



Учреждение образования
«Международный государственный
экологический институт
имени А. Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета

В. Ф. Малишевский, А. А. Луцевич,
Е. Ю. Сомонова

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ





Учреждение образования
«Международный государственный экологический
институт имени А. Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета

В. Ф. Малишевский, А. А. Луцевич, Е. Ю. Сомонова

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Лабораторный практикум

Минск
«ИВЦ Минфина»
2017

УДК 537 (075.8)
ББК 22.33
М 19

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры физики БГАТУ,
профессор *В. М. Добрянский*;
кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой
экологических информационных систем
МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ *В. А. Иванюкович*

Малишевский, В. Ф.

М 19 Электричество и магнетизм: лабораторный практикум / В. Ф. Малишевский,
А. А. Луцевич, Е. Ю. Сомонова. – Минск : ИВЦ Минфина, 2017. – 131 с.

ISBN 978-985-7168-31-6.

В пособии дано описание занятий и лабораторных по электричеству и магнетизму, тематика, структура и содержание которых соответствует программе курса общей физики. В описание каждой лабораторной работы входит теоретический материал, необходимый для осознанного выполнения задания, а также методика измерений. Предлагаются вопросы и задания для допуска и самоконтроля качества знаний, относящихся к теме работы.

Предназначается студентам инженерных специальностей для освоения методов учебно-исследовательской работы в области естественно-научного эксперимента, а также всем интересующимся вопросами общей физики.

УДК 537 (075.8)
ББК 22.33

ISBN 978-985-7168-31-6

© Малишевский В. Ф., Луцевич А. А.,
Сомонова Е. Ю., 2017
© МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Введение	5
1. Основные требования техники безопасности при выполнении лабораторных работ по электромагнетизму	7
2. Основы электрических измерений.....	9
3.Обработка результатов лабораторных измерений.....	17
4. Представление экспериментальных данных	23
5. Правила выполнения лабораторных работ.....	31
Лабораторная работа 1. Исследование электростатического поля	35
Лабораторная работа 2. Измерение сопротивлений мостовым методом.....	42
Лабораторная работа 3. Определение ЭДС источника постоянного тока методом компенсации	50
Лабораторная работа 4. Исследование энергетических соотношений в цепи постоянного тока.....	57
Лабораторная работа 5. Зависимость электропроводности металлов и полупроводников от температуры	61
Лабораторная работа 6. Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли	78
Лабораторная работа 7. Изучение основных параметров полупроводниковых диодов	88
Лабораторная работа 8. Изучение закона Ома для цепей переменного тока.	96
Лабораторная работа 9. Изучение вынужденных электрических колебаний и снятие семейства резонансных кривых	110
Лабораторная работа 10. Изучение свойств электромагнитных волн	115

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основная цель практикума по электричеству и магнетизму – дать возможность студентам самостоятельно воспроизвести наиболее интересные физические эксперименты, вникнуть, понять и усвоить основные положения и законы классической электродинамики. Качество выполнения лабораторных работ в значительной степени зависит от *знания студентами* условных обозначений элементов электрических цепей; назначения, области применения, условных обозначений и правил пользования электроизмерительными приборами; навыков сборки электрических цепей по их схемам; включения электроизмерительных приборов в электрическую цепь; определения значения измеряемых величин и их погрешности; учета влияния прибора на числовое значение измеряемой величины.

Следует отметить, что методические указания к лабораторной работе являются ориентировочной основой действий студента по подготовке к ее выполнению. Чтобы получить наибольший эффект от лабораторных занятий, необходимо изучить практический материал, приведенный в работе, а при необходимости прочитать соответствующие главы учебника и темы конспекта лекций, разобраться в схеме экспериментальной установки и принципе ее работы. Такая подготовка является необходимым условием для успешного выполнения лабораторных измерений, обработки экспериментальных результатов и их теоретической интерпретации.

Выполнение работ лабораторного практикума позволит студентам экспериментально проверить изучаемые физические законы и закономерности, будет способствовать осознанному усвоению и систематизации теоретического материала, овладению методикой и техникой классического и современного физического эксперимента, а также основными направлениями использования физических методов для решения прикладных задач в будущей профессиональной деятельности.

ВВЕДЕНИЕ

Окружающий нас мир состоит из взаимодействующих частиц. В разделе курса общей физики «Электричество и магнетизм» рассматриваются электромагнитные взаимодействия между телами и частицами, которые объясняют не только все электромагнитные явления, но и существование вещества как целого на атомном и молекулярном уровнях.

Согласно современным представлениям, в природе существует четыре типа силовых взаимодействий, которые часто называют фундаментальными. В порядке возрастания интенсивности эти взаимодействия располагаются следующим образом: гравитационное, электромагнитное, слабое и сильное (или ядерное).

1. Гравитационное взаимодействие осуществляется посредством гравитационного поля. Любая масса создает в пространстве гравитационное поле, действующее на другую массу с силой, значение которой определяется по закону всемирного тяготения. Квантами гравитационного поля являются гипотетические частицы — гравитоны. Это взаимодействие является самым слабым и играет значительную роль только в случае больших масс. Гравитационное взаимодействие универсально, оно существует между любыми материальными объектами, кроме того, гравитационная сила всегда является силой притяжения.

2. Электромагнитное взаимодействие осуществляется посредством электромагнитного поля, квантами которого являются фотоны. Это взаимодействие не универсальное, оно существует только между заряженными телами. Любой заряд создает в окружающем пространстве электромагнитное поле, действующее на другой заряд, который находится в этом поле, с определенной силой. В случае неподвижных зарядов значение этой силы определяется по закону Кулона. Если заряды движутся относительно выбранной системы отсчета, то сила электромагнитного взаимодействия является векторной суммой электрической и магнитной составляющих. Силы электромагнитного взаимодействия могут быть как силами притяжения, так и силами отталкивания.

3. Слабое взаимодействие ответственно за β -распад атомных ядер, процессы k -захвата, распады элементарных частиц, а также за процессы взаимодействия нейтрино с веществом. Квантами слабого взаимодействия являются векторные мезоны.

4. Сильное (ядерное) взаимодействие является самым интенсивным. Оно отвечает за процессы, которые происходят внутри атомных

ядер, и за процессы взаимодействия элементарных частиц (кроме процессов, которые подчиняются слабым взаимодействиям). Квантами сильного взаимодействия являются π -мезоны. В отличие от гравитационного и электромагнитного взаимодействий, сильное взаимодействие является короткодействующим ($r < 10^{-12}$ см).

В настоящее время практически создана единая теория сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий. В основе этой теории лежит гипотеза о существовании элементарных частиц, называемых кварками. Квантами поля в этой теории являются глюоны.

Весь исторический путь развития представлений о природе электричества и магнетизма условно разделяют на три этапа:

1. Период наблюдений, который начался на заре развития человеческой цивилизации.

2. Период накопления результатов экспериментальных фактов (XVII в. – начало XVIII в.). На этот период приходятся первые значительные успехи в изучении природы электричества. М. В. Ломоносов (1711–1765) и Г. В. Рихман (1711–1753) в России и Б. Франклин (1706–1790) в Америке доказали тождественность атмосферного электричества и электричества, получаемого при трении. В 1789 г. Л. Гальвани (1737–1798) открыл физиологическое действие тока. Чуть позже А. Вольта (1745–1827) открыл контактное электричество и создал первый генератор электрического тока, так называемый вольтов столб (Италия). К этому периоду относятся работы Ш. О. Кулона (1736–1806), А. М. Ампера (1775–1836) (Франция); Г. Ома (1787–1854) (Германия), Э. Х. Ленца (1804–1865) (Россия), Х. К. Эрстеда (Дания). Заканчивается период работами выдающегося английского физика М. Фарадея (1791–1867), который впервые ввел понятие физического поля и открыл явление электромагнитной индукции.

3. Период построения теоретических моделей. Этот промежуток времени связан, прежде всего, с работами Дж. К. Максвелла (1831–1879), который придал идеям Фарадея математическую завершенность, ввел точный термин «электромагнитное поле», которого у Фарадея не было, и сформулировал математические законы этого поля. К данному периоду относятся также работы Н. А. Умова (1846–1915), Дж. Пойнтинга (1852–1914), Г. Герца (1857–1894), П. Н. Лебедева (1866–1912).

Познание окружающего мира человеком предполагает не только наблюдение за физическими явлениями в естественных условиях, оно невозможно без экспериментального изучения этих явлений в строго контролируемых условиях. По этой причине в курсе общей физики лабораторному эксперименту придается особое значение.

Лабораторный практикум по электромагнетизму занимает важное место в системе вузовской подготовки специалистов и является неотъем-

лемой частью курса общей физики. К главным задачам изучаемой дисциплины можно отнести:

- освоение законов электромагнетизма в единстве эксперимента и физической теории;
- формирование практических умений и навыков работы на экспериментальных установках, усвоение основных правил техники безопасности при проведении экспериментальных исследований;
- изучение измерительной аппаратуры и принципа действия приборов;
- усвоение информации о методике и технике проведения измерений, точности получаемых результатов, источниках вероятных ошибок;
- освоение простейших методов статистической обработки экспериментальных данных, овладение культурой записи получаемой информации, представление результатов в виде таблиц и графиков;
- определение точности и степени достоверности полученных результатов.

1. Основные требования техники безопасности при выполнении лабораторных работ по электромагнетизму

К работе в лаборатории допускаются студенты, изучившие правила охраны труда в учебной лаборатории и прошедшие инструктаж по охране труда. Инструктаж и проверку знаний по охране труда проводит преподаватель, ведущий занятия. Проведение инструктажа подтверждается подписями лиц, проводивших и прошедших инструктаж, в журнале регистрации инструктажа по охране труда.

Студенты, не прошедшие инструктаж и проверку знаний по охране труда, к работе в лаборатории не допускаются.

Студентам разрешается находиться в лаборатории только в часы, отведенные расписанием, или в дополнительное время, выделенное для самостоятельной подготовки.

Все сотрудники лаборатории обязаны выполнять положения и правила техники безопасности и следить за их выполнением студентами.

Перед началом работы студент обязан:

- а) изучить устройство и принцип действия оборудования и приборов, необходимых для выполнения лабораторной работы и порядок проведения измерений на них;
- б) получить от преподавателя допуск к работе.

При выполнении работы с использованием электрических приборов следует помнить, что:

а) при сборке электрических цепей все соединения необходимо производить исключительно цельными, с неповрежденной изоляцией проводниками, зажимая их в клеммы (соединение путем скрутки проводников не допускаются);

б) розетки в лаборатории включены в сеть переменного тока с действующим значением напряжения $U = 220 \text{ В}$;

с) включать приборы или установки можно только с разрешения преподавателя или лаборанта;

д) следить за тем, чтобы измеряемые величины не превышали значений допустимых для используемых приборов;

е) в случае обнаружения чрезмерного нагревания отдельных участков цепи, а тем более появления запаха, немедленно отключить электрическую цепь от сети (источника питания) и сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

По окончании работы студент должен:

а) удостовериться в правильности полученных результатов, предъявив их преподавателю;

б) отключить все приборы от сети, обеспечив видимый разрыв цепей питания лабораторной установки;

с) привести в порядок свое рабочее место;

д) сдать лаборанту полученные принадлежности.

Во время занятий в лаборатории студентам **запрещается**:

а) приступать к работе без разрешения преподавателя или лаборанта;

б) включать приборы и установки в электрическую сеть (рубильники и переключатели приборов) и проводить измерения без предварительной проверки правильности сборки электрической цепи преподавателем или лаборантом;

с) изменять схемы и пределы измерения приборов в установках, находящихся под напряжением;

д) использовать приборы и принадлежности, не предназначенные для выполнения данной работы;

е) самостоятельно устранять неисправности приборов и оборудования (следует обратиться к преподавателю или лаборанту).

ф) оставлять без наблюдения приборы и оборудование, находящиеся под напряжением.

При несчастном случае необходимо немедленно поставить в известность преподавателя и постараться оказать первую помощь пострадавшему.

Лица, нарушившие правила техники безопасности, несут дисциплинарную, административную и уголовную ответственность в порядке, установленном Законодательством Республики Беларусь.

2. Основы электрических измерений

2.1. Классификация электроизмерительных приборов

В основе физической науки лежит эксперимент, который всегда являлся и является критерием справедливости любых теоретических положений. Задача любого измерения состоит не только в наиболее точном установлении значения определяемой величины, но и в обязательной оценке границ возможных погрешностей измерения.

При выполнении работ лабораторного практикума по разделу «Электричество и магнетизм» студенты сталкиваются с необходимостью практически изучить наиболее важные электроизмерительные приборы, овладеть основными методами измерения электрических величин и научиться обрабатывать результаты, полученные при измерениях.

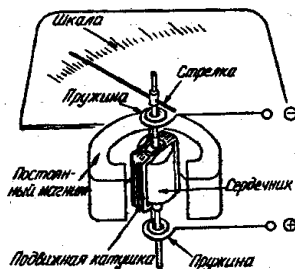
В данном разделе приведены необходимые сведения и рекомендации, позволяющие облегчить приобретение студентами умений и навыков, необходимых для успешного освоения программы лабораторного физического практикума.

Основные электрические приборы классифицируются по *роду измеряемой величины* амперметры (измерение силы тока), вольтметры (измерение напряжения), ваттметры (измерение мощности) и т. п.) и по *принципу действия*, то есть по зависимости от природы физических явлений, на которых основано измерение (*магнитоэлектрические* приборы, *электродинамические* приборы, *электромагнитные* приборы, *электростатические* приборы и др.).

Рассмотрим основные типы электроизмерительных приборов, используемых при выполнении лабораторных работ.

Магнитоэлектрические приборы

Принцип действия электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита стокм, проходящим по обмотке легкой подвижной катушки. Данные приборы применяются в качестве амперметров и вольтметров в цепях постоянного тока, а в сочетании с выпрямительными устройствами – в цепях



переменного тока. Приборы обладают высокой точностью, имеют равномерную шкалу, поскольку отклонение стрелки прибора линейно зависит от силы тока (напряжения) в катушке.

Основной частью всех *магнитоэлектрических* приборов является гальванометр, который представляет собой катушку проволоки, намотанной на каркас из железа (рис. 1). Катушка размещена между полюсами постоянного магнита и может вращаться вокруг неподвижной оси. Если по катушке проходит ток, то на нее со стороны магнитного поля постоянного магнита действует вращающий момент. В результате катушка и закрепленная на ней стрелка поворачиваются до тех пор, пока момент сил, действующих на нее со стороны магнитного поля, не будет скомпенсирован моментом упругих сил, возникающих в пружинах, закрепленных на оси прибора. Сила упругости прямо пропорциональна углу закручивания пружины, поэтому угол поворота, при котором наступает равенство моментов сил Ампера и сил упругости, пропорционален силе тока в рамке. Шкала магнитоэлектрического прибора равномерная.

Для того чтобы при любом положении стрелки подвижная часть прибора была уравновешена в поле силы тяжести, имеются противовесы. Установка стрелки на нулевое деление шкалы производится корректором. Сопротивление катушки гальванометра средней чувствительности $R_r \sim 5-10$ Ом, а максимальная сила тока $I_0 \sim 1-10$ мА. При этом напряжение на клеммах прибора $U_0 \sim 5-100$ мВ ($U_0 = I_0 R_r$).

Амперметр. Чтобы измерить силу тока, большую чем I_0 , параллельно катушке гальванометра подключают проводник (шунт) с небольшим сопротивлением $R_{ш}$ (рис. 2). В результате гальванометр становится амперметром. Амперметр включается в цепь последовательно с потребителем, поэтому сопротивление цепи увеличивается, что приводит к изменению силы тока. Чтобы амперметр не влиял на силу тока, его сопротивление R_0 должно быть во много раз меньше сопротивления потребителя R . Условие $R_0 \ll R$ называют *условием точного измерения силы тока* в цепи. Поскольку катушка гальванометра и шунт соединены параллельно, то $R_0 = \frac{R_{ш} R_r}{R_{ш} + R_r} < R_r$. Поэтому, если $R_{ш} \ll R$, то и $R_0 \ll R$,

то есть условие точного измерения тока выполняется. Таким образом, малое сопротивление шунта, во-первых, защищает гальванометр от больших

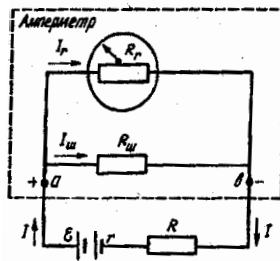


Рис. 2

токов, во-вторых, способствует выполнению условия точного измерения силы тока в цепи.

Если сила тока в цепи I в n раз больше чем I_0 , то есть $I = n I_0$, то сопротивление шунта можно рассчитать по формуле $R_{ш} = \frac{R_r}{n-1}$.

Вольтметр состоит из гальванометра, последовательно с катушкой которого соединено дополнительное сопротивление R_d , которое во много раз больше сопротивления катушки гальванометра R_r и сопротивления R того участка цепи, на котором измеряется напряжение (рис. 3). Это сопротивление не только защищает гальванометр от больших токов, но и вследствие того, что вольтметр включается при измерении напряжения параллельно с потребителем, способствует выполнению условия точного измерения напряжения (поскольку сила тока, проходящего через катушку, значительно меньше силы тока в цепи). Шкалу гальванометра в этом случае градуируют в единицах напряжения.

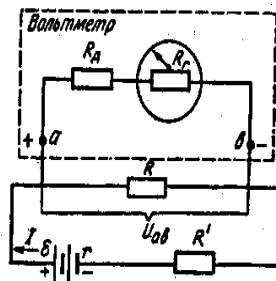


Рис. 3

Если напряжение U на участке цепи в n раз превышает U_0 , то есть $U = U_0 n$, то дополнительное сопротивление R_d можно рассчитать по формуле $R_d = R_r (n - 1)$.

Мощность, потребляемая прибором от измерительной цепи, должна быть мала, чтобы не вносить дополнительных погрешностей в измерения.

Поскольку амперметр включается в цепь последовательно с нагрузкой, а вольтметр параллельно нагрузке, то тепловую мощность тока, проходящего по катушке амперметра, удобно рассчитывать по формуле $P_A = I^2 R_A$, а по катушке вольтметра — $P_B = \frac{U^2}{R_B}$. Следовательно,

мощность, потребляемая измерительным прибором, будет наименьшей при условии, что внутреннее сопротивление амперметра будет как можно меньше (для идеального амперметра $R_A = 0$), а внутреннее сопротивление вольтметра — как можно больше (в идеальном случае — $R_B = \infty$).

Омметр состоит из гальванометра, соединенного с источником тока, и дополнительного сопротивления (рис. 4). Шкала прибора градуируется в единицах сопро-

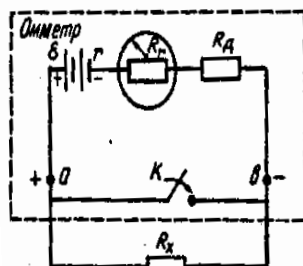


Рис. 4

тивления (от нуля до бесконечности). Дополнительное сопротивление R_d выбирается так, что если клеммы A и B омметра замкнуты накоротко (ключ K замкнут), то стрелка прибора отклоняется на всю шкалу. В этом случае сила тока максимальная, а «измеряемое» сопротивление равно нулю. При бесконечно большом сопротивлении (ключ K разомкнут) стрелка стоит на нуле, поскольку в этом случае ток через катушку гальванометра не проходит.

Если к клеммам прибора подключить неизвестное сопротивление R_x , то сила тока в цепи
$$I = \frac{\mathcal{E}}{(R_a + R_a + r) + R_x}, \quad \text{откуда} \quad R_x = \frac{\mathcal{E}}{I} - (R_a + R_a + r),$$
 где $\mathcal{E}$ и r – ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока соответственно. Обозначив через $R_0 = R_r + R_d + r$, получаем $R_x = \frac{\mathcal{E}}{I} - R_0$.

Принимая во внимание, что при $R_x = 0$ сила тока в цепи максимальная, то есть $I = I_{\max}$, получаем $\frac{\mathcal{E}}{I_{\max}} - R_0 = 0$, откуда $\mathcal{E} = IR_0$. Таким образом,

$$R_x = R_0 \left(\frac{I_{\max}}{I} - 1 \right).$$

Полученная формула дает возможность проградуировать шкалу гальванометра в омах.

Так как ЭДС источника тока не постоянна, то омметром нельзя точно определить R_x .

Для более точного измерения сопротивлений используют так называемые мостовые схемы. Самой распространенной из них является схема мостика Уинстона.

Приборы магнитоэлектрической системы применяются для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока.

В электроизмерительных приборах других систем подвижная часть обычно устроена примерно так же, как и в приборах магнитоэлектрической системы.

Электродинамические приборы. В приборах электродинамической системы нет постоянного магнита. Поворот подвижной системы происходит в результате электродинамического взаимодействия электрических токов в двух катушках. Одна катушка закреплена неподвижно, а другая укреплена на оси подвижной системы. В электродинамическом амперметре и вольтметре катушки включаются последовательно, поэтому сила тока в них одинаковая. Поскольку сила Ампера пропорциональна произведению сил токов в катушках, то в данном случае вращающий момент пропорционален квадрату силы

тока в катушках. Поэтому шкала электродинамических амперметров и вольтметров неравномерная.

Электродинамические приборы могут использоваться для измерения мощности, то есть служить *ваттметрами*. Неподвижную (токовую) катушку ваттметра включают в цепь последовательно с потребителем, а подвижную (катушку напряжения) включают параллельно потребителю энергии **через дополнительный резистор**.

Вращающий момент, действующий на подвижную катушку, пропорционален произведению сил токов в обеих катушках. Но сила тока в одной катушке равна силе тока в цепи потребителя, а сила тока в другой пропорциональна напряжению на рабочем участке цепи (потребителе). Очевидно, что их произведение пропорционально мощности. У ваттметра четыре клеммы – две токовые и две для напряжения. Шкала у прибора равномерная.

Электродинамические приборы пригодны для измерений в цепях как постоянного, так и переменного тока. *Точность* этих приборов очень *высокая*.

Электромагнитные приборы. Действие приборов *электромагнитной* системы основано на взаимодействии магнитного поля тока, проходящего по обмотке неподвижной катушки, с подвижным стальным сердечником. Измеряемый ток пропускается по неподвижной катушке, а поворот подвижной системы вызывается втягиванием в эту катушку стального сердечника, связанного с подвижной системой.

Отклонение стрелки прибора пропорционально квадрату силы тока в катушке. Поэтому шкала таких приборов неравномерная. Электромагнитные вольтметры и амперметры применяются в качестве щитовых приборов переменного и постоянного тока. *Точность* этих приборов сравнительно *невысока*.

Электростатические приборы. В приборах *электростатической* системы вращение подвижной системы вызывается силами *электростатического взаимодействия* разноименно заряженных проводников. *Достоинство* этих приборов заключается в том, что они не потребляют тока, то есть не являются дополнительной к потребителю нагрузкой, в отличие от приборов других систем.

Приборы *электростатической* системы позволяют измерять только напряжение, но не силу тока, поэтому их используют преимущественно в качестве вольтметров для измерения высоких постоянных напряжений.

Условные обозначения, необходимые для эксплуатации прибора, позволяющие определить его тип и назначение, приводятся на шкале

и корпусе прибора. Условные обозначения маркировочных признаков на шкалах электроизмерительных приборов, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Система прибора	Обозначение	Измеряемая величина	Обозначение
Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой		Сила тока	A
Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом		Напряжение	V
Электромагнитный прибор		Электрическое сопротивление	Ω
Электродинамический прибор		Мощность	W
Электродинамический прибор, с магнитным экраном		Измерение постоянного тока	I
Индукционный прибор		Измерение переменного тока	I ₂
Магнитоиндукционный прибор		Измерение постоянного и переменного тока	I ₂
Электростатический прибор		Вертикальное положение шкалы	T
Термоэлектрический прибор с изолированным преобразователем и магнитоэлектрическим измерительным механизмом		Горизонтальное положение шкалы	L
Выпрямительный прибор с магнитоэлектрическим измерительным механизмом		Наклонное положение шкалы под определенным углом к горизонту, например 60°	
Защита от внешних магнитных полей		Направление ориентировки прибора в земном магнитном поле	

Защита от внешних электростатических полей		Класс точности при нормировании погрешности в процентах от диапазона измерения	2
--	--	--	---

2.2. Многопредельные электроизмерительные приборы. Снятие показаний с прибора. Цифровые приборы

У стрелочных измерительных приборов имеются шкалы, которые могут быть именованными, то есть проградуированы в единицах измеряемых величин, или условными. Условные шкалы применяют в многопредельных приборах. Чтобы узнать числовое значение измеряемой величины по прибору с условной шкалой, надо цену деления шкалы умножить на число делений, отсчитанных по этой шкале до того места, где остановилась стрелка. Напомним, что для нахождения цены деления нужно найти разность между значениями ближайших «оцифрованных» делений шкалы и разделить на число делений между ними.

Шкалы приборов бывают нулевые и безнулевые. Нулевые шкалы могут быть односторонними (нуль размещен в начале шкалы), или двухсторонними (нуль размещен между начальной и конечной отметками шкалы). В зависимости от положения нуля между конечными отметками двухсторонние шкалы бывают симметричными и несимметричными.

На безнулевых шкалах конечные отметки соответствуют нижнему и верхнему пределам измерения.

По характеру зависимости линейных или угловых расстояний между соседними отметками шкалы от измеряемой величины различают равномерные, неравномерные, степенные, логарифмические и другие шкалы. Для точности измерений предпочтительнее равномерная шкала. Шкала считается равномерной, если отношение наибольшего деления к наименьшему не превышает 1,3 при постоянной цене деления. Рядом со шкалой на лицевой стороне электроизмерительного прибора указывают необходимые маркировочные признаки: единица измеряемой величины; класс точности; номер ГОСТа, в соответствии с которым прибор изготовлен; род тока и число фаз; система прибора; категория защищенности прибора от влияния внешних магнитных или электрических полей; группа прибора по условиям эксплуатации; рабочее положение прибора; испытательное напряжение прочности электрической изоляции токоведущих частей прибора; положение прибора относительно земного магнитного поля (если это влияет на его показания); номинальная частота

тока (если она отличается от 50 Гц); год выпуска; тип (шифр); заводской номер и некоторые другие данные (табл. 1).

Существуют электроизмерительные приборы, в электрической схеме которых предусмотрено несколько шунтов и (или) дополнительных сопротивлений, поочередное подключение которых к катушке гальванометра позволяет менять пределы (диапазоны) измерения. Переход с одного предела измерений на другой осуществляется специальным переключателем, при изменении положения которого к катушке гальванометра подключается другой шунт (амперметр) или другое добавочное сопротивление (вольтметр). Наличие таких многопредельных приборов обусловлено тем, что на практике часто возникает необходимость измерять с достаточной степенью точности электрические величины, изменяющиеся в очень широких пределах.

Тот или иной предел измерения, следует выбирать так, чтобы стрелка прибора при измерении находилась в «*зоне измерения*», то есть отклонялась от нулевого положения более чем на $2/3$ шкалы, переключая указатель пределов в соответствующее положение.

Широкое применение получили многопредельные приборы, называемые *мультиметрами* (многоцелевыми или универсальными). Такие приборы позволяют измерять силу тока и напряжение (*ампервольтметры*); силу тока, напряжение и сопротивление (*авометры*) и т. д. Мультиметры, наряду с переключателем пределов измерения, снабжены переключателем рода работы.

Пределы измерений задаются на панели прибора:

- а) цифрой, обозначенной рядом с клеммой, если на корпусе прибора имеется несколько клемм для подключения прибора в цепь;
- б) цифрой, обозначенной на переключателе, если на корпусе прибора имеются только две клеммы подключения и переключатель пределов измерений.

Перед включением многопредельного прибора в электрическую цепь необходимо:

- установить переключатель рода работы в нужное положение (измерение силы тока $[I]$, измерение напряжения $[U]$, измерение сопротивления $[R]$);
- переключатель пределов измерения поставить в положение, соответствующее максимальному значению измеряемой величины.

После включения источника электрической энергии, нужно добиться отклонения стрелки в «зону измерения», последовательно переключая предел *измерения от его большего значения к меньшему*.

Снятие показаний по шкале прибора (нахождение числового значения измеряемой величины) осуществляют, как правило, тогда, когда

стрелка находится в зоне измерения. Вначале вычисляют цену деления шкалы C , которая для приборов с равномерной шкалой определяется из соотношения: $C = \frac{X_0}{N}$, где X_0 – максимальное значение предела измерения;

N – полное число делений на шкале прибора.

Значение измеряемой величины $X = Cn$, где n – порядковый номер деления, на которое указывает стрелка прибора при измерении.

В настоящее время в лабораторной практике широко используются цифровые многопредельные универсальные измерительные приборы, имеющие ряд преимуществ по сравнению со стрелочными приборами: быстродействие, высокая точность, непосредственный вывод на табло числового значения измеряемой величины. В современных цифровых приборах выбор предела измерения осуществляется автоматически, экспериментатор устанавливает лишь переключатель рода работы прибора. Все это значительно упрощает процесс измерений. Главным достоинством цифровых приборов является возможность их подключения к персональным компьютерам и системам автоматического управления экспериментом.

3. Обработка результатов лабораторных измерений

3.1. Задачи измерений

Экспериментальное изучение закономерностей физических явлений в большинстве случаев связано с измерениями.

Вследствие несовершенства измерительных приборов, методов измерения, неполноты наших знаний, трудности учета всех побочных явлений при измерениях неизбежны погрешности. Поэтому в результате измерений любой величины мы никогда не получаем ее истинного значения и можем указать лишь интервал возможных значений, в котором находится истинное значение измеряемой величины.

Таким образом, задача измерения состоит в установлении интервала, внутри которого находится истинное значение измеряемой величины. Следовательно, задача измерения заключается в получении числового значения физической величины с указанием возможной погрешности (ошибки) результата измерения. Без информации о точности измерения его результат бесполезен.

3.2. Виды измерений. Типы погрешностей измерений

Различают два вида измерений: прямые и косвенные. При прямых измерениях значение искомой величины определяется непосредственно по показаниям измерительного прибора, например, значение промежутка времени определяется путем отсчета по шкале секундомера, значение силы тока – по отклонению стрелки амперметра и т. д.

При косвенных измерениях искомая величина находится в результате математических действий над результатами прямых измерений.

Например, вычисление сопротивления проводника методом амперметра и вольтметра осуществляется путем деления напряжения на силу тока в проводнике, значения которых измеряются непосредственно.

По характеру происхождения погрешности (ошибки) измерения можно разделить на три типа:

1. Промахи или грубые ошибки. Это – ошибки, возникающие в результате небрежности отсчета по шкале прибора, неверной записи показаний и т. п. Такие ошибки следует устранять повторными измерениями.

2. Систематические ошибки. Это – ошибки, сохраняющиеся при повторных измерениях. Причины их различны:

а) погрешность прибора (например, стрелка не установлена на нулевое деление шкалы прибора при отсутствии тока);

б) отсутствие учета влияния внешних факторов (например, взвешивание тела в воздухе без учета воздействия на него выталкивающей силы).

Систематические ошибки учитывают, вводя соответствующие поправки.

3. Случайные ошибки. Это – ошибки, которые проявляются в разбросе результатов при повторных измерениях. Случайные ошибки обусловлены большим числом случайных причин, которые действуют в каждом отдельном измерении различным неизвестным образом. Например, на результате взвешивания могут отразиться колебания воздуха, пылинки, сажающиеся на призмы микровесов и летающие с них и др.

Случайные ошибки заметно обнаруживаются лишь при достаточно высокой чувствительности приборов.

Исключить случайные ошибки в отдельных измерениях невозможно, но оценить их числовое значение можно методами математической статистики, поскольку они подчиняются статистическим закономерностям.

3.3. Погрешности электроизмерительных приборов

Одной из важнейших характеристик электроизмерительного прибора является класс точности. Отношение максимально возможного значения

абсолютной погрешности к максимальному для данного предела измерения значению измеряемой величины $A_{\max}$, выраженное в процентах, называется приведенной погрешностью прибора $\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_{\max}}$.

Приведенная погрешность, выраженная в процентах, численно равна классу точности прибора k , то есть $\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_{\max}} \cdot 100\% = k$

По приведенной погрешности электроизмерительные приборы делятся на восемь классов точности: **0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0**. Если класс точности электроизмерительного прибора, соответствующий заданному пределу измерений, известен, то для данного предела измерений $\Delta A = \frac{k A_{\max}}{100}$.

При отклонении стрелки на всю шкалу, граница относительной погрешности прибора равна приведенной погрешности. Следовательно, класс точности задает значение наименьшей относительной погрешности (в процентах), которая может иметь место при измерениях посредством данного прибора.

Для приборов с равномерной шкалой абсолютная погрешность при любом отклонении стрелки одинакова. Поэтому при меньших значениях измеряемой величины относительная погрешность измерения превышает приведенную погрешность прибора.

Например, если при измерении напряжения вольтметром с классом точности $k=0,5$, шкала которого имеет делений $N=150$, на нем установлен предел измерения $U_0 = 7,5$ В, то цена деления прибора $C = \frac{U_0}{N} = \frac{7,5\text{В}}{150} = 0,05 \frac{\text{В}}{\text{дел}}$.

Если стрелка прибора при измерении напряжения отклонилась на $n_1=30$ делений, то прибор показывает напряжение $U_1 = C n_1 = 1,5\text{В}$. Абсолютная и относительная погрешности измерений в этом случае составляют $\Delta U = \frac{k U_0}{100} = \frac{0,5 \cdot 7,5}{100} = 0,0375$ В и $\varepsilon_1 = \frac{\Delta U}{U_1} \cdot 100\% = \frac{0,0375 \text{ В}}{1,5 \text{ В}} \cdot 100\% = 2,5\%$.

Пусть во втором случае стрелка этого же прибора отклонилась на $n_2=100$ делений, а остальные параметры остались без изменений. Тогда измеряемое напряжение $U_2 = C n_2 = 5,0$ В. Так как абсолютная погрешность в нашем случае постоянна, то $\Delta U_1 = \Delta U_2 = 0,0375$ В, а относительная погрешность $\varepsilon_2 = \frac{\Delta U}{U_2} \cdot 100\% = \frac{0,0375 \text{ В}}{5,0 \text{ В}} \cdot 100\% = 0,75\%$.

Таким образом, точность второго измерения напряжения данным прибором гораздо больше. Поэтому при измерениях многопредельным прибором, переключатель пределов должен находиться в таком положении, чтобы при измерениях стрелка оказывалась бы как можно ближе к концу шкалы прибора (как минимум – в последней ее трети, то есть в зоне измерения).

Если по условиям эксперимента некоторая физическая величина A измеряется несколько раз, то абсолютная погрешность такого измерения ΔA складывается из трех составляющих: $\Delta A = \sqrt{\Delta A_{\text{пр}}^2 + \Delta A_{\text{от}}^2 + \Delta A_{\text{сл}}^2}$, где $\Delta A_{\text{пр}}$ – погрешность, электроизмерительного прибора; $\Delta A_{\text{от}}$ – погрешность снятия отсчета со шкалы прибора; $\Delta A_{\text{сл}}$ – случайная погрешность.

Первое слагаемое определяется классом точности прибора, и его значение вычисляется по формуле $\Delta A = \frac{kA_{\text{max}}}{100}$.

Поскольку при выполнении лабораторных работ требуется, чтобы доверительная вероятность составляла $\rho = 0,95$, то для вычисления $\Delta A_{\text{пр}}$ необходимо пользоваться следующим соотношением:

$$\Delta A_{\text{пр}} = \frac{2}{3} \cdot \Delta A = \frac{2}{3} \cdot \frac{kA_{\text{max}}}{100}.$$

Вторая составляющая погрешности связана с неизбежным округлением показаний при снятии отсчета по шкале электроизмерительных приборов. При $\rho = 0,95$ вторая часть погрешности может быть оценена по формуле: $\Delta A_{\text{от}} = \frac{C}{2}$, где C – цена деления равномерной шкалы прибора.

При выполнении лабораторных работ по электромагнетизму часто приходится ограничиваться однократными измерениями физических величин. В первую очередь это касается измерения параметров электрической цепи (сила тока, напряжение и др.)

Для определения абсолютной погрешности однократного измерения (ΔA_1), используют формулу, в которую входят только два первых слагаемых:

$$(\Delta A_{\text{пр}} \text{ и } \Delta A_{\text{от}}): \Delta A_1 = \sqrt{\left(\frac{2}{3} \cdot \frac{kA_{\text{max}}}{100}\right)^2 + \left(\frac{C}{2}\right)^2}.$$

При косвенных измерениях (с которыми мы, как правило, и будем иметь дело) оценку абсолютной погрешности следует проводить, используя схему вычислений, подробно рассмотренную на вводном занятии к лабораторному практикуму «Механика».

3.4. Правила приближенных вычислений

При обработке результатов измерений надо различать точные и приближенные числа и знать правила точных и приближенных вычислений.

Точные числа – это числовые коэффициенты; показатели степени в формулах; коэффициенты, отражающие кратность и долю единиц физических величин, и др. Например: в формуле $W = \frac{CU^2}{2}$ коэффици-

ент $\frac{1}{2}$ и показатель степени 2 – точные числа; в выражении $U = 4 \text{ кВ} = 4 \cdot 1000 \text{ В}$ – коэффициент 1000 – точное число.

Приближенными числами являются результаты измерения величин, табличные значения величин, округленные значения точных чисел, значения погрешностей.

Например: значение силы тока, измеренное амперметром, $I = 1,2 \text{ А}$; значение абсолютной погрешности измерения напряжения $\Delta U = 0,05 \text{ В}$; относительная погрешность $\varepsilon = 5,1\%$.

Значащие цифры – это все цифры числа, кроме нулей, стоящих в начале этого числа. Например, число значащих цифр в числах 9,8; 1005; 0,001 составляет 2, 4 и 1 соответственно.

В точных числах число значащих цифр может быть бесконечно большим. Например, число 5 можно записать и как 5,0; 5,00; 5,000 и т. д. Все цифры в этих записях значащие.

При записи числа в стандартной форме первую значащую цифру ставят в разряд единиц, а остальные – в десятичные разряды. Например, $0,005 = 5 \cdot 10^{-3}$, $2457 = 2,457 \cdot 10^3$.

Верные и сомнительные цифры. Результаты измерений и вычислений могут содержать разное количество значащих цифр, среди которых есть верные, сомнительные и неверные.

Цифра приближенного числа считается верной, если его абсолютная погрешность не превышает одной единицы того разряда, в котором стоит данная цифра.

Например, для измеренной длины $l = (37 \pm 2) \text{ мм}$ абсолютная погрешность $2 < 10$, значит, цифра 3, стоящая в разряде десятков, верная. Цифра 7 стоит в разряде единиц. Погрешность $2 > 1$, значит, цифра 7, стоящая за верной цифрой, является сомнительной. Цифры, стоящие после сомнительной – неверные. Например, в приближенном числе $(17,45 \pm 2)$ цифры 4, 5 – неверные. Неверные цифры следует отбросить и записать приближенное число в виде (17 ± 2) .

У точных чисел все значащие цифры верные, а погрешность точного числа всегда равна нулю.

Точные и приближенные числа можно округлять, то есть уменьшать количество значащих цифр.

При округлении чисел руководствуются следующим правилом: если первая отбрасываемая цифра равна или больше 5, то последняя сохраняемая цифра увеличивается на единицу, если меньше 5, то последняя сохраняемая цифра не изменяется.

Абсолютную погрешность округляют до одной значащей цифры. Например, если в результате измерений силы тока получено значение $I = (45 \pm 3,4) \text{ мА}$, то ответ следует записать в виде $I = (45 \pm 3) \text{ мА}$.

Погрешности табличных величин.

Часто в расчетные формулы входят величины, числовые значения которых берутся из таблиц (плотность вещества, элементарный заряд, удельное сопротивление, постоянная Фарадея и т. д.). Абсолютная погрешность табличных величин принимается равной половине единицы разряда последней значащей цифры. Например, если табличное значение

плотности меди $\rho = 8,93 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, то абсолютная погрешность данного табличного значения плотности меди $\Delta\rho = 0,005 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Таким образом, $\rho = (8,93 \pm 0,005) \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

3.5. Математические операции с приближенными числами

1. Сложение и вычитание.

При сложении и вычитании приближенных чисел в результате следует сохранять столько десятичных знаков, сколько их имеет число с наименьшим количеством десятичных знаков.

Например: $3,28 + 5,3 \approx 8,6$.

2. Умножение и деление.

При умножении и делении приближенных чисел в результате следует сохранить столько значащих цифр, сколько их имеется в том из исходных чисел, которое содержит наименьшее количество значащих цифр.

Например: $65 \cdot 0,0502 \approx 3,3$.

3. Возведение в степень и извлечение корня.

При возведении приближенного числа в степень, в результате следует сохранить столько значащих цифр, сколько верных значащих цифр имеет исходное число.

Например, $(0,13)^2 = 0,169 \approx 0,17$.

При извлечении корня из приближенного числа в результате сохраняется столько значащих цифр, сколько верных значащих цифр имеет подкоренное число.

Например, $\sqrt{2,0} = 1,4115 \approx 1,4$; $\sqrt{16} = 4,0$.

4. Вычисление тригонометрических функций.

При вычислении тригонометрической функции ($\sin \alpha$, $\cos \alpha$, $\operatorname{tg} \alpha$, $\operatorname{ctg} \alpha$), если значение угла α задано с точностью $\Delta \alpha = 1^\circ$, то в значении тригонометрической функции следует сохранить две значащие цифры.

Например: $\sin 30^\circ = 0,50$, $\cos 30^\circ = 0,87$, $\operatorname{tg} 30^\circ = 0,53$

При промежуточных вычислениях пользуются правилом «запасной цифры», то есть в промежуточном результате берется на одну значащую цифру больше, чем требуется.

4. Представление экспериментальных данных

Экспериментальные данные могут быть представлены в виде таблицы; гистограммы; графика.

Рассмотрим эти представления более детально.

4.1. Представление экспериментальных данных в виде таблицы

Представление экспериментальных данных в виде таблицы позволяет легко их обозреть, что облегчит сравнение различных значений.

Общая форма таблицы для размещения экспериментальных данных может быть представлена следующей схемой (табл. 2):

Таблица 2

№ п/п	Название	
	Заголовок столбца	
	Подзаголовок столбца	Подзаголовок столбца
1	Числовое значение	Числовое значение
.		

- Слово «Таблица» и ее номер указывается справа над таблицей.
- Таблица должна иметь название, которое располагается по центру.
- Каждый столбец таблицы должен иметь заголовок, указывающий название или символ протабулированной в нем величины, и ее единицу.
- В первом столбце таблицы указывается порядковый номер опыта. В следующих столбцах – результаты и погрешности измерений, в последних столбцах – результаты косвенных измерений (при необходимости).
- Иногда в заголовок столбца выносятся десятичный множитель. Существуют два способа записи десятичного множителя:

1) после физической величины ставится запятая и указывается десятичный множитель с единицей физической величины, то есть десятичный множитель относится к единице физической величины.

Например: $I = 22, 10^{-3} \text{ А}$ (табл. 3);

2) физическая величина умножается на множитель, ставится запятая и указывается единица.

Например: $I \cdot 10^3 = 22 \text{ А} \Rightarrow I = 22 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ (табл. 4).

Таблица 3

№ n/n	$I \cdot 10^{-3} \cdot \text{А}$
1	22
2	23
3	21
среднее	22,5

Таблица 4

№ n/n	$I \cdot 10^3 \cdot \text{А}$
1	22
2	23
3	21
среднее	22,5

- При заполнении таблицы результаты измерений следует записывать сразу и без какой-либо обработки. При этом никаких даже самых простых арифметических подсчетов в уме лучше не проводить.

- Перечень значений одной и той же величины лучше располагать в вертикальном столбце, а не в горизонтальной строке, поскольку легче сопоставить цифры, расположенные столбиком. Единицы при каждом значении физической величины не указываются, так как они указаны в заголовке столбца.

- Если серия измерений сводится к среднему значению, то это значение в таблице следует выделить (последняя строка табл. 3–4). В соответствии с правилами приближенных вычислений, числовое значение результата косвенного измерения должно содержать не больше и не меньше значащих цифр, чем позволяет точность прямых измерений. Они, как правило, записываются с одной запасной цифрой, которая выделяется подчеркиванием.

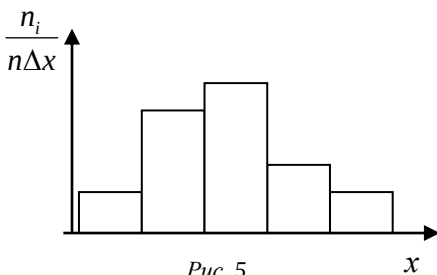


Рис. 5

- Нуль имеет в таблице существенно иное значение, чем пропуск, который изображается значком «—». В то время как пропуск свидетельствует лишь об отсутствии соответствующих числовых данных, нуль означает равенство нулю соответствующего значения табулируемой величины.

4.2. Представление экспериментальных данных в виде гистограммы

Гистограмма представляет собой ступенчатую фигуру, которая показывает, как часто получались те или иные значения измеряемой величины. Как правило, строят гистограмму относительных частот, состоящую из прямоугольников, основаниями которых служат частичные интервалы длиной Δx , а высоты определяются по формуле $\frac{n_i}{n\Delta x}$, где n_i –

сумма частот попадания значения x_i , в заданный интервал значений Δx , n – объем выборки (рис. 5). Гистограмма позволяет в первом приближении судить о *виде функции распределения* результатов наблюдений и их погрешностей.

Порядок построения гистограммы:

1. Полученные результаты разбивают на k интервалов: $k = \sqrt{n}$, n – объем выборки (k округляют до целых чисел и $k \geq 5$).

2. Определяют длину интервала группирования $\Delta x = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{k}$.

3. Находят границы интервалов группирования;

4. Находят сумму частот n_i попадания результатов в каждый i -ый интервал (заполняют второй столбец табл. 5). При распределении результатов по интервалам, те результаты, которые попадают на границы интервалов, распределяют одним из следующих способов:

- относят к последующему интервалу,
- делят пополам между граничащими интервалами,
- относят к предыдущему интервалу.

5. Определяют относительную частоту попадания случайной величины в единичный интервал $\frac{n_i}{n\Delta x}$ (плотность относительной частоты) для

построения гистограммы относительных частот (заполняют третий столбец табл. 5);

6. На каждом интервале длиной Δx строят прямоугольник с высотой равной $\frac{n_i}{n\Delta x}$ (рис. 5).

Таблица 5

Частичный интервал длиной Δx	Сумма частот n_i	Плотность относительной частоты
$x_{H_1}, x_{H_1} + \Delta x$		
$x_{H_1} + \Delta x, x_{H_1} + 2\Delta x$		
$x_{H_1} + 2\Delta x, x_{H_1} + 3\Delta x$		
...		
$x_{H_1} + (k - 1)\Delta x, x_{H_1} + k\Delta x$		

4.3. Представление экспериментальных данных в виде графика

Графики, как правило, используют для представления экспериментальных данных в том случае, если имеется функциональная зависимость между этими данными.

В зависимости от назначения графики условно можно разделить на две группы:

- 1) иллюстративные (качественные) графики – дают качественную картину некоторого процесса;
- 2) количественные графики – предназначены для количественной оценки исследуемых параметров.

Количественный график должен быть тщательно вычерчен, с соблюдением основных правил его построения.

Графики могут быть построены на бумаге, а также на экране дисплея компьютера с последующей возможностью их распечатки на бумаге и хранения на диске.

Правила построения графиков

- *Выбор типа бумаги.* В физике при построении графиков наиболее употребительны два вида бумаги: с обычным линейным масштабом (миллиметровая бумага) и с логарифмическим масштабом. Логарифмическая графическая бумага бывает двух типов: полулогарифмическая, когда логарифмический масштаб взят только для одной из осей координат, и двойная логарифмическая, когда такой масштаб взят для обеих осей. Полулогарифмическая бумага удобна в том случае, когда связь между величинами логарифмическая или экспоненциальная. Если эта связь имеет

вид степенной функции, то для построения графика лучше взять двойную логарифмическую бумагу. При отсутствии бумаги с логарифмическим масштабом, можно воспользоваться обычной миллиметровой бумагой.

- Выбор осей координат. В физике на графиках принято по оси абсцисс ОХ откладывать независимую физическую величину (аргумент), по оси ординат ОУ – зависимую физическую величину (функцию). Какая из физических величин является аргументом, а какая функцией, устанавливается из физических соображений экспериментатором.

- Выбор масштабов по осям координат. Масштаб для физических величин, отложенных по координатным осям, есть отрезок, длина которого соответствует выбранному значению физической величины (например, 1 мм – 5 мА). При выборе масштабов следует исходить из следующих соображений:

- 1) экспериментальные точки должны быть расположены с разумным интервалом и не сливаться друг с другом;

- 2) масштаб должен быть простым. Проще всего, если он равен $10n$ единиц измеряемой величины или $2 \cdot 10n$, или $5 \cdot 10n$, где n – любое целое число. Других масштабов следует избегать, поскольку при нанесении точек на график придется производить арифметические подсчеты в уме;

- 3) в случае линейной зависимости между величинами, масштабы по координатным осям должны быть выбраны так, чтобы отрезок, характеризующий приращение аргумента Δx , приблизительно был равен отрезку, соответствующему приращению функции Δy . Тогда прямая на графике делит угол между осями координат почти пополам и точность отсчета по графику будет наибольшей.

Разметка шкал по осям координат:

- на осях наносятся деления, соответствующие целым значениям единиц масштаба;

- на каждой из осей приводят только тот интервал измерений соответствующей физической величины, в котором проводилось исследование (совсем не обязательно, чтобы на графике помещалось начало координат);

Таблица 6

№ п/п	Р, Па	Т, К
1	50000	328
2	59000	333
3	70000	338
4	83000	343
5	96000	348

- для удобства пользования на каждой координатной оси, необходимо проставить название представляемой ею величины и единиц, в которых она измеряется, причем десятичный множитель удобнее отнести к единице измерения, тогда деления на осях можно отмечать цифрами 10, 20, 30, ..., а не 10000, 20000, 30000, ... или 0,0001; 0,0002; 0,0003; ...

- при построении зависимости давления насыщенного пара CCl_4 от температуры (табл. 6) удобно выбрать разметку шкал по осям, как это показано на рис. 6.

Нанесение точек по данным эксперимента:

- точки на график наносят аккуратно, остро отточенным карандашом;

- чтобы различать, экспериментальные результаты, относящиеся к разным точечным графикам, пользуются разными значками, например, крестиками, треугольниками, точками разного цвета (при этом надо знать меру). График не должен выглядеть загроможденным;

- если наносимые данные содержат погрешности, то каждая точка должна быть отмечена соответствующим символом, например, крестиком (рис. 7), причем погрешность каждой из величин должна представляться в выбранном масштабе отрезком заметной длины. В связи с этим, минимальное деление шкалы должно соответствовать значению физической величины, не превышающему погрешности измерения. Таким образом, масштаб определяется абсолютными погрешностями значений тех величин, которые откладываются по осям.

Примечание: так как нанесение таких значков приводит к загромождению графика, то это следует делать только в том случае, если информация о погрешностях действительно необходима, а график используется для количественной обработки результатов.

Проведение кривой через нанесенные точки:

- кривая должна быть плавной;
- кривая не обязательно должна проходить через каждую отдельную точку, но как можно ближе ко всем нанесенным экспериментальным точкам. Отклонение точек от кривой отражает наличие погрешностей, такие отклонения – объективный и закономерный фактор;

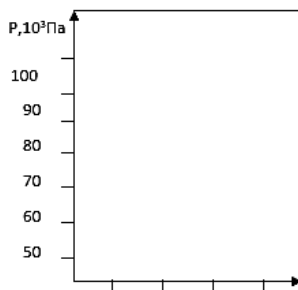


Рис. 6

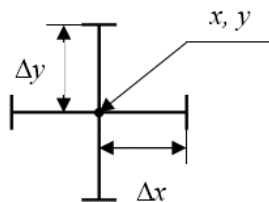


Рис. 7

- если экспериментальные точки разбить на группы, то примерно половина точек должна лежать по одну сторону кривой, а половина – по другую сторону.

Составление описательного заголовка. Название, которое дается графику после того как он закончен, должно содержать точное описание того, что показывает график.

4.4. Представление результата измерения

Результат измерения может быть представлен в виде *числа* (точечная оценка истинного значения измеряемой величины) или *интервала* (интервальная оценка истинного значения измеряемой величины).

Точечная оценка состоит в нахождении выборочного среднего $\langle x \rangle$, которое принимается за результат измерения, и выборочного среднего квадратического отклонения S , которое принимается за среднюю квадратическую погрешность.

Интервальная оценка состоит в нахождении интервала, в который попадает истинное значение измеряемой величины: $x = \langle x \rangle \pm \Delta x$, где $\langle x \rangle$ – результат измерения, а Δx – погрешность результата измерения.

Интервальная оценка может быть представлена в виде доверительного интервала и (или) в виде предельного (максимального) интервала.

Доверительный интервал – это интервал, в который по определению попадает истинное значение измеряемой величины с заданной вероятностью p . При нахождении доверительного интервала задается определенное значение вероятности p : 0,5; 0,9; 0,95; 0,99.

Предельный интервал – это интервал, в который попадает истинное значение измеряемой величины с максимальной вероятностью p . При нахождении предельного интервала задается максимальное значение вероятности 0,997.

4.5. Правила записи результата измерения

Как правило, при вычислении результата измерения и его погрешности, особенно с использованием электронного калькулятора, получают приближенное число, содержащее большое количество цифр. При записи приближенных чисел пользуются принципом Крылова–Брадиса: приближенное число следует записывать так, чтобы в нем все значащие цифры, кроме последней, были верными и лишь последняя цифра являлась сомнительной. Вследствие этого и в окончательном значении рассчитанной

погрешности должны быть оставлены только первые одна–две значащие цифры. На практике установилось такое правило: если полученное число начинается с цифры, равной или большей $\sqrt{10} \approx 3$, то в нем сохраняется лишь одна цифра; если же оно начинается с цифр, меньших 3, то есть с цифр 1 и 2, то в нем сохраняют две цифры. В соответствии с этим правилом установлены и нормируемые значения погрешностей средств измерений: в числах 1,5 и 2,5 % указывают две цифры, но в числах 0,5; 4; 6 % указывается лишь одна цифра.

Таким образом, при *записи* окончательного *результата измерения* следует руководствоваться следующими *правилами*:

- Определить значение абсолютной погрешности Δx , или средней квадратической погрешности S результата измерения.

- Округлить погрешность Δx (S) до двух значащих цифр, если первая из них равна 1 или 2, и до одной, – если первая есть 3 и более.

Например: $\Delta x = 0,127 \approx 0,13$; $\Delta x = 0,065 \approx 0,07$.

Аналогично поступают при расчете относительной погрешности ε , или коэффициента вариации V .

- Округлить конечный результат так, чтобы его последняя цифра и последняя значащая цифра погрешности принадлежали одному разряду.

Например: $\Delta x = 0,07$, $x = 2,7385 \approx 2,74$.

- Выразить измеряемую величину и ее абсолютную погрешность Δx , или среднюю квадратическую погрешность S в одних единицах.

Например: $I = 0,240$ А, $\Delta I = 0,005$ А, но не $I = 240$ А, а $\Delta I = 5$ мА.

- Если в ответе содержится степень вида 10^n , то показатель степени n и в результате и в его погрешности должны быть одинаковыми!

Например: $R = 20 \cdot 10^3$ Ом, $\Delta R = 3 \cdot 10^3$ Ом.

- Записать результат измерения:

а) в виде *числа* (точечная оценка):

$\langle x \rangle$, S , n , V %, где $\langle x \rangle$ – среднее значение результата измерения, S – средняя квадратическая погрешность, n – количество опытов, V – коэффициент вариации.

б) в виде *интервала* (интервальная оценка):

– *доверительный интервал*: $x = (\langle x \rangle \pm \Delta x)$, P , n , $\Delta x_{\text{нд-â}}$, где $\langle x \rangle$ – результат измерения, Δx – абсолютная случайная погрешность результата измерения, P – доверительная вероятность, n – количество опытов, $\Delta x_{\text{нд-â}}$ – предельная (максимальная) погрешность средств измерения;

– *предельный* интервал: $x = (\langle x \rangle \pm \Delta x)$, $\mathcal{E}\%$, где $\langle x \rangle$ – среднее значение результата измерения, Δx – абсолютная погрешность результата измерения, $\mathcal{E}$ – относительная погрешность результата измерения.

5. Правила выполнения лабораторных работ

5.1. Общие требования

Студенты выполняют лабораторные работы в соответствии с графиком, который составляется преподавателем, ведущим лабораторные занятия. Каждому занятию предшествует предварительная подготовка студента, которая включает в себя:

а) ознакомление с целью и содержанием лабораторной работы по методическим указаниям к ней;

б) изучение теоретической части работы по учебникам и учебным пособиям, рекомендованным в методических указаниях;

в) составление предварительного отчета по лабораторной работе, который выполняется на листах стандартного размера 297×210 мм (формат А4) (можно взять развернутый лист обычной тетради в клетку).

Предварительный отчет должен содержать:

- титульный лист с названием лабораторной работы (рис. 8);
- цель работы;
- приборы и принадлежности;
- таблицы для занесения метрологических характеристик измерительных приборов;
- теоретическую часть (основные понятия и законы, относящиеся к теме работы);
- описание метода измерений и установки;
- таблицы для записи результатов измерений и вычислений.

Теоретическая часть отчета должна быть краткой, занимать не более одной страницы. Она должна содержать основные положения, законы, лежащие в основе изучаемого физического явления, и рабочую формулу (без вывода) с расшифровкой всех буквенных обозначений.

Студент приступает к выполнению лабораторной работы только после получения допуска. Студенты работают либо индивидуально, либо бригадами (2–3 человека) в соответствии с утвержденным графиком, находящимся в лаборатории на информационном стенде.

Первый этап практической части работы студентов – изучение лабораторной установки (приборы и оборудования). Особое внимание должно быть уделено определению метрологических характеристик измеритель-

ных приборов, в которые входят: диапазон измерений, цена делений, класс точности (для стрелочных электроизмерительных приборов), погрешность измерений. Эти характеристики, выраженные в тех единицах, в которых снимаются показания с приборов, заносятся в метрологическую таблицу.

Следующий этап выполнения работы – монтаж и наладка экспериментальной установки (если это необходимо). Монтаж установки, выполненный студентом, должен быть проверен преподавателем или лаборантом. Только после этой проверки студент приступает к самостоятельному выполнению работы.

При первых наблюдениях никаких отсчетов и записей производить не следует. Лишь после того, как студент несколько раз проследит явление, научится управлять установкой и проведет так называемые «прицелочные измерения», он может приступить к записи показаний приборов. Результаты измерений, заносятся в таблицу, представленную в методических указаниях или составленную студентом самостоятельно. При этом в таблице записываются обозначения и единицы каждой физической величины. Полученные результаты предъявляются преподавателю. Затем с разрешения преподавателя нужно выключить установку. По окончании практической части работы студент завершает оформление отчета по лабораторной работе, то есть дополняет предварительный отчет, оформленный при подготовке к выполнению работы, следующей информацией:

- 1) таблицей с результатами измерений;
- 2) обработкой результатов всех прямых и косвенных измерений;

МГЭИ им. Сахарова БГУ

Кафедра физики и высшей математики

Лабораторная работа № _____

Название: _____

Выполнил: _____

студент группы _____

ФИО _____

	Допуск	Измерения	Сдача
Подпись и дата			

Минск 200_

- 3) расчетом искомых величин в единицах СИ;
- 4) графиками (если это необходимо);
- 5) выводами.

5.2. Допуск к лабораторной работе

Перед выполнением лабораторной работы студент должен получить у преподавателя **допуск** к выполнению работы. **Необходимым** условием для получения допуска является заранее оформленный персональный отчет (конспект) данной лабораторной работы. Допуск проводится путем устного опроса или через **компьютерное тестирование** в компьютерном классе при лаборатории. В процессе допуска преподаватель выясняет степень готовности студента к выполнению лабораторной работы (знание теории, электрической схемы и устройства измерительной установки, методики измерений и обработки экспериментальных результатов).

В случае положительной оценки подготовки студента к выполнению лабораторной работы преподаватель ставит свою подпись на титульной странице отчета (рис. 8) студента в графе «Допуск».

5.3. Выполнение лабораторной работы

Получив необходимые указания и разрешение на выполнение работы, студент приступает к измерениям: получает и заносит в таблицы экспериментальные данные; проводит необходимые расчеты; строит графики и т. п.

Выполнив необходимые действия, предъявляет полученные результаты преподавателю и, при их положительной оценке, получает его подпись в графе «Измерения».

5.4. Защита лабораторной работы

К защите представляется полностью оформленный отчет (конспект) работы. Преподаватель проверяет правильность и полноту оформления отчета, 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 «Сдача» и работа считается выполненной и защищенной. Выполненные работы должны быть защищены на текущем или на следующем занятии.

Студент, не получивший допуск к выполнению лабораторной работы, приступить не может. Причина невыполнения работы считается неуважительной.

Если студент имеет две незащищенные работы, то к выполнению следующих работ он не допускается. Причина невыполнения считается неуважительной.

Выполнение всех лабораторных работ обязательно.

5.5. Порядок отработки невыполненных лабораторных работ

Лабораторную работу, не выполненную по уважительной причине, студент должен отработать (бесплатно, при наличии разрешения деканата) в течение следующих двух недель после пропущенного занятия.

Лабораторная работа, не выполненная по неуважительной причине, отрабатывается на платной основе в течение следующих двух недель после пропущенного занятия.

Отработка невыполненной лабораторной работы проводится в дни, указанные на информационном стенде лаборатории или по согласованию с ведущим занятия преподавателем. Допуск, измерения, оформление отчета и защита лабораторной работы проводится в соответствии с общими правилами (П. П. 5.1–5.4).

Лабораторная работа 1.

Исследование электростатического поля

1. Цель работы. Экспериментальное определение распределения потенциала электростатического поля точечного заряда, диполя и поля между двумя электродами.

2. Приборы и принадлежности:

Пластмассовая ванночка, источник напряжения ВСШ-6, набор электродов, цифровой прибор DT830B, зонд (изолированный проводник длиной около 1 м с оголенным острым концом длиной 2–3 см), соединительные провода, миллиметровая бумага, стакан с водопроводной водой, лист бумаги.

3. Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Какое поле называют электростатическим? Каковы основные его особенности?

2. Что называют напряженностью электростатического поля? В каких единицах измеряется напряженность?

3. Как изменится напряженность поля точечного заряда q , если:

а) расстояние r от некоторой точки до заряда увеличить вдвое;

б) заряд q увеличить вдвое, а расстояние r от некоторой точки до заряда уменьшить вдвое?

4. Сформулируйте принцип суперпозиции для напряженности и потенциала электростатического поля системы зарядов.

5. Какие линии называют линиями напряженности электростатического поля? Каковы их особенности?

6. Как направлены линии напряженности электростатического поля точечного заряда?

7. Какое электростатическое поле называют однородным? Как направлены линии напряженности однородного поля?

8. Что называют потенциалом электростатического поля? В каких единицах он измеряется?

9. Чему равен потенциал электростатического поля:

а) точечного заряда;

в) равномерно заряженной проводящей сферы?

4. Основы теории

При конструировании некоторых приборов (линзы электронных микроскопов, электронные лампы) необходимо знать распределение электростатического поля в пространстве между электродами.

Электростатическое поле в каждой точке характеризуется *вектором напряженности* $\vec{E}$ и *потенциалом* φ , которые зависят от зарядов являющихся источниками поля и их взаимного расположения. Теоретический расчет распределения потенциала, как величины скалярной, проще расчета векторного поля $\vec{E}$, однако и расчет потенциала практически выполним лишь при простых конфигурациях электродов. Поэтому сложные электростатические поля исследуются экспериментально. Напряженность поля $\vec{E}$ и потенциал связаны между собой соотношением: $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$

Поскольку аналитическую зависимость электрического потенциала можно задать уравнением $\varphi \equiv \varphi(x, y, z)$, то проекции напряженности на оси координат имеют вид:

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx}, \quad E_y = -\frac{d\varphi}{dy}, \quad E_z = -\frac{d\varphi}{dz}.$$

Ее модуль можно определить по формуле:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} = \sqrt{\left(\frac{d\varphi}{dx}\right)^2 + \left(\frac{d\varphi}{dy}\right)^2 + \left(\frac{d\varphi}{dz}\right)^2}, \text{ а сам вектор } \vec{E} \text{ в разложении по декартовому базису выражается следующим образом:}$$

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k} = - \left(\frac{d\varphi}{dx} \vec{i} + \frac{d\varphi}{dy} \vec{j} + \frac{d\varphi}{dz} \vec{k} \right).$$

Следовательно, *напряженность электростатического поля равна градиенту его электрического потенциала, взятому со знаком «минус».*

Таким образом, если известна зависимость потенциала от координат точки поля $\varphi = (x, y, z)$, то для нахождения компонент вектора напряженности следует вычислить производные потенциала по соответствующим координатам. Обратная задача (вычисление потенциала по известной напряженности поля) решается путем интегрирования.

Воображаемая поверхность (или линия), все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется *экипотенциальной поверхностью (линией)*. При перемещении заряда вдоль экипотенциальной поверхности потенциал не изменяется. Следовательно, составляющая вектора напряженности, касательная к линии напряженности, равна нулю:

$$\frac{d\varphi}{dl} = E_l = 0.$$

Это означает, что вектор напряженности, а следовательно, и линии напряженности в любой точке перпендикулярны к экипотенциальным поверхностям.

Экипотенциальная поверхность – геометрическое место точек, потенциалы которых равны (в случае двух измерений говорят об экипотенциальной линии). Согласно формуле для потенциала электростатического поля точечного заряда, экипотенциальные поверхности являются сферическими. Линии напряженности и экипотенциальные линии взаимно перпендикулярны (касательные, проведенные в точках их пересечения, взаимно перпендикулярны). На рис. 1.1 сплошными линиями изображены экипотенциальные, а пунктирными – силовые линии электрического поля двух одноименных точечных зарядов.

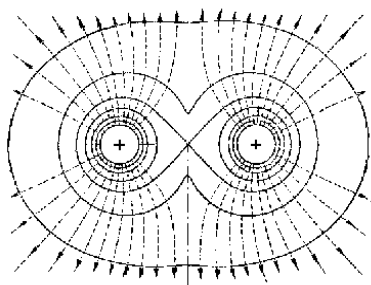


Рис. 1.1

Экипотенциальную поверхность можно провести через любую точку поля, и таких поверхностей может быть бесконечно много. Если проводить их таким образом, чтобы разность потенциалов между двумя соседними поверхностями была величиной постоянной, то по плотности нанесения экипотенциальных поверхностей можно судить о картине электрического поля.

Метод моделирования электростатического поля

Для экспериментального изучения электростатического поля используется аналогия, существующая между распределением потенциала в электростатическом поле и в проводящей среде, по которой проходит стационарный (постоянный во времени) электрический ток. Такую среду условно называют «полем тока».

Аналогия дает возможность заменять изучение электростатического поля между заряженными телами излучением поля стационарного тока между электродами при условии, что потенциалы электродов поддерживают постоянными, а *проводящая среда имеет значительно большее удельное сопротивление, чем вещество электродов*. Такой метод называется моделированием электростатического поля.

Для изучения поля в проводящую среду вводятся два подвижных зонда и два неподвижных электрода; каждый зонд принимает потенциал той точки, в которую он введен.

Отсутствие разности потенциалов между зондами свидетельствует о том, что они находятся на одной эквипотенциальной поверхности. Координаты точек с одинаковыми потенциалами регистрируются в процессе исследования электрического поля; по ним строятся эквипотенциальные и силовые линии.

В работе изучается распределение потенциалов в поле, а линии напряженности строятся как перпендикулярные линии к экспериментально найденным линиям равного потенциала (*эквипотенциальным линиям*). При определении потенциалов электростатического поля используется метод моделирования. Сущность его заключается в том, что при одинаковой форме электродов электрическое поле в диэлектрике имеет такую же конфигурацию, что и поле в проводящей среде, если только между этими электродами поддерживать постоянную разность потенциалов за счет внешнего источника ЭДС. В этом случае при изучении поля пространство между электродами заполняют слабо проводящей средой, в качестве которой может быть обычная вода из водопровода.

Если в проводящую среду ввести зонд (тонкий проводник), то благодаря току происходит выравнивание потенциала зонда и исследуемой точки поля, в которую он введен. При этом показания электроизмерительного прибора, включенного в цепь зонда, будут соответствовать потенциалу исследуемой точки относительно второго электрода. Сопротивление прибора должно быть значительно больше сопротивления проводящей среды между электродами. Если это условие не будет выполнено, то зонд может искажать поле. К электродам подводится переменное напряжение низкой частоты (50 Гц), потому что при использовании источника постоянного тока происходит поляризация электродов, что также приводит к искажению поля.

3. Методика измерений и обработка результатов

В пластмассовую ванночку (рис. 1.2) положите лист стекла, к которому приклеена миллиметровая бумага с координатной сеткой, и заполните ванночку водой до высоты 0,5 см. На поверхности стекла установите электроды 1 и 2. Чтобы избежать искажения поля возле стенок ванны, электроды следует расположить на расстоянии в 4–5 раз меньшем расстояния между стенками.

Для измерения разности потенциалов между двумя точками поля используется цифровой мультиметр DT830B (M890Gi или M890D), с большим входным сопротивлением и металлический зонд. Напряжение на электроды подается от источника напряжения ВСШ-6.

ЗАДАНИЕ 1. Исследование электростатического поля диполя.

1. Соберите схему по рис. 1.2. Расположите электроды (латунные цилиндрики с припаянными к ним проводами) симметрично относительно координатной сетки на расстоянии примерно 5 см друг от друга. Обратите внимание на то, чтобы дно ванночки было горизонтальным.

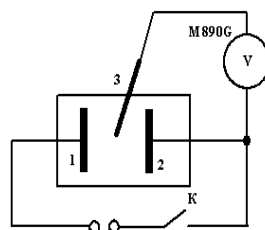


Рис. 1.2

2. На измерительном приборе DT830B установите переключатель рода работы в положение « $\sim V$ », соответствующее пределу измерения «20 В».

3. Включите источник питания ВСШ-6 в сеть. Подвижный зонд 3 (красный) установите вертикально в одну из точек исследуемого электростатического поля. Замкните ключ.

4. Исследуйте электростатическое поле диполя. Перемещая подвижный зонд, найдите точку поля, потенциал которой $\varphi_1 = (1 \div 2)$ В.

5. Отметьте положение этой точки на заранее подготовленном листе миллиметровой бумаги с координатной сеткой.

6. Найдите и отметьте на бумаге еще несколько точек с таким же потенциалом. Соедините эти точки эквипотенциальной линией.

7. Найдите 5–6 эквипотенциальных линий, потенциалы которых отличаются от φ_1 на $(1 \div 2)$ В. Возле каждой линии укажите значение потенциала, которому она соответствует.

ЗАДАНИЕ 2. Исследование электростатического поля между плоскими электродами.

1. Установите в ванночке два плоских электрода. Расположите их симметрично по отношению к координатной сетке на расстоянии, меньшем их размеров.

2. Включите источник питания ВСШ-6 в сеть. Подвижный зонд 3 (*красный*) установите вертикально в одну из точек исследуемого поля. Замкните ключ.

3. Перемещая подвижный зонд, найдите между электродами точку электростатического поля, потенциал которой $\varphi_1 = (1 \div 2) \text{ В}$.

4. Отметьте положение этой точки на заранее подготовленном листе миллиметровой бумаги с координатной сеткой.

5. Найдите и отметьте на бумаге еще несколько точек с таким же потенциалом. Соедините эти точки эквипотенциальной линией.

6. Найдите еще 5–6 эквипотенциальных линий, потенциалы которых отличаются от φ_1 на $(1 \div 2) \text{ В}$. Возле каждой линии укажите значение потенциала, которому она соответствует.

7. Проведите пунктиром линии напряженности электростатического поля между плоскими электродами.

8. Рассчитайте модуль напряженности электростатического поля между электродами.

9. Расположите электроды на расстоянии, приблизительно равном их размерам, повторите измерения, изобразите картину поля и проанализируйте результаты эксперимента.

ЗАДАНИЕ 3. Исследование электростатического поля точечного заряда.

1. Поместите в ванночку **кольцеобразный** электрод, соединенный с отрицательным полюсом источника напряжения. **В центр кольца поместите второй электрод, присоединенный к другому полюсу батареи** (латунный цилиндр), так, чтобы его положение было симметричным относительно координатной сетки. Обратите внимание на то, чтобы дно ванночки было горизонтальным.

2. На измерительном приборе DT830B установите переключатель рода работы в положение « $-V$ », соответствующее пределу измерения «20 В».

3. Включите источник напряжения ВСШ-6 в сеть. Подвижный зонд 3 (*красный*) установите вертикально в одну из точек исследуемого электростатического поля. Замкните ключ.

4. Исследуйте электростатическое поле точечного заряда. Перемещая подвижный зонд, найдите точку поля, потенциал которой $\varphi_1 = (1 \div 2) \text{ В}$.

5. Отметьте положение этой точки на заранее подготовленном листе миллиметровой бумаги с координатной сеткой.

6. Найдите и отметьте на бумаге еще несколько точек с таким же потенциалом. Соедините эти точки эквипотенциальной линией.

7. Найдите 5–6 эквипотенциальных линий, потенциалы которых отличаются от φ_1 на $(1 \div 2)$ В. Возле каждой линии укажите значение потенциала, которому она соответствует.

8. Проведите пунктиром линии напряженности поля точечного заряда и **определите модуль напряженности в точках поля, находящихся на расстояниях, соответствующих эквипотенциальным линиям.**

9. Постройте график зависимости $E = f\left(\frac{1}{r^2}\right)$.

7. Вопросы для самоконтроля

1. Как связана разность потенциалов с напряженностью электрического поля?

2. Пробный заряд помещают в разные точки электростатического поля, созданного зарядом Q (рис. 1.3). В какой точке модуль напряженности поля будет наибольшим? Наименьшим? В каких точках он одинаков?

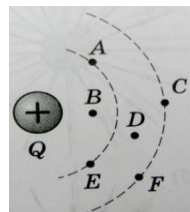


Рис. 1.3

3. Как определить потенциал электростатического поля, созданного несколькими точечными зарядами?

4. Как Вы понимаете утверждение о том, что электростатическое поле потенциально? Как связана работа сил электростатического поля по перемещению электрического заряда с изменением потенциальной энергии заряда в этом поле?

5. Докажите, что работа сил электростатического поля при перемещении заряда по замкнутой траектории равна нулю.

6. Докажите, что эквипотенциальные линии не пересекаются.

7. По отношению к какой точке поля цифровой вольтметр измеряет потенциал в цепи, схема которой изображена на рис.2?

8. Чему будет равно показание вольтметра, если в схеме экспериментальной установки, изображенной на рисунке, подвижный зонд присоединить ко 2-му электроду?

9. При каком положении подвижного зонда в схеме экспериментальной установки, изображенной на рис. 1.2, вольтметр покажет наибольшее напряжение?

10. Объясните сущность метода моделирования электростатического поля.

11. Почему проводимость воды, которая заполняет ванночку, должна быть значительно меньше проводимости электродов?

12. Сформулируйте теорему Гаусса, запишите формулу.

13. Проанализируйте результаты исследования электростатических полей, выполненного Вами.

Лабораторная работа 2.

Измерение сопротивлений мостовым методом

1. Цель работы. Измерение сопротивления резистора мостовым методом; проверка законов последовательного и параллельного соединения резисторов.

2. Приборы и принадлежности

Источник постоянного тока, реохорд, магазин сопротивлений, гальванометр, ключ, резисторы с неизвестными сопротивлениями, соединительные провода.

3. Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Что такое сопротивление проводника? Назовите единицы сопротивления в СИ.

2. От чего зависит электрическое сопротивление проводника?

3. Что такое удельное сопротивление проводника? Назовите единицы удельного сопротивления в СИ.

4. Каким образом могут соединяться проводники в электрических цепях?

5. Как определить общее сопротивление участка цепи состоящего из последовательно соединенных резисторов?

6. Как определить общее сопротивление участка цепи состоящего из параллельно соединенных резисторов?

7. Какими преимуществами отличается мостовой метод измерения сопротивлений от иных методов?

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2} ?$$

8. При каком условии можно считать, что

9. Чем обусловлено использование в работе гальванометра с нулем на середине шкалы?

10. Оказывает ли воздействие чувствительность гальванометра на точность измерений сопротивления?

4. Основы теории

Электрическим током называют упорядоченное (направленное) движение любых свободных носителей электрических зарядов. Различают: *ток проводимости*, создаваемый микроскопическими заряженными частицами (электроны, ионы и др.), движущимися внутри неподвижного макроскопического проводника (твердого, жидкого, газообразного); *конвекционный ток*, который создается зарядами макроскопических частиц (тел) при движении этих частиц; *ток в вакууме*, когда свободные заряженные частицы (ионы или электроны) движутся независимо от макроскопических тел. Электропроводность вещества зависит от природы носителей свободных электрических зарядов (их обычно называют

носителями тока). Прохождение тока в металлах и полупроводниках не вызывает каких-либо изменений их химического состава. Из этого следует, что электропроводность металлов и полупроводников обусловлена движением свободных электронов. Вещества, обладающие электронной проводимостью, называются *проводниками первого рода*.

Растворы и расплавы, проводящие электрический ток, называются *электролитами*. Носителями тока в электролитах являются свободные ионы, возникающие в результате электролитической диссоциации молекул. *Электролиты относятся к проводникам второго рода*. Прохождение тока через растворы электролитов всегда сопровождается химическими превращениями и переносом вещества.

Ионизированные газы относятся к проводникам третьего рода. Носителями тока в них являются свободные электроны и ионы, которые возникают под действием внешнего ионизатора или электрического поля, существующего в газе.

Количественными характеристиками тока являются его сила и плотность.

Средним значением силы тока $\langle I \rangle$ называют физическую скалярную величину, характеризующую интенсивность направленного движения носителей тока и равную отношению заряда Δq , проходящего через поперечное сечение проводника, к промежутку времени Δt , то есть $\langle I \rangle = \frac{\Delta q}{\Delta t}$. Мгновенное значение силы тока является производной от заряда, проходящего через поперечное сечение проводника по времени, и определяется по формуле $I = \frac{dq}{dt} = q'(t)$.

Если сила тока и его направление не изменяются с течением времени, то ток называют *постоянным*. В этом случае $\langle I \rangle = I = \frac{q}{t}$, где q – заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за время t .

Так как сила тока скалярная величина, то, говоря о его направлении, имеют в виду направление движения *положительных* зарядов. Поэтому в металлическом проводнике с током *электроны* упорядоченно движутся в направлении, *противоположном* направлению тока.

Если средняя скорость упорядоченного движения электронов в металлическом проводнике $\langle v \rangle$, а их концентрация n , то заряд, который проходит через поперечное сечение проводника за время t , равен $q = enSt$. Принимая во внимание, что $\Delta l = \langle v \rangle t$, получаем $q = n \langle v \rangle eSt$, где e – заряд электрона; S – площадь поперечного сечения проводника. Поэтому сила тока $I = q/t = en \langle v \rangle S$.

За единицу силы тока в СИ принят – ампер. Один А равен силе неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным бесконечно длинным проводникам ничтожно малого кругового сечения, находящимся в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызывает между ними силу взаимодействия, модуль которой $F=2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Плотность тока — физическая векторная величина, равная отношению силы тока I в проводнике к площади его поперечного сечения S , то есть $j = \frac{I}{S}$. Если учесть, что $I = en \langle |\vec{v}| \rangle S$, то $\vec{j} = en \langle \vec{v} \rangle$. Направление вектора плотности тока $\vec{j}$ совпадает с направлением вектора скорости $\vec{v}$ упорядоченного движения положительно заряженных носителей тока. За единицу плотности тока в СИ принят ампер на квадратный метр $1 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$.

Отметим, что в металлах средняя скорость упорядоченного движения электронов при максимально допустимых значениях силы тока $\langle v \rangle \sim 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}}$, в то время, как средняя скорость их теплового движения, $\langle v_{\text{тепл}} \rangle \sim 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Для существования в веществе электрического тока, необходимо выполнение следующих условий: во-первых, оно должно быть проводником, то есть иметь свободные заряды, которые способны перемещаться на расстояния, во много раз большие, чем расстояния между соседними частицами вещества; во-вторых, в веществе должно существовать электрическое поле.

В состав проводника, кроме свободных зарядов входят незаряженные частицы и связанные заряды. Все они участвуют в хаотическом тепловом движении, равновероятном во всех направлениях. При наложении электрического поля под действием электрических сил возникает преобладающее направление упорядоченного движения свободных зарядов. Под воздействием электрического поля свободная заряженная частица вещества должна двигаться ускоренно. В проводниках свободные заряды двигаются с некоторой постоянной средней скоростью. Следовательно, проводник оказывает сопротивление упорядоченному движению свободных зарядов, часть энергии этого движения передается проводнику и превращается в его внутреннюю энергию.

Согласно экспериментально установленному закону Ома: **сила тока в однородном металлическом проводнике прямо пропорциональна напряжению между его концами и обратно пропорциональна сопро-**

тивлению этого проводника: $I = \frac{U}{R}$. Если учесть, что $I = jS$, где j – плотность тока; S – площадь поперечного сечения проводника и, кроме того, $U = El$, где E – напряженность электрического поля в проводнике; l – его длина, и, наконец, $R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ – удельное сопротивление проводника, то закон Ома можно записать в виде $j = \sigma E$, где $\sigma = 1/\rho$ – удельная проводимость проводника.

Физическая скалярная величина, характеризующая свойство проводника уменьшать скорость упорядоченного движения свободных зарядов, называется **электрическим сопротивлением R проводника** (активным сопротивлением).

В СИ единицей сопротивления проводника является ом (Ом). $R = 1$ Ом – сопротивление такого проводника, сила тока в котором $I = 1$ А при напряжении на нем $U = 1$ В.

Применяются и другие единицы: килоом (кОм), мегаом (МОм), миллион (мОм): $1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$; $1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом}$; $1 \text{ мОм} = 10^{-3} \text{ Ом}$.

Физическую величину $G = \frac{1}{R}$, называют электрической проводимостью. Единицей электрической проводимости в СИ является сименс: 1 См – это проводимость проводника сопротивлением 1 Ом .

В простейшей модели металлического проводника, если рассматривать его сопротивление как результат столкновений упорядоченно движущихся свободных электронов с ионами кристаллической решетки, то оно должно быть прямо пропорционально длине проводника l , потому что на большей длине будет больше столкновений. Благодаря движению свободных зарядов искажается даже идеальная кристаллическая решетка проводника и именно на искажениях кристаллической структуры рассеивается энергия упорядоченного движения свободных зарядов. Количество искажений на единицу поперечного сечения и их величина уменьшаются при увеличении площади поперечного сечения S проводника, поэтому сопротивление проводника должно быть, обратно пропорционально этой площади. Из сказанного выше следует, что $R \sim \frac{l}{S}$. Следовательно, $R = \rho \frac{l}{S}$,

где ρ — удельное сопротивление вещества проводника. Таким образом, сопротивление однородного металлического проводника постоянного сечения зависит от его геометрических размеров, формы и вещества, из которого изготовлен проводник.

Удельное сопротивление ρ проводника – скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника, изготовленного из данного вещества и имеющего длину 1 м

и площадь поперечного сечения 1 м^2 , или сопротивлению куба с ребром 1 м . Единицей удельного сопротивления в СИ является Ом·метр (Ом·м).

Удельное сопротивление металлического проводника зависит от следующих факторов:

- 1) концентрации свободных электронов в проводнике;
- 2) интенсивности рассеивания свободных электронов на ионах кристаллической решетки, совершающих тепловые колебания;
- 3) интенсивности рассеивания свободных электронов на дефектах и примесях кристаллической структуры.

Наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро и медь. Очень велико удельное сопротивление у сплава никеля, железа, хрома и марганца – «нихрома». Удельное сопротивление металлов в значительной степени зависит от наличия в них примесей. Например, введение 1 % примеси марганца увеличивает удельное сопротивление меди в три раза.

Все электрические приборы – от нагревателей и электрических ламп до стереофонических усилителей – оказывают сопротивление проходящему через них току. Соединительные провода обладают, как правило, очень низким сопротивлением. Во многих схемах, в частности в электронных приборах, для управления силой тока используют резисторы, которые могут иметь электрическое сопротивление от долей ома до 10^6 Ом (МОм). В радиоэлектронике используют два основных типа резисторов: проволочные (представляющие собой катушки тонкой проволоки) и непроволочные (обычно изготовленные на основе углеродной пленки).

Сопротивление резистора указывается на корпусе цифрами или цветным кодом. Первые две полосы соответствуют двум значащим цифрам сопротивления, третья указывает множитель (число нулей), четвертая – допуск (рис. 2.1). Например, если на корпусе резистора, имеются красная, оранжевая, зеленая и серебряная полосы, то его сопротивление $R=25\,000 \text{ Ом}$ (25 кОм) $\pm 10 \%$.

В таблице 2.1 приведена маркировка некоторых типов резисторов.

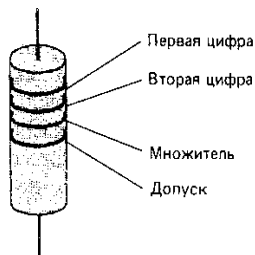


Рис. 2.1

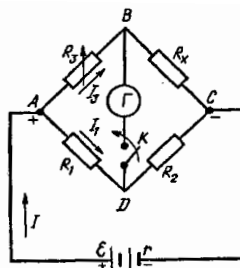


Рис. 2.2

Таблица 2.1

Цветная маркировка резисторов

Цвет	Цифра	Множитель	Допуск
Черный	0	1	
Коричневый	1	10^1	
Красный	2	10^2	
Оранжевый	3	10^3	
Желтый	4	10^4	
Зеленый	5	10^5	
Синий	6	10^6	
Фиолетовый	7	10^7	
Серый	8	10^8	
Белый	9	10^9	
Золотой		10^{-1}	5%
Серебряный		10^{-2}	10%
Без окраски			20%

Для точного измерения сопротивлений используют так называемые мостовые схемы. Самой распространенной из них является схема мостика Уинстона (рис. 2.2). Четыре резистора R_1 , R_2 , R_3 и R_x , образуют «плечи» схемы. Участок цепи, содержащий гальванометр представляет собой мостик, соединяющий точки B и D . После подключения источника тока к клеммам мостика A и C в цепи проходит ток. Чтобы измерить R_x , переменное сопротивление резистора R_3 изменяют до тех пор, пока точки B и D схемы не будут иметь одинаковые потенциалы $\varphi_A = \varphi_D$ (при этом стрелка гальванометра не отклоняется при замкнутом ключе K). В таком случае говорят, что мост сбалансирован (уравновешен).

5. Методика измерений и обработка результатов

Принципиальная схема электрической цепи для измерения сопротивления мостовым методом приведена на рис. 2.3. Отсутствие тока через гальванометр свидетельствует о компенсации мостовой схемы.

Условие компенсации достигается, когда ток через гальванометр отсутствует. Поскольку для измерения очень маленького тока можно использовать очень чувствительный гальванометр, то условие компенсации может быть установлено очень точно. В отсутствие тока через гальва-

нометр цепь состоит просто из двух параллельных ветвей. Создаваемый батареей ток делится на нижний ток I_1 и верхний ток I_2 . Напряжение на неизвестном резисторе R_x должно быть таким же, как и напряжение на резисторе R_1 , то есть $I_1 R_1 = I_2 R_x$. Аналогично напряжение на эталонном резисторе $R_{ЭТ}$ должно быть таким же, как и напряжение на R_2 , то есть $I_1 R_2 = I_2 R_{ЭТ}$.

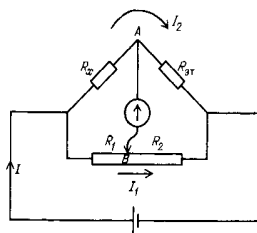


Рис. 2.3

Следовательно, $\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_2 R_x}{I_2 R_{ЭТ}}$, откуда $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_{ЭТ}$.

Эта формула позволяет определить сопротивление R_x , если сопротивления $R_{ЭТ}$, R_1 и R_2 известны.

В данной работе эталонным резистором является сопротивление R_0 магазина сопротивлений Р-33. Двумя другими сопротивлениями являются плечи реохорда – калиброванного проводника, натянутого вдоль миллиметровой шкалы, по которому скользит подвижный контакт. Сопротивления R_1 и R_2 плеч реохорда пропорциональны их длинам l_1 и l_2 :

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S}, \quad R_2 = \rho \frac{l_2}{S}, \quad \text{поэтому} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}, \quad \text{откуда} \quad R_x = R_{ЭТ} \frac{l_1}{l_2}.$$

Таким образом, измерение сопротивления R_x сводится к установке на магазине сопротивления $R_{ЭТ}$ и отысканию на реохорде такого положения подвижного контакта, при котором сила тока в гальванометре будет равна нулю.

В качестве индикатора тока в работе используется мультиметр DT830В. При перемещении подвижного контакта реохорда показания мультиметра (предел 200 мА) проходят через нуль и при дальнейшем перемещении подвижного контакта, на дисплее прибора высвечивается знак «минус».

ЗАДАНИЕ 1

1. Соберите электрическую цепь в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2.3.

2. На магазине сопротивлений установите сопротивление $R_{ЭТ} = 20$ Ом и добейтесь нулевого показания мультиметра.

3. Повторите измерения для значений $R_{ЭТ}$: 40 Ом, 60 Ом, 80 Ом и 100 Ом.

4. Рассчитайте значение $R_{1х}$.

5. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

№ п/п	$R_{ЭТ}$, Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	R_{1x} , Ом	$\langle R_{1x} \rangle$, Ом
20					
...					
100					

ЗАДАНИЕ 2

1. На магазине сопротивлений установите сопротивление $R_{ЭТ} = 50$ Ом и добейтесь нулевого показания мультиметра перемещением ползунка реохорда.

2. Повторите измерения для значений $R_{ЭТ}$: 80 Ом, 100 Ом, 120 Ом, 150 Ом.

3. Рассчитайте значение R_{2x} .

4. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

№ п/п	$R_{ЭТ}$, Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	R_{2x} , Ом	$\langle R_{2x} \rangle$, Ом
50					
...					
150					

ЗАДАНИЕ 3

1. Соедините резисторы R_{1x} и R_{2x} последовательно.

2. Самостоятельно подберите 5 значений сопротивления $R_{ЭТ}$ и сбалансируйте электрическую цепь.

3. Рассчитайте общее сопротивление R_{3x} двух резисторов, соединенных последовательно.

4. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2.3

Таблица 2.3

№ п/п	R_0 , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	R_{3x} , Ом	$\langle R_{3x} \rangle$, Ом

5. Проверьте выполнимость формулы $R_{3x} = R_{1x} + R_{2x}$.

ЗАДАНИЕ 4

1. Соедините резисторы R_{1x} и R_{2x} параллельно.

2. Самостоятельно подберите 5 значений сопротивления $R_{ЭТ}$ и сбалансируйте электрическую цепь.

3. Рассчитайте общее сопротивление R_{4x} двух резисторов при их параллельном соединении.

4. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2.4.

Таблица 2.4

№ п/п	$R_{эГ}$, Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	R_{4x} , Ом	$\langle R_{4x} \rangle$, Ом

5. Проверьте выполнимость формулы $R_{4x} = \frac{R_{1x} \cdot R_{2x}}{R_{1x} + R_{2x}}$.

6. Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте определения понятий: «электрический ток», «сила тока».
2. Что принимают за направление электрического тока?
3. Дайте определение единицы силы тока в СИ.
4. Что называют плотностью тока?
5. В каких единицах измеряют сопротивление и удельное сопротивление проводника?
6. От чего зависит сопротивление проводника?
7. Получите формулы для расчета сопротивления участка цепи при последовательном и параллельном соединениях проводников.
8. Докажите, что погрешность измерения сопротивления в выполненной Вами работе будет минимальной, если длины плеч реохорда одинаковые ($l_1 = l_2$).

Лабораторная работа 3. Определение ЭДС источника постоянного тока методом компенсации

1. Цель работы: Изучить компенсационный метод определения ЭДС и экспериментально определить ЭДС источника тока.

2. Приборы и принадлежности: источник постоянного тока; нуль-гальванометр; источник тока с неизвестной ЭДС; нормальный элемент Вестона; реохорд; двойной ключ для одновременного или раздельного включения 2-х источников тока в электрическую цепь.



Рис. 3.1

3. 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 между однородным и неоднородным участками цепи постоянного тока?
5. Дайте определение понятия «напряжение» на любом участке цепи.
6. Нарисуйте схему электрической цепи для компенсационного измерения напряжения на участке цепи.
7. Как называются приборы для измерения напряжения компенсационным методом?

4. Основы теории

Для существования электрического тока проводимости в проводнике должно существовать электрическое поле, под действием которого свободные заряды, способны перемещаться на расстояния, во много раз большие, чем расстояние между соседними частицами вещества.

Если бы на свободные заряды в проводнике действовали только электростатические силы, то это привело бы к такому перераспределению зарядов, при котором потенциалы всех точек проводника стали бы одинаковыми, а напряженность поля внутри него обратилась в нуль. Следовательно, электростатические силы не могут обеспечить существование постоянного тока.

Это означает, что в электрической цепи должны быть не только участки, на которых положительные заряды движутся в сторону уменьшения потенциала (потребители), но и участки, на которых движение положительных зарядов происходит в направлении, противоположном направлению действия электростатических сил, то есть в направлении возрастания потенциала. На этих участках движение зарядов может происходить только под воздействием сил не электростатического происхождения. Такие силы называют сторонними, а источник, создающий их, называют источником тока. Любой источник тока имеет два полюса: положительный и отрицательный. На положительном полюсе существует избыточный положительный заряд (недостаток электронов), а на отрицательном – избыточный отрицательный заряд (избыток электронов) (рис. 3.1).

При замыкании электрической цепи взаимодействие зарядов, находящихся на полюсах источника тока со свободными зарядами, ведет к возникновению на всей поверхности проводника не скомпенсированных поверхностных зарядов, причем плотность их постепенно уменьшается по

мере удаления от положительного полюса источника тока. Именно эти заряды создают стационарное электрическое поле внутри проводника. На протяжении всей длины проводника линии напряженности $\vec{E}$ этого поля, параллельны поверхности проводника (если проводник однородный). Модуль напряженности E стационарного электрического поля связан с электрическим напряжением U между концами однородного проводника длиной l соотношением $E = \frac{U}{l}$. Линии напряженности ста-

ционарного электрического поля незамкнуты — они начинаются и заканчиваются на полюсах источника тока; внутри проводника линии напряженности стационарного электрического поля параллельны его оси, а вне проводника расположены наклонно к поверхности (рис. 3.2).

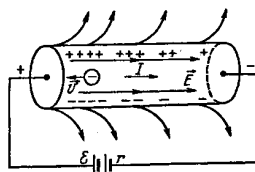


Рис. 3.2

Если сила тока в проводнике постоянна, то распределение электрических зарядов как внутри, так и на поверхности проводника не меняется с течением времени, несмотря на упорядоченное движение заряженных частиц, поскольку на смену уходящим зарядам непрерывно поступают новые. Эти движущиеся заряды и создают стационарное электрическое поле, которое является потенциальным и существует как вне проводника, так и внутри его. Потенциалы разных точек поверхности проводника, по которому проходит постоянный ток, различаются, то есть поверхность проводника с током не является эквипотенциальной.

Энергия стационарного электрического поля непрерывно переходит в другие виды энергии (внутреннюю, химическую, механическую). Поэтому для поддержания постоянного тока в проводнике необходимо чтобы в цепи происходило превращение сторонних видов энергии в энергию стационарного электрического поля.

Таким образом, в состав электрической цепи обязательно входят источники тока, потребители (например, резистор, электромотор и др.) и провода, соединяющие их. Кроме того, используются электроизмерительные приборы (амперметр, вольтметр и др.) и приборы управления (ключ и др.).

Следовательно, для существования постоянного электрического тока в проводнике необходимо, чтобы этот проводник был частью замкнутой электрической цепи, в которой есть источник тока. Причем источник должен иметь достаточный запас энергии для того, чтобы за ее счет выполнялась работа по перемещению свободных электрических зарядов в цепи. Основной характеристикой источника тока является электродвижущая сила (ЭДС). Она является энергетической характеристикой источ-

ника тока и численно равна отношению работы, выполняемой сторонними силами при перемещении положительного заряда q вдоль замкнутой

цепи, к значению этого заряда, то есть $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$.

Простейшая электрическая цепь состоит из источника тока (гальванического элемента, аккумулятора или генератора) и резистора R . Источник тока имеет ЭДС $\mathcal{E}$ и сопротивление r , которое часто называют *внутренним*, в отличие от внешнего сопротивления R . В генераторе r – это сопротивление обмоток, а в гальваническом элементе – сопротивление раствора электролита и электродов; R – сопротивление потребителя и проводов, соединяющих его с источником тока.

Согласно закону Ома для полной цепи, сила тока в цепи, ЭДС и полное сопротивление цепи $R + r$, связаны соотношением $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$, то есть **сила тока в полной цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.**

Из закона следует, что напряжение на зажимах источника, а соответственно, и во внешней цепи $U = IR = \frac{\mathcal{E}}{R + r} R = \mathcal{E} - Ir$, где Ir – падение напряжения внутри источника тока. Если цепь разомкнута ($I = 0$), $U = U_{\text{max}} = \mathcal{E}$. Таким образом, ЭДС равна напряжению на зажимах разомкнутого источника тока. Если внешнее сопротивление цепи равно нулю, то режим работы источника тока называют *коротким замыканием*. Сила тока в этом случае $I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$.

Если ни один из имеющихся источников тока не обеспечивает силу тока, необходимую для нормальной работы потребителя с заданной мощностью, возникает необходимость соединения источников тока в батареи. Наиболее часто используют последовательное и параллельное соединения источников тока в батарее.

Последовательное соединение источников тока – это соединение, при котором «минус» первого источника соединяют с «плюсом» второго, «минус» второго – с «плюсом» третьего и т. д., а внешнюю цепь подключают к «плюсу» первого и «минусу» последнего источника. ЭДС батареи в этом случае равна сумме ЭДС отдельных источников тока: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n$, а ее внутреннее сопротивление – сумме внутренних сопротивлений источников: $r = r_1 + r_2 + \dots + r_n$. Если ЭДС и внутренние сопротивления всех источников тока одинаковые, то $\mathcal{E} = n\mathcal{E}_1$, $r = nr_1$, где n – число последовательно соединенных источников тока. Если один или несколько из последовательно соединенных источников тока подключены

«плюс» к «плюсу» и «минус» к «минусу», то их ЭДС будут отрицательными.

Параллельное соединение источников тока – это соединение, при котором «плюсы» всех источников тока соединяются в один узел, а «минусы» – во второй. Внешняя цепь подключается к узлам. В этом случае ЭДС $\mathcal{E}$ и внутреннее сопротивление r батареи можно рассчитать по следующим формулам:

$$\frac{\mathcal{E}}{r} = \frac{\mathcal{E}_1}{r_1} + \frac{\mathcal{E}_2}{r_2} + \dots + \frac{\mathcal{E}_n}{r_n}, \quad \frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}, \quad \text{Если} \quad \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \dots = \mathcal{E}_n = \mathcal{E}_0$$

и $r_1 = r_2 = \dots = r_n = r_0$, то $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0$, $r = \frac{r_0}{n}$.

4. Методика измерений и обработка результатов

Рассмотрим электрическую цепь, схема которой приведена на рис. 3.3. 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 . Сила тока в цепи $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$.

Напряжение между точками bc составляет $U_{bc} = IR_{bc}$,

где R_{bc} – сопротивление участка bc .

Дополним схему гальваническим элементом с ЭДС $\mathcal{E}_1 < \mathcal{E}$ и нуль-гальванометром Γ (рис. 3.4). Участок цепи $b\mathcal{E}_1cb$ можно рассматривать как два источника, соединенные параллельно. ЭДС первого источника $\mathcal{E}_1$. ЭДС второго равна напряжению между точками b и c реохорда, по которому проходит ток, созданный источником тока с ЭДС $\mathcal{E}$, к которому подключены точки b и c реохорда питания ϵ измерительной схемы, то есть $\mathcal{E}_2 = U_{bc} = IR_{bc}$. Если $\mathcal{E}_1 < U_{bc}$, ток идет от точки c к положительному полюсу источника $\mathcal{E}_1$ и далее к точке b , то стрелка нуль – гальванометра отклонится в одну сторону, если же $\mathcal{E}_1 > U_{bc}$, то отклонение стрелки будет противоположным.

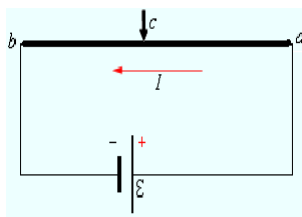


Рис. 3.3

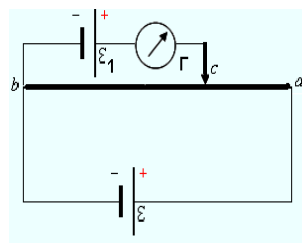


Рис. 3.4

Поскольку $U_{bc} = IR_{bc}$, то, перемещая подвижный контакт, можно найти такую точку c , что $\mathcal{E}_1 = U_{bc}$ и сила тока на участке $b\mathcal{E}_1c$ (через нуль-гальванометр) будет равен нулю. В этом случае ЭДС $\mathcal{E}_1$ элемента **компенсируется** (по этой причине метод называют компенсационным) напряжением U_{bc} . Следовательно,

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

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

Разделив $\mathcal{E}_1$ на $\mathcal{E}_2$, получим: $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho \frac{l_1}{S}}{\rho \frac{l_2}{S}} = \frac{l_1}{l_2}$, где 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 $\mathcal{E}_0$, из последнего равенства можно определить ЭДС неизвестного элемента $\mathcal{E}_x: \mathcal{E}_x: \mathcal{E}_0 = \frac{l_x}{l_0}$, где l_0 – длина участка bc реохорда при условии компенсации ЭДС $\mathcal{E}_0$ нормального элемента Вестона напряжением на этом участке.

5. Измерения

При выполнении данной работы необходимо соблюдать следующие требования:

- 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. Изучите принципиальную схему лабораторной установки, проверьте правильность сборки электрической цепи (рис. 3.5).

Здесь $\mathcal{E}_0$ – элемент Вестона, $\mathcal{E}_x$ – исследуемый элемент, $\mathcal{E}$ – источник постоянного тока, Г – нуль-гальванометр, К1 – ключ, К – двойной ключ, ab – реохорд.

2. Ключ К1 поставьте в нейтральное положение.

3. Включите в сеть источник постоянного тока $\mathcal{E}$. Если он регулируемый, установите напряжение 3÷5 В.

4. Ключом K_1 включите в цепь элемент $\mathcal{E}_x$. Замыкая на очень короткое время ключ K и перемещая подвижный контакт реохорда, добейтесь отсутствия тока через гальванометр. Запишите в табл. 3.1 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 табл. 3.1 значение l_0 .

6. Повторите измерения (п.п. 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 $\langle \mathcal{E}_x \rangle$, абсолютную и относительную погрешности.

8. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 3.1.

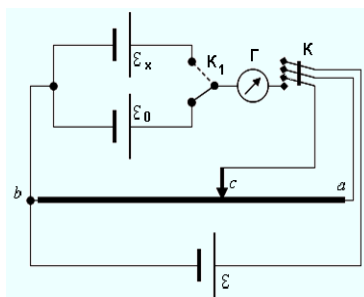


Рис. 3.5. Принципиальная схема лабораторной установки

Таблица 3.1

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

9. Сформулируйте выводы.

6. Вопросы и задания для контроля

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 измеряется сила тока в СИ?

5. Как в СИ определяется единица силы тока (один ампер)?

6. Запишите аналитическое выражение закона Ома для полной цепи.

7. Каким прибором измеряют напряжение? Как он подключается к потребителю? Каким прибором измеряют силу электрического тока? Как он включается в цепь?

8. При каких условиях электроизмерительные приборы практически не будут влиять на режим работы электрической цепи?

9. Для чего в данной работе используется нормальный элемент Вестона?

10. Какова связь между ЭДС источника тока и напряженностью стационарного электрического поля?

11. Резистор, сопротивлением $R_1 = 5 \text{ Ом}$, идеальный вольтметр и источник постоянного тока соединены параллельно. Вольтметр показывает напряжение $U_1 = 19 \text{ В}$. После замены резистора сопротивлением R_1 на резистор сопротивлением $R_2 = 12 \text{ Ом}$, вольтметр показал напряжение $U_2 = 12 \text{ В}$. Определите ЭДС $\mathcal{E}$ источника тока и его внутреннее сопротивление r .

Лабораторная работа 4.

Исследование энергетических соотношений в цепи постоянного тока

1. Цель работы:

Экспериментальное определение ЭДС $\mathcal{E}$ и внутреннего сопротивления r источника тока; исследование зависимости напряжения на зажимах источника тока, полезной мощности и коэффициента полезного действия источника тока от сопротивления потребителя и силы тока в цепи.

2. Приборы и принадлежности:

Источник постоянного тока, магазин сопротивлений, миллиамперметр DT830B, цифровой электронный вольтметр, ключ, соединительные провода.

3. Вопросы для допуска к лабораторной работе:

1. Что такое вольт-амперная характеристика (ВАХ)? Приведите примеры ВАХ.
2. Что такое работа и мощность электрического тока? В каких единицах они измеряются?
3. Сформулируйте и запишите формулу закона Джоуля–Ленца.
4. Дайте определение полезной мощности и коэффициента полезного действия (КПД) источника тока.
5. Как практически измерить напряжение и силу тока на участке цепи?
6. Что такое ток короткого замыкания и от чего зависит его значение?
7. Как избежать разрушительного действия тока короткого замыкания?

4. Основы теории

Сила тока в неразветвленной цепи, содержащей источник ЭДС $\mathcal{E}$ (рис. 4.1), определяется выражением:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (1)$$

где r – внутреннее сопротивление источника тока, R – сопротивление внешней части цепи (нагрузки).

Полная мощность тока равна сумме мощностей тока на внешнем R и внутреннем r сопротивлениях: $P = I\mathcal{E} = I^2R + I^2r$.

Мощность тока на внешнем сопротивлении (нагрузке) называется *полезной мощностью*:

$$P = UI.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) источника тока

$$\eta = \frac{P_R}{P} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{I\mathcal{E} - I^2r}{I\mathcal{E}} = 1 - \frac{Ir}{\mathcal{E}}.$$

Если нагрузкой является резистор сопротивления R , то полезная мощность тока $P_R = IU = I^2R$.

Коэффициент полезного действия (КПД) источника тока в этом случае $\eta = \frac{P_R}{P} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{I^2R}{I^2R + I^2r} = \frac{R}{R + r}$ зависит от значения сопротивлений R и r .

При этом $\eta = \frac{R}{R + r} < 1$, так как внутренне сопротивление источника тока всегда отличается от нуля.

Для данного источника тока внутреннее сопротивление r постоянно, поэтому полная мощность

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

мощность $P_R = IU = I^2R = \frac{\mathcal{E}^2}{(R + r)^2}R$ и коэффициент полезного действия источника

тока $\eta = \frac{R}{R + r}$, являются функциями внешнего сопротивления цепи R .

Для правильного выбора режима работы цепи (согласования источника с нагрузкой) нужно определенным образом подбирать соотношение между сопротивлениями R и r . Исследуя зависимости силы тока, мощно-

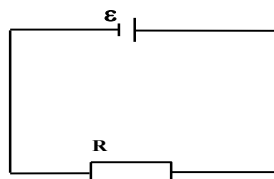


Рис. 4.1

сти и КПД от отношения $\frac{R}{r} = \beta$, получаем: $I = \frac{\mathcal{E}}{r} \cdot \frac{1}{1 + \beta}$; $P_R = \frac{\mathcal{E}^2}{r} \cdot \frac{\beta}{(1 + \beta)^2}$;

$$P = \frac{\mathcal{E}^2}{r} \cdot \frac{1}{1 + \beta}; \quad \eta = \frac{\beta}{1 + \beta}.$$

Максимальные значения этих величин соответственно равны:
 $(P_R)_{\max} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}$ при $\beta = 1$; $P_{\max} = \frac{\mathcal{E}^2}{r}$ при $\beta = 0$; $I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ при $\beta = 0$; $\eta_{\max} = 1$ при $\beta = \infty$.

Относительные значения указанных величин приведены на рис. 4.2.

1. Таким образом, мощность тока во внешнем участке цепи достигает максимального значения, когда сопротивление внешнего участка цепи равно внутреннему сопротивлению источника тока.

2. Полная мощность и сила тока максимальны при $R = 0$, уменьшаются вдвое при $R = r$, стремятся к нулю при $R \rightarrow \infty$.

3. КПД $\eta = 0$ при $R = 0$, $\eta = 0,5$ при $R = r$ стремятся к единице при $R \rightarrow \infty$.

Теоретические графики зависимостей полной мощности $P = f(I)$, полезной мощности $P_R = f(I)$ и коэффициента полезного действия источника тока $\eta = f(I)$ от силы тока в цепи представлены на рис. 4.3.

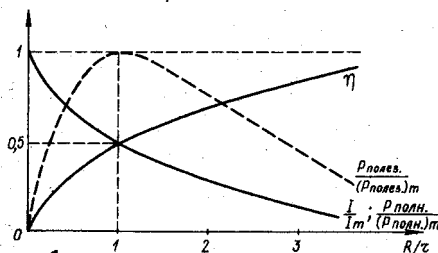


Рис. 4.2

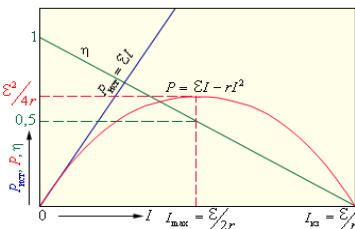


Рис. 4.3

5. Методика измерений и обработка результатов

В данной работе нужно экспериментально исследовать зависимости: $U = f(R)$, $P = f(R)$, $P_R = f(R)$ и $\eta = f(R)$, и представить их графически.

При вычислениях удобно использовать формулы: $P = I\mathcal{E}$ – для полной мощности, $P_R = IU$ – для полезной мощности и $\eta = \frac{U}{\mathcal{E}}$ – для КПД.

1. Изучите принципиальную схему лабораторной установки, проверьте правильность ее сборки (рис. 4.3).

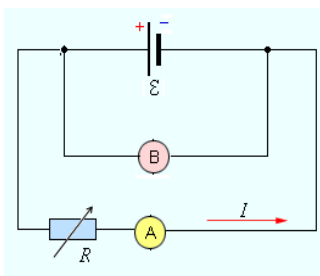


Рис 4.3

2. Включите в цепь источник постоянного тока.

3. Изменяйте сопротивление потребителя в соответствии с рекомендациями преподавателя, записывая при этом показания амперметра и вольтметра в табл. 4.1.

4. Закончив измерения, рассчитайте соответствующие значения полезной мощности $P=IU$.

5. Выберите два значения силы тока I_1 и I_2 , существенно отличающихся друг от друга, определите не менее восьми значений ЭДС $\mathcal{E}$ и внутреннего сопротивления r источника, решив систему уравнений:

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

6. Рассчитайте среднее значение внутреннего сопротивления $\langle r \rangle$ и значения КПД источника $\eta = \frac{R}{R+r}$ для каждого значения R .

7. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 4.1.

Таблица 4.1.

№ измерения	U, В	I, А	R, Ом	P, Вт	η
1					
·					
·					
16					

8. По полученным данным постройте графики зависимостей:

- напряжения от сопротивления $U=f(R)$ и силы тока $U=f(I)$;
- полезной мощности от сопротивления $P=f(R)$ и силы тока $P=f(I)$;
- КПД источника тока от сопротивления потребителя $\eta = f(R)$ и силы тока $\eta = f(I)$.

лы тока $\eta = f(I)$.

9. Сравните рассчитанное значение ЭДС с максимальным измеренным напряжением и рассчитанное значение внутреннего сопротивления с его значением, определенным по графику $P(R)$.

10. По результатам измерений и вычислений сформулируйте выводы.

6. Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте закон Джоуля–Ленца и запишите формулу для расчета работы тока.

2. Дайте определение полезной мощности тока и запишите формулу для ее расчета.

3. Изобразите схематически электрические цепи при работе источника тока в различных режимах: холостой ход; работа на нагрузку; короткое замыкание.

4. Получите выражение для расчета КПД источника тока.

5. Какие силы совершают полезную работу при движении зарядов в электрической цепи?

6. При каком значении внешнего сопротивления можно получить максимальную полезную мощность от источника тока?

7. Выведите выражение для определения внешнего сопротивления, при котором от источника тока можно получить максимальную полезную мощность.

8. ЭДС гальванического элемента $\mathcal{E} = 1,6$ В, а его внутреннее сопротивление $r = 0,5$ Ом. Определите коэффициент полезного действия элемента, если сила тока в цепи $I = 2,4$ А.

Лабораторная работа 5.

Зависимость электропроводности металлов и полупроводников от температуры

Цель работы: изучение характера зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры; определение температурного коэффициента сопротивления металла и энергии активации проводимости полупроводника.

Приборы и принадлежности: Сушильный шкаф, приборы для измерения температурного коэффициента сопротивления металлов и полупроводников, мультиметр М890G с датчиком температуры (термопара), мультиметр М890D для измерения сопротивления образцов.

Вопросы для допуска к лабораторной работе:

Выведите формулу закона Ома в дифференциальной форме. Поясните смысл физических величин, входящих в формулу.

2. Сформулируйте определения понятий «сопротивление» и «электропроводность», запишите их символические обозначения и названия основных единиц в СИ.

3. Сформулируйте определения понятий «удельное сопротивление» и «удельная электропроводность», запишите их символические обозначения и названия основных единиц в СИ.

4. Назовите основные факторы, определяющие значение удельного сопротивления проводников.

5. Почему металлы имеют разную удельную проводимость?

6. Как классическая теория электропроводности металлов объясняет их сопротивление?

7. Что собой представляет и как образуется электронный газ в кристалле?

8. Как изображаются на схемах значения энергии электронов в кристалле?

9. Выделите существенные признаки понятия «энергетическая зона».

10. Что такое температурный коэффициент сопротивления?

11. Почему сопротивление металлических проводников с ростом температуры растет, а сопротивление полупроводников уменьшается?

Основы теории

В соответствии с основными положениями зонной теории: электроны в атоме могут принимать только дискретные значения энергии, которые представляются в виде энергетических уровней. На схемах эти уровни принято показывать в виде отдельных линий (рис. 5.1).

По оси ординат отложены значения энергии электронов, а по оси абсцисс – расстояние между атомами. На больших расстояниях, пока взаимодействием между атомами можно пренебречь, энергетические уровни электронов полностью совпадают.

В одном изолированном атоме валентный электрон может иметь определенные дискретные значения энергии E_1 , E_2 и т. д.

Предположим, что N одинаковых атомов, из которых состоит решетка твердого тела, удалены настолько далеко, что их взаимодействием можно пренебречь. Тогда энергетические уровни валентного электрона в каждом из N невзаимодействующих атомов одинаковы: каждый уровень в системе повторен N раз. При сближении атомов до расстояний, когда они образуют связанную систему, например кристалл, взаимодействие между атомами возрастает и приводит к изменению положения уровней, которые «расщепляются» на энергетические зоны (на рис. 5.1 они за-

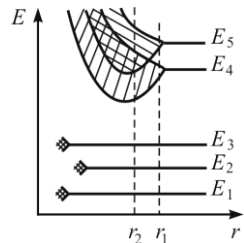


Рис. 5.1

штрихованы). Вместо одного, одинакового для всех атомов значения энергетического уровня, возникает равная количеству атомов в кристалле совокупность очень близких, но не совпадающих между собой значений энергии. Величина расщепления уровней не одинакова. Сильнее расщепляются уровни, которые в атоме соответствующие внешним (валентным) электронам. На рис. 5.1 показано расщепление уровней в зависимости от расстояния между атомами. При расстоянии между атомами, равном r_1 , верхние уровни начинают расщепляться, однако образованные зоны еще

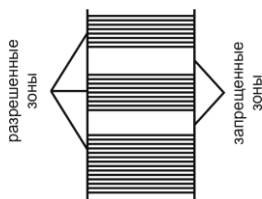


Рис. 5.2

не перекрываются. Они разделены между собой зоной, которая называется *запрещенной*. Электроны не могут иметь значения энергии, соответствующие запрещенной зоне (рис. 5.2).

Ширина зоны определяется величиной энергии связи между атомами и не зависит от числа атомов в кристалле. Так как N очень велико, то различия в энергиях между соседними уровнями в одной зоне крайне малы. Поэтому внутри зоны для перевода электрона с одного энергетического уровня на другой или соседний, требуется ничтожно малая энергия. Начиная с расстояния r_2 , происходит перекрывание соседних зон.

Энергетические зоны не следует представлять с пространственными зонами, то есть областями пространства, где может находиться электрон. Согласно принципу, Паули на одном энергетическом уровне в любой разрешенной зоне не может находиться более двух электронов с противоположными значениями спина. Поэтому энергетические уровни заполняются парами электронов, начиная с самых «низких». Самая верхняя разрешенная зона, полностью заполненная электронами, называется основной или валентной. Остальные, более высокие по значению энергии зоны, называются возбужденными. Первая возбужденная зона, которая примыкает к валентной, называется зоной проводимости.

Электропроводность кристалла зависит от распределения электронов по энергетическим уровням. Количество электронов в кристалле с одним и тем же значением энергии ограничено. Иными словами, ограничена вместимость каждого энергетического уровня и, следовательно, каждой зоны. Это связано с запретом Паули, согласно которому в квантовой системе (атоме, молекуле, кристалле) не может быть двух электронов в одном и том же квантовом состоянии. Поэтому последняя из занятых электронами зон — основная, или валентная зона — может оказаться заполненной полостью. Если при этом свободные квантовые состояния следующей зоны — зоны проводимости — удалены на значительный интер-

вал энергии ΔE , то создание в таком кристалле электрического поля не вызовет направленного движения электронов, то есть электрического тока.

Движение электрона в квантовой механике рассматривается как процесс перехода его из одного квантового состояния в другое. Для этого необходимо, чтобы конечное квантовое состояние было свободно. Таким образом, электрический ток в твердых телах под воздействием внешнего электрического поля может возникнуть только тогда, когда зона не полностью заполнена электронами или может частично освободиться от электронов вследствие нагревания или какого-то другого воздействия. В диэлектриках и полупроводниках валентные зоны целиком заполнены при температурах, близких к температуре абсолютного нуля, а зоны проводимости, отделенные от валентной запрещенной зоной, пусты (рис. 5.3, а, б).

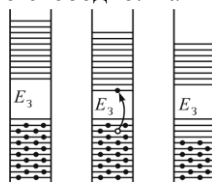


Рис. 5.3

У металлов либо нет запрещенной зоны, либо валентная зона не полностью заполнена даже при температуре абсолютного нуля (рис. 5.3, в). Поэтому даже при наличии слабого электрического поля металлические проводники начинают проводить электрический ток.

Чтобы полупроводник начал проводить электрический ток, необходимо электронам из валентной зоны сообщить энергию, достаточную для преодоления запрещенной зоны и попадания их в зону проводимости. Так, при нагревании электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости, а в валентной зоне образуется свободное (вакантное) место, называемое *дыркой*. В это вакантное место могут переходить электроны с соседних уровней. Итак, при наложении электрического поля, и в валентной зоне, и в зоне проводимости создаются условия для возникновения тока. Наличие электронов в зоне проводимости обуславливает *электронную проводимость*, а наличие вакантных мест в валентной зоне — *дырочную проводимость*.

Чтобы оторвать электрон от атома и превратить его в электрон проводимости, атому необходимо сообщить некоторую энергию ΔE , которую называют энергией ионизации. Тепловая ионизация происходит за счет энергии колебательного движения атомов. Возможна также ионизация путем бомбардировки потоком быстрых частиц, облучения электромагнитными волнами и т. д.

Принято считать, что если ширина запрещенной зоны при нормальной температуре больше $\Delta E = 2-3$ эВ ($1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж), то кристалл является диэлектриком, а если около 1 эВ — полупроводником. Так, у алмаза, который является диэлектриком, ширина запрещенной зоны $\Delta E = 5,2$ эВ. Значения ΔE для разных полупроводников лежат в пределах

от 0,1 до 2 эВ. Например, у наиболее распространенных полупроводников германия и кремния ширина запрещенной зоны составляет 0,72 эВ и 1,09 эВ соответственно.

При комнатных температурах средняя кинетическая энергия теплового движения атома порядка $kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \text{ Дж} \sim 10^{-21} \text{ Дж}$, то есть заметно меньше ширины запрещенной зоны ΔE .

Собственная и примесная проводимость полупроводников. Рассмотрим схематично механизм проводимости чистого полупроводника на примере германия (рис. 5.4).

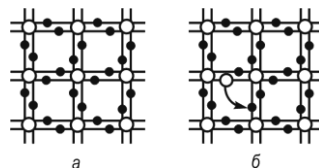


Рис. 5.4

На последней оболочке атома германия находятся 4 валентных электрона. Связь с соседними атомами создана путем обобщения одного электрона с соседним атомом. Каждый атом окружают 4 соседа. Таким образом, заполняется последняя оболочка и образуется ковалентная связь. При $T = 0$ (рис. 5.4, а) все электроны задействованы в связях между атомами. При $T > 0$ (рис. 5.4, б) часть электронов переходит в пространство между узлами кристаллической решетки, а на местах их пребывания образуются дырки. Дырки тоже считаются носителями электрического тока. При наличии дырок электроны могут рекомбинировать с ними, то есть совершать переходы из каких-то квантовых состояний в незаполненные (дырки).

В отсутствие внешнего электрического поля по всему объему полупроводника установится равновесная концентрация дырок и свободных электронов. При наложении внешнего электрического поля на хаотичное движение электронов и дырок накладывается направленное движение. Электроны движутся в сторону, противоположную полю, а дырки – по направлению поля. Согласно зонной теории (рис. 5.3, б), электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости и полупроводник становится электропроводящим. Рассмотренную электропроводность чистых полупроводников называют *собственной*.

При наличии в полупроводнике примесей картина электропроводности заметно меняется. Под примесями понимают атомы и ионы других элементов, различные дефекты и искажения в кристаллической решетке.

Наличие в полупроводнике тысячной доли процента примесей способно в сотни тысяч раз уменьшить его сопротивление. Механизм влияния примесей на про-

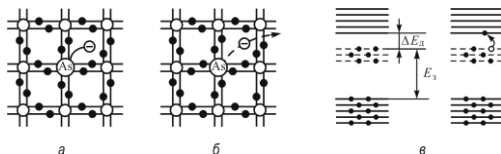


Рис. 5.5

димостью полупроводника рассмотрим снова на примере германия, в который внесены атомы мышьяка (As) (рис. 5.5).

У германия на последней оболочке четыре валентных электрона, а у мышьяка – пять. Один из его валентных электронов не участвует в связях с другими атомами. Небольшие изменения температуры способны оторвать этот электрон от атома (рис. 5.5, б). В результате в полупроводнике возникает проводимость, которую называют *электронной* или *проводимостью n-типа*. Примесь, которая образует такую электропроводность, называют *донорной*.

В зонной теории возникновение проводимости n-типа выглядит следующим образом. Примесь с большей валентностью, чем у основного полупроводника (в данном случае, мышьяк), образует донорные примесные уровни, размещенные в запрещенной зоне и вблизи нижней границы зоны проводимости (рис. 5.5, в).

Энергия, отделяющая эти уровни от зоны проводимости, невелика, порядка 0,01 эВ (для германия с небольшой концентрацией примеси мышьяка $\Delta E_d = 0,0124$ эВ).

При температуре абсолютного нуля эти уровни так же, как и уровни валентной зоны, полностью заполнены. С повышением температуры с большей вероятностью происходит переход электронов с примесных уровней в зону проводимости, чем с валентной зоны.

Если валентность примеси меньше валентности основного полупроводника, то создаваемая ими проводимость называется *дырочной* или *проводимостью p-типа*. Механизм ее образования рассмотрим на примере все того же германия и индия (In), который является трехвалентным. При $T = 0$ все связи атомов германия, за исключением одной из связей с атомами индия, которая представляет собой место, способное захватить электрон, «укомплектованы» (рис. 5.6, а).

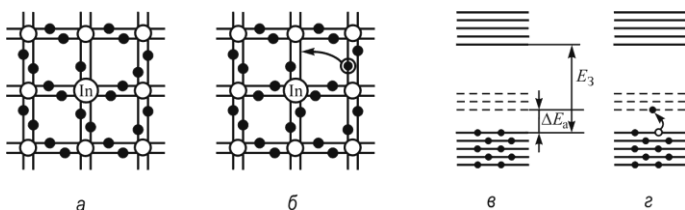


Рис. 5.6

При переходе на эти места электронов с соседних пар возникают дырки, которые будут кочевать по всему кристаллу (рис. 5.6, б).

Вблизи атома примеси возникает избыточный отрицательный заряд, однако он не может быть носителем тока. Индий в германии обусловли-

вает дырочную проводимость. Примеси, которые обеспечивают дырочную проводимость, называются *акцепторными*, а полупроводники с такой проводимостью – *полупроводниками р-типа*. Согласно зонной теории, трехвалентные примеси приводят к возникновению в нижней части запрещенной зоны дополнительных энергетических уровней, не занятых электронами при абсолютном нуле. При повышении температуры электроны с большей вероятностью будут переходить на них, чем на уровни зоны проводимости, так как ширина этих уровней намного меньше ширины запрещенной зоны и составляет сотые доли электрон-вольта (рис. 5.6, в, г).

При одновременном внесении в полупроводник донорных и акцепторных примесей тип проводимости зависит от того, какая из примесей создает большую концентрацию носителей зарядов. Примеси могут компенсировать друг друга. Обычно в полупроводниках существуют носители зарядов четырех типов: электроны собственной проводимости; дырки собственной проводимости; электроны примесной проводимости; дырки примесной проводимости.

Общая удельная электропроводность полупроводника определяется формулой $\sigma = en_1u_1 + en_2u_2 + en_3u_3$, где n_1 – концентрация электронов и дырок собственной проводимости, u_1 и u_2 – их подвижности соответственно, n_2 – концентрация электронов или дырок примесной проводимости, u_3 – их подвижность. Под *подвижностью носителей зарядов* понимают отношение скорости их направленного движения, вызванного электрическим полем, к напряженности этого поля. При смешанной проводимости носители зарядов, которые в большей степени влияют на проводимость, называются *основными*, а остальные же – *неосновными*.

Зависимость электропроводности смешанного полупроводника от температуры представлена в виде графика $\ln \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$ на рис. 5.7.

Здесь σ – удельная электропроводность полупроводника. Качественно эта зависимость разбивается на три участка. Участок *ab* соответствует примесной электропроводности при низких температурах. Угол наклона прямой *ab* характеризует энергию ионизации примесей, или, согласно зонной теории – ширину дополнительных энергетических уровней ΔE_d , ΔE_a : $\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\Delta E}{2k}$, где k – постоянная Больцмана.

Участок *bc* соответствует интервалу температур, при котором все примеси уже ионизированы, а собственная электропроводность еще не появилась. И наконец, участок *cd* соответствует собственной проводимости.

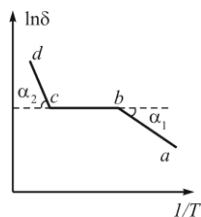


Рис. 5.7

сти полупроводника. По тангенсу наклона прямой cd определяют ширину запрещенной зоны чистого полупроводника: $\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{E_3}{2k}$.

Элементы теории электропроводности.

В классической теории (Друде и Лоренц) электропроводность твердых тел рассматривают на основе модели идеального электронного газа. Электронам приписываются свойства не взаимодействующих между собой частиц, не имеющих объема и хаотически движущихся по кристаллу в тепловом движении. В отсутствии внешних полей направленного движения электронов нет. Электронный газ находится в термодинамическом равновесии с решеткой из-за соударений электронов с ионами (примесей и основных атомов решетки).

В электрическом поле на тепловое движение электронов накладывается направленное движение – дрейф, с которым связан перенос электрического заряда. По определению, плотность тока численно равна заряду, перенесенному в единицу времени через единицу площади по нормали к ней. Через площадку пройдут все электроны, находящиеся в цилиндрическом объеме с единичным основанием и высотой, равной средней скорости дрейфа. Перенесенный при этом заряд $q = nv_d$. Плотность электрического тока: $\vec{j} = en\vec{v}_d$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

В электрическом поле напряженностью $\vec{E}$, в вакууме на электрон действует сила: $\vec{F} = -e\vec{E}$. Согласно второму закону Ньютона $\vec{F} = m\vec{a}$, где $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона. Следовательно, $m\vec{a} = -e\vec{E}$, то есть $m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E}$.

При перемещении по кристаллу электрон сталкивается с атомами решетки, изменяя направление движения и величину кинетической энергии. Влияние соударений на скорость электронов учитывают, вводя силу сопротивления, тормозящую электрон, которая пропорциональна массе и скорости электрона $\vec{F}_c = -\frac{m\vec{v}}{\tau}$. Коэффициент пропорциональности τ имеет размерность времени.

Таким образом, уравнение движения электрона в кристалле при приложении электрического поля описывается неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка, которое имеет вид $m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} - \frac{m\vec{v}}{\tau}$.

Общее решение этого уравнения имеет вид: $\vec{v}(t) = \vec{C} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \frac{e\tau\vec{E}}{m}$.

Согласно начальным условиям $\vec{v}(t)_{t=0} = 0$. Откуда $\vec{C} = \frac{e\tau\vec{E}}{m}$. Таким образом,
$$\vec{v}(t) = -\frac{e\tau\vec{E}}{m} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Согласно закону Ома $\vec{j} = -\sigma\vec{E}$. С учетом формулы $\vec{j} = en\vec{v}_d$ для плотности тока получим $\vec{j} = \sigma\vec{E} = en\frac{e\tau\vec{E}}{m}$, тогда $\sigma = \frac{e^2 n \tau}{m}$.

Если подставить в эту формулу значения σ , e , n , m для металла, то получим $\tau \sim 10^{-13}$ с. Величина τ есть время релаксации проводимости при включении и выключении электрического поля.

Отношение средней скорости дрейфа к напряженности электрического поля называют дрейфовой подвижностью электронов $u = \frac{\vec{v}_d}{\vec{E}} = \frac{e\tau}{m}$, которая численно равна дрейфовой скорости электронов в электрическом поле единичной напряженности. Тогда $\sigma = enu$.

Для характеристики процесса рассеяния электронов вводят: время свободного пробега τ_c – как среднее время движения электрона между двумя соударениями; длину свободного пробега λ – как средний путь, проходимый электронами между соударениями. Эти величины связаны соотношением: $\tau_c = \frac{\lambda}{|\vec{v}_t + \vec{v}_d|}$. Следовательно, $\sigma = \frac{e^2 n \lambda}{m |\vec{v}_t + \vec{v}_d|} = \frac{en\lambda}{m |\vec{v}_t|}$, где $\vec{v}_t$, и $\vec{v}_d$ – скорости хаотического движения электрона, соответственно ($|\vec{v}_t| \gg |\vec{v}_d|$).

Из последней формулы следует, что $\sigma \propto T^{-\frac{1}{2}}$ (для металлов), в то же время из опытных данных известно, что $R \sim T$. Для того, чтобы получить $\sigma(T)$, совпадающую с опытными данными, надо принимать λ значительно больше истинных (то есть электрон без соударений с атомами решетки должен проходить сотни межатомных расстояний).

Теория Друде–Лоренца лишь приближенно описывает электропроводность металлов и полупроводников, так как она исходит из модели идеального газа.

Из этой теории следует, что все электроны имеют одинаковое время свободного пробега, и предполагается, что средняя скорость движения электрона сразу после соударения равна нулю (электрон всю полученную им энергию в электрическом поле в одном столкновении передает решетке).

Поскольку движение электронов в кристалле подчиняется законам квантовой механики, то для описания движения электронов в кристалле необходимо использовать квантовую функцию распределения и статистику Ферми–Дирака ($f_{Ф.Д.}$).

Согласно квантовым представлениям, распределение электронов по энергетическим уровням в разрешенной зоне энергий кристалла подчиняется принципу Паули, согласно которому в одном энергетическом состоянии может находиться не более двух электронов с противоположными спинами. Из этого следует, что в термодинамическом равновесии при $T=0$ К все электроны не занимают энергетических состояний с минимумом энергий как классические частицы, а распределяются по состояниям, в соответствии с функцией распределения, которая определяет вероятность того, что энергетическое состояние при температуре T занято электроном и имеет вид:

$$f_{\phi-\Delta}(E,T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-F}{kT}\right) + 1}, \text{ где } k - \text{ постоянная Больцмана, } F - \text{ параметр}$$

этого распределения, называемый энергией Ферми (уровень Ферми).

Энергия Ферми определяется из условия, что число заполненных состояний при всех энергиях должно быть равно полному числу электронов в системе: $N = \int_0^{\infty} g(E) f_{\phi-\Delta}(E,T) dE$, где $g(E)$ – плотность энергетических состояний, вычисляемая как число состояний, приходящихся на

единичный интервал изменения энергии. При $E=F$, функция $f_{\phi-\Delta} = \frac{1}{2}$. На рис. 5.8 показан вид функции распределения электронов по энергетическим состояниям для $T=0$ и $T>0$.

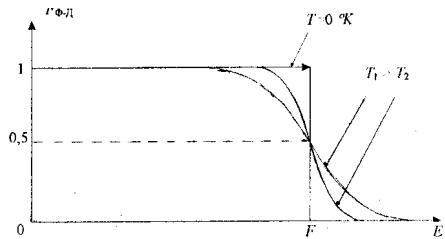


Рис. 5.8

Видно, что с повышением температуры ступенька становится более полой. Если $E-F \gg kT$, то, пренебрегая единицей в знаменателе, полу-

чим
$$f_{\phi-\Delta}(E,T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-F}{kT}\right)} = e^{\frac{F}{kT}} - e^{\frac{E}{kT}}$$

Следовательно, если $E-F \gg kT$, то функцию Ферми–Дирака можно заменить классической функцией Максвелла–Больцмана.

Расчет электропроводности металлов, выполненный на основе квантовой механики и квантовой статистики Ферми–Дирака, приводит к выражению для удельной электрической проводимости в виде: $\sigma = \frac{ne^2 \langle \lambda_F \rangle}{m \langle v_T \rangle}$, которое по внешнему виду напоминает классическую форму-

лу, но имеет совершенно другое физическое содержание. Здесь n – концентрация электронов проводимости в металле, $\langle \lambda_F \rangle$ – средняя длина свободного пробега электрона, имеющего энергию на уровне Ферми, $\langle v_T \rangle$ – средняя скорость теплового движения электрона.

Согласно классической теории $\langle v_T \rangle \propto \sqrt{T}$. В квантовой теории $\langle v_T \rangle$ от температуры не зависит, а в области выше комнатных температур $\langle \lambda_F \rangle \propto T^{-1}$, поэтому в соответствии с опытом сопротивление металлов растет пропорционально T .

Зависимость электропроводности от температуры

Температурная зависимость электропроводности проводников обусловлена двумя факторами: возрастанием интенсивности рассеивания носителей тока при повышении температуры и изменением их концентрации при нагревании проводника (рассеивание на примесях от температуры не зависит).

Поскольку $\sigma = enu$, то зависимость электропроводности от температуры $\sigma(T)$ в кристаллах может быть обусловлена температурной зависимостью: $n(T)$ и $u(T)$. Для металлов $n(T) = \text{const}$, то есть $\sigma(T) = \text{const} \cdot u(T)$.

Экспериментально установлено, что зависимость сопротивления чистых металлов от температуры ($T > 273$ К) имеет вид: $R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$, где α и β – коэффициенты, характерные для данного металла, R_0 – сопротивление металлического проводника при $t = 0$ °С; для полупроводников: $\sigma(T) = en(T) \cdot u(T)$.

Идеальная кристаллическая решетка при $T=0$ не рассеивает электронов, вследствие чего электрический ток в таком кристалле не затухает. Любое нарушение периодичности кристалла будет изменять квазиимпульс электрона и сопротивление кристалла прохождению электрического тока.

В реальных кристаллах имеются динамические несовершенства, обусловленные тепловыми колебаниями атомов решетки (фононы), статическим несовершенством (точечные дефекты, примесные атомы, дислокации, трещины, полости, включения другой фазы, границы кристалла).

Причем, между рассеянием носителей в полупроводниках и металлах нет существенной разницы.

Положение и размер энергетических зон зависят от расстояния между соседними атомами, то есть механические напряжения, обусловленные тепловыми колебаниями частиц относительно узлов кристаллической решетки, будут влиять на зонную структуру, поскольку расстояния между атомами изменяются при продольных акустических волнах, которые сжимают и растягивают кристалл. Это микроизменение объема кристалла вызывает в свою очередь волнообразное изменение дна зоны проводимости и потолка валентной зоны. На флуктуациях потенциала атомов и рассеиваются электроны.

При рассеянии носителей заряда в кристаллах на акустических колебаниях атомов решетки (фононах) подвижность задается формулой:

$$u_{\text{ак}} = \frac{\text{const}}{m^{\frac{5}{2}}} \cdot T^{\frac{3}{2}}$$

Зависимость подвижности от температуры при рассеянии на заряженных примесях:

$$u_{\text{пр}} = \frac{\text{const}}{N} \cdot T^{\frac{3}{2}}, \text{ где } N - \text{число примесных атомов.}$$

С ростом концентрации примеси подвижность $u_{\text{пр}}$ уменьшается.

В зависимости от интервала температур будет преобладать тот или другой механизм рассеяния. В первом приближении можно считать, что обратное значение подвижности при рассеянии на полях ионов и акустических фо-

нонов складываются аддитивно: $\frac{1}{u} = \frac{1}{u_{\text{ак}}} + \frac{1}{u_{\text{пр}}}$.

Для полупроводников n – типа проводимость определяется выражением $\sigma_n = e(n_n u_n + p_n u_p) = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$, где n_n и p_n концентрации электронов и дырок в полупроводнике n -типа, ΔE – энергия активации (ширина запрещенной зоны), то есть энергