{enS}.$$

Концентрация n атомов в металлах находится в пределах 10^{28} – 10^{29} м⁻³.



Рисунок 21 — Зависимость удельного сопротивления ρ от абсолютной температуры T при низких температурах

Оценка по этой формуле для металлического проводника сечением 1 мм^2 , по которому течет ток 10 А , дает для средней скорости u упорядоченного движения электронов значение в пределах $0,6$ – 6 мм/с . Таким образом, средняя скорость u упорядоченного движения электронов в металлических проводниках на много порядков меньше их скорости Ферми.

Малая скорость дрейфа не противоречит опытному факту, что ток во всей цепи постоянного тока устанавливается практически мгновенно. Замыкание цепи вызывает распространение электриче-

ского поля со скоростью $c = 3 \times 10^8$ м/с. Через время порядка l/c (l — длина цепи) вдоль цепи устанавливается стационарное распределение электрического поля и в ней начинается упорядоченное движение электронов.

Сопротивление металлов обратно пропорционально времени свободного пробега электронов проводимости, которое зависит от интенсивности тепловых колебаний атомов (температуры) и от степени дефектности (количества примесей). При низких температурах сопротивление снижается и определяется чистотой металла (область остаточного сопротивления), при высоких температурах основной вклад в рассеяние дают тепловые колебания атомов и $\rho \approx T$.

Однако наиболее ярким примером расхождения теории и опытов является *сверхпроводимость*. Согласно классической электронной теории удельное сопротивление металлов должно монотонно уменьшаться при охлаждении, оставаясь конечным при всех температурах. Такая зависимость действительно наблюдается на опыте при сравнительно высоких температурах (рисунок 21). При более низких температурах порядка нескольких кельвинов удельное сопротивление многих металлов перестает зависеть от температуры и достигает некоторого предельного значения. Однако наибольший интерес представляет удивительное явление *сверхпроводимости*, открытое датским физиком Х. Каммерлинг-Оннесом в 1911 году. При некоторой определенной температуре $T_{кр}$, различной для разных веществ, удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля (см. рисунок). Критическая температура у ртути равна 4,1 К, у алюминия 1,2 К, у олова 3,7 К. Сверхпроводимость наблюдается не только у элементов, но и у многих химических соединений и сплавов. Например, соединение ниобия с оловом (Ni_3Sn) имеет критическую температуру 18 К. Некоторые вещества, переходящие при низких температурах в сверхпроводящее состояние, не являются проводниками при обычных температурах. В то же время такие «хорошие» проводники, как медь и серебро, не становятся сверхпроводниками при низких температурах.

Вещества в сверхпроводящем состоянии обладают исключительными свойствами. Практически наиболее важным для них является способность длительное время (многие годы) поддерживать без затухания электрический ток, возбужденный в сверхпроводящей цепи.

Научный интерес к сверхпроводимости возрастал по мере открытия новых материалов с более высокими критическими температурами. Значительный шаг в этом направлении произошел в 1986 году, когда было обнаружено, что у одного сложного керамического соединения $T_{кр} = 35$ К. Уже в следующем 1987 году физики сумели создать новую керамику с критической температурой 98 К, превышающей температуру кипения жидкого азота при нормальных условиях (77 К). Явление перехода веществ в сверхпроводящее состояние при температурах, превышающих температуру кипения жидкого азота, было названо *высокотемпературной сверхпроводимостью*. В 1988 году было создано керамическое соединение на основе элементов $Tl-Ca-Ba-Cu-O$ с критической температурой 125 К.

В настоящее время ведутся интенсивные работы по поиску новых веществ с еще более высокими значениями $T_{кр}$.

Объяснение механизма зависимости удельного сопротивления от температуры (в т. ч. и явления сверхпроводимости) было дано только на основе квантово-механических представлений.

Электрический ток в электролитах

Электролитами принято называть проводящие среды, в которых протекание электрического тока сопровождается переносом вещества. Носителями свободных зарядов в электролитах являются положительно и отрицательно заряженные ионы. К электролитам относятся многие соединения металлов с металлоидами в расплавленном состоянии, а также некоторые твердые вещества. Однако основными представителями электролитов, широко используемыми в технике, являются водные растворы неорганических кислот, солей и оснований.

Прохождение электрического тока через электролит сопровождается выделением веществ на электродах. Это явление получило название *электролиза*.

Электрический ток в электролитах представляет собой перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях. Положительные ионы движутся к отрицательному электроду (*катоде*), отрицательные ионы — к положительному электроду (*аноду*).

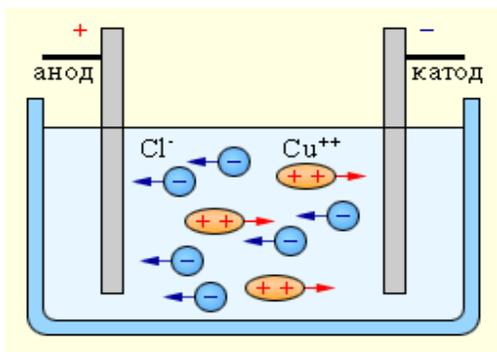


Рисунок 22 — Электролиз водного раствора хлорида меди

Ионы обоих знаков появляются в водных растворах солей, кислот и щелочей в результате расщепления части нейтральных молекул. Это явление называется *электролитической диссоциацией*. Например, хлорид меди CuCl_2 диссоциирует в водном растворе на ионы меди и хлора: $\text{CuCl}_2 \rightleftharpoons \text{Cu}^{++} + 2\text{Cl}^-$.

При подключении электродов к источнику тока ионы под действием электрического поля начинают упорядоченное движение: положительные ионы меди движутся к катоду, а отрицательно заряженные ионы хлора — к аноду (см. рисунок 22).

Достигнув катода, ионы меди нейтрализуются избыточными электронами катода и превращаются в нейтральные атомы, оседающие на катоде. Ионы хлора, достигнув анода, отдают по одному электрону. После этого нейтральные атомы хлора соединяются парно и образуют молекулы хлора Cl_2 . Хлор выделяется на аноде в виде пузырьков.

Наряду с диссоциацией молекул происходит и обратный процесс — воссоединение ионов при их столкновениях (рекомбинация). При каждой температуре устанавливается определенное равновесное состояние, при котором число ионов в единице объема приблизительно постоянно. Отношение концентрации распавшихся на ионы молекул (n) к концентрации молекул растворенного веще-

ства (n_0) $\alpha = \frac{n}{n_0}$ называется *коэффициентом диссоциации*; он пока-

зывает, какая доля молекул растворенного вещества распалась. Коэффициент диссоциации зависит от концентрации раствора, от рода растворителя и от температуры. С повышением температуры α увеличивается. Молекулы растворителя обволакивают ион, образуя вокруг него сольватную оболочку. Это, во-первых, затрудняет рекомбинацию ионов, во-вторых, затрудняет движение ионов — фактически в растворе движется сольват — шарик, состоящий из иона и сольватной оболочки вокруг него.

При наличии внешнего электрического поля плотность тока в электролите определяется выражением: $j = q^+ n^+ u^+ + q^- n^- u^-$, где q^+, q^- — величина зарядов положительных и отрицательных ионов, n^+, n^- — их концентрация, u^+, u^- — их скорости направленного движения. Из закона сохранения электрического заряда следует $q^+ n^+ = q^- n^- = qn$, и плотность тока $j = qn(u^+ + u^-)$.

Скорость упорядоченного движения сольвата можно найти из следующих соображений. В электрическом поле на сольват вдоль направления движения действуют электрическая сила $F_e = qE$ и сила внутреннего трения жидкости $F_c = 6\pi\eta r u$, где r — радиус сольвата, η — коэффициент вязкости жидкости. При установившемся движении $F_e = F_c$, откуда $u = \frac{q}{6\pi\eta r} E = bE$, где $b = \frac{u}{E} = \frac{q}{6\pi\eta r}$ —

подвижность иона.

Выражение для плотности тока принимает вид $j = qn(b^+ + b^-)E$.

Отсюда следует, что для электролитов также выполняется закон Ома $j = \sigma E$, где удельная электропроводность $\sigma = qn(b^+ + b^-) = \alpha q n_0 (b^+ + b^-)$. Удельное сопротивление электролита $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\alpha q n_0 (b^+ + b^-)}$. С повышением температуры сопротив-

ление электролита довольно быстро убывает, поскольку возрастает степень диссоциации и уменьшается вязкость электролита.

Лабораторная работа 2.5 «Определение температурного коэффициента сопротивления металлов»

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.2, §§ 29–30).

Цель работы — выработать навыки проведения эксперимента, анализа экспериментальных данных и расчета погрешностей измерений.

Задачи работы:

- 1) экспериментально изучить зависимость сопротивления заданного металла от температуры;
- 2) определить температурный коэффициент сопротивления металла.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Какими носителями электрического заряда создается ток в металлах?
2. Почему металлы обладают электросопротивлением?
3. В каких единицах измеряют электросопротивление в системе СИ?
4. Что называется удельной электропроводностью? В каких единицах измеряют электропроводность в системе СИ?
5. Запишите выражение для закона Ома в дифференциальной форме?

Методика и порядок измерений

Линейную зависимость сопротивления металлического проводника от температуры можно представить выражением $R = R_0(1 + \alpha t)$, где R_0 и R — сопротивление проводника при температурах соответственно $t_0 = 0^\circ\text{C}$ и t , α — температурный коэффициент сопротивления металла. *Температурный коэффициент сопротивления* численно равен приращению сопротивления каждой единицы сопротивления, взятой при температуре 0°C , при изменении температуры проводника на 1°C :

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 t}$$

Если при температуре t_1 сопротивление проводника $R_1 = R_0(1 + \alpha t_1)$, а при температуре t_2 его сопротивление $R_2 = R_0(1 + \alpha t_2)$, то $\frac{R_1}{R_2} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2}$ и $\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}$.

Таким образом, измерив сопротивление проводника при двух различных температурах, можно определить его температурный коэффициент сопротивления.

Измерения

Электрическая схема, общий вид лабораторной установки и порядок выполнения работы показаны в дополнении к работе, находящемся на рабочем месте. Учитывая дополнение, сделайте следующее.

1. Измерьте сопротивление металлического проводника при его нагревании от 20°C до 90°C через каждые 10°C . Результаты измерений занесите в таблицу.
2. Измерьте сопротивление того же проводника при его остывании от 90°C до 20°C через каждые 10°C . Результаты измерений занесите в таблицу.
3. Рассчитайте среднее значение сопротивления при каждой температуре.

Таблица

$t, ^\circ\text{C}$	20	30	40	50	60	70	80	90
R , Ом	нагревание							
	остывание							
$R_{\text{ср}}$, Ом								

4. По средним значениям сопротивления вычислите 3 значения температурного коэффициента сопротивления $\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}$. Температуры t_1 и t_2 выбирайте так, чтобы $t_2 - t_1 = 40^\circ\text{C}$.

Расчет температурного коэффициента сопротивления					
$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}$					
$t_1, ^\circ\text{C}$	$R_1, \text{Ом}$	$t_2 = t_1 + 40, ^\circ\text{C}$	$R_2, \text{Ом}$	α, K^{-1}	$\Delta\alpha, \text{K}^{-1}$
Среднее					

5. Определите среднее значение α , среднюю абсолютную и относительную погрешности.

6. По экспериментальным данным постройте график зависимости $R_{cp}(t)$.

7. Запишите ответ. Сформулируйте выводы по работе.

Вопросы и задания для контроля

I уровень

1. Какие действия электрического тока сопровождают прохождение тока через металлы?

2. Как движутся свободные электроны в проводнике при наличии в нем электрического поля?

3. Запишите выражение для величины плотности тока в металлах.

II уровень

4. Оцените среднюю скорость теплового движения электронов в металлах по формулам молекулярно-кинетической теории.

5. Оцените среднюю скорость упорядоченного движения электронов по проводам осветительной проводки.

6. Оцените время, необходимое электрону для прохождения пути от аккумулятора автомобиля до стартера (пусковой электродвигатель). Аккумулятор соединен со стартером медным проводом сечением $0,2 \text{ см}^2$ и длиной $0,85 \text{ м}$. Пусковой ток 300 А . Концентрация свободных электронов в меди $8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

7. Сформулируйте определение и запишите выражение для температурного коэффициента сопротивления металлов.

III уровень

8. Согласуются ли выводы классической теории электропроводности металлов с опытом?

9. Определите силу тока в воздухе между плоскими электродами площадью 100 см^2 каждый, если между ними разность потенциалов 100 В . Концентрация однозарядных ионов $n = 1 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Расстояние между электродами $d = 5 \text{ см}$. ($1,056 \times 10^{-2} \text{ мА}$)

Лабораторная работа 2.6

«Изучение температурной зависимости электрического сопротивления электролита»

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т.2, §§ 31–34).

Цель работы — выработать навыки проведения эксперимента, анализа экспериментальных данных и расчета погрешностей измерений.

Задачи работы:

- 1) ознакомиться с закономерностями прохождения электрического тока через электролиты;
- 2) экспериментально изучить зависимость сопротивления электролита от температуры;
- 3) определить температурный коэффициент сопротивления электролита.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Какие вещества называются электролитами?
2. Какими носителями электрического заряда создается электрический ток в растворах или расплавах электролитов?
3. Как происходит процесс электролитической диссоциации молекул?
4. Что называется коэффициентом диссоциации и от чего он зависит?
5. Какой процесс называется рекомбинацией?

Методика и порядок измерений

В небольших интервалах температур можно приближенно считать, что сопротивление электролита уменьшается линейно с ростом температуры. В этом приближении зависимость сопротивления R электролита от температуры $R_2 = R_1(1 + \alpha(t_2 - t_1))$, где R_1 и R_2 — сопротивления электролита при температурах t_1 и t_2 , $\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)}$ —

средний температурный коэффициент сопротивления, численно равный приращению сопротивления каждой единицы сопротивления при изменении температуры электролита на 1°C .

Таким образом, измерив сопротивление электролита при двух различных температурах, можно приближенно определить его температурный коэффициент сопротивления.

Измерения

Электрическая схема, общий вид лабораторной установки и порядок выполнения работы показаны в дополнении к работе, находящемся на рабочем месте. Учитывая дополнение, сделайте следующее.

1. Измерьте сопротивление электролита при его нагревании от 20°C до 90°C через каждые 10°C . Результаты измерений занесите в таблицу.
2. Измерьте сопротивление того же электролита при его остывании от 90°C до 20°C через каждые 10°C . Результаты измерений занесите в таблицу.
3. Рассчитайте среднее значение сопротивления при каждой температуре.
4. По средним значениям сопротивления вычислите 3 значения температурного коэффициента сопротивления $\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)}$ для различных температурных интервалов.

Таблица

$t, ^\circ\text{C}$		20	30	40	50	60	70	80	90
$R, \text{ Ом}$	нагревание								
	остывание								
$R_{\text{ср}}, \text{ Ом}$									

Расчет температурного коэффициента сопротивления $\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)}$				
$t_1, ^\circ\text{C}$	$R_1, \text{ Ом}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$R_2, \text{ Ом}$	$\alpha, \text{ K}^{-1}$

5. По экспериментальным данным постройте график зависимости $R_{cp}(t)$.

6. Запишите ответ. Сформулируйте выводы по работе.

Вопросы и задания для контроля

I уровень

1. Сформулируйте определение и запишите выражение для температурного коэффициента сопротивления электролита.

2. Какую размерность имеет температурный коэффициент сопротивления?

3. Что называется подвижностью иона? В каких единицах она измеряется?

4. Одинаковая ли подвижность положительных и отрицательных ионов в электролитах? Ответ поясните.

5. Чему равна удельная электропроводность электролита?

II уровень

6. Как зависит сопротивление электролита от температуры? Какими причинами обусловлена эта зависимость?

7. Может ли в электролите наблюдаться явление сверхпроводимости?

8. Выполняется ли для электролита закон Ома?

III уровень

9. Получите аналитическое выражение закона Ома в дифференциальной форме для электрического тока в электролитах.

10. Воздух между плоскими электродами ионизационной камеры ионизируется рентгеновским излучением. Сила тока, текущего через камеру, равна 1,5 мкА. Площадь каждого электрода равна 300 см^2 , расстояние между ними 2 см, разность потенциалов 100 В. Найти концентрацию пар ионов между пластинами, если ток далек от насыщения. Подвижность положительных ионов $1,4 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ и отрицательных $1,9 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Заряды ионов равны элементарному заряду.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев, И.В. Курс физики : учебник. В 3-х т. Т. 2 : Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика / И.В. Савельев. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. — 464 с.

2. Детлаф, А.А. Курс физики : учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.— 2-е изд., испр. и доп. — М.: Высш. шк., 1999. — 492 с.

3. Трофимова, Т.И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова.— 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1990. — 478 с.

Дополнительная

4. Иродов, И.Е. Электромагнетизм. Основные законы / И.Е. Иродов. — 3-е изд., испр. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. — 335 с.

5. Наркевич, И.И. Физика для вузов. Электричество и магнетизм. Оптика. Строение вещества : учеб. пособие / И.И. Наркевич, Э.И. Волмянский, С.И. Лобко. — Мн.: Выш. шк., 1994. — 554 с.

6. Близнюк, И.Б. Лабораторный практикум по курсу общей физики : учеб.-метод. пособие / И.Б. Близнюк [и др.]. — Мн.: БГАТУ, 2004. — 124 с.

III. Справочные сведения

Физические константы

Название	Символ	Значение	Размерность
Гравитационная постоянная	γ или G	$6,67 \times 10^{-11}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	g_0	9,8	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	c	3×10^8	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02 \times 10^{23}$	моль ⁻¹
Универсальная газовая постоянная	R	8,31	Дж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \times 10^{-23}$	Дж·К ⁻¹
Элементарный заряд	e	$1,6 \times 10^{-19}$	Кл
Масса электрона	m_e	$9,11 \times 10^{-31}$	кг
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85 \times 10^{-12}$	Ф·м ⁻¹
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	Гн·м ⁻¹
Постоянная Планка	h	$6,62 \times 10^{-34}$	Дж·с

Приставки и множители

для образования десятичных кратных и дольных единиц

Приставка	Символ	Множитель	Приставка	Символ	Множитель
дека	да	10^1	деци	д	10^{-1}
гекто	г	10^2	санتي	с	10^{-2}
кило	к	10^3	милли	м	10^{-3}
мега	М	10^6	микро	мк	10^{-6}
гига	Г	10^9	нано	н	10^{-9}
тера	Т	10^{12}	пико	п	10^{-12}

Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления металлических проволок

Вещество	Алюминий	Железо (0,1%С)	Латунь	Медь	Нихром (67,5% Ni, 1,5% Mn, 16% Fe, 15% Cr)	Серебро
$\rho, 10^{-8}$ Ом·м	3,21	12,0	6—9	1,78	100 — 110	1,66
$\alpha, 10^{-3}$ К ⁻¹	3,8	6,2	1,0	4,3	0,2	3,6

Удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков

Вещество	Бумага сухая	Гетинакс	Плексиглас (оргстекло)	Полистирол	Стекло	Эбонит
$\rho,$ Ом·см	10^{13} – 10^{14}	10^{10} – 10^{11}	10^{13}	10^{17} – 10^{19}	10^8 – 10^{17}	10^{15} – 10^{16}
ϵ	2–2,5	5–6	3,5	2,4–2,6	4–16	2,5–3

Удельная проводимость электролитов (Ом⁻¹·см⁻¹, при 18°C)

Процентное содержание безводного электролита	Хлористый калий KCl	Хлористый натрий NaCl	Едкий натр NaOH	Серная кислота H ₂ SO ₄
5	0,0690	0,0672	0,1969	0,2085
10	0,1359	0,1211	0,3124	0,3915
15	0,2020	0,1642	0,3460	0,5435
20	0,2677	0,1957	0,3270	0,6527

Точки Кюри некоторых веществ, °С

Железо	Железо кремнистое (4,3% Si)	Кобальт	Никель	Пермаллой (22% Fe, 78% Ni)	Гадолиний	Магнетит Fe ₃ O ₄	Сплав Гейслера (61% Cu, 26% Mn, 13% Al)
+770	+690	+1130	+358	+550	+16	+572	+330

Свойства ферромагнитных материалов

Материалы	Относит. начальная проницае- мость	Относит. максималь- ная прони- цаемость	Коэрцитивная сила, А/м	Индукция насыщения, Тл
Железо чистое	10 000	200 000	4	2,15
Железо техниче- ское	150	5000	80	2,15
Пермаллой	8000	100 000	4	1,08
Феррит	1000	2000	8	0,25

Учебное издание

ФИЗИКА

Электричество

Лабораторный практикум

Составители:

Соболь Валерий Романович
Болодон Владимир Найданович
Дымонт Василий Петрович и др.

Ответственный за выпуск *В.Р. Соболь*
Технический редактор *М.А. Макрецкая*
Корректор *М.А. Макрецкая*
Компьютерная верстка *М.А. Макрецкая*

Подписано в печать 14.09.2009 г. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 3,09. Тираж 106 экз. Заказ 811.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет».
ЛИ № 02330/0131734 от 10.02.2006.
ЛП № 02330/0131656 от 02.02.2006.
Пр. Независимости, 99-2, 220023, Минск

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра физики

ФИЗИКА

Электричество

**Минск
БГАТУ
2009**

РЕПОЗИТОЙ БГАТУ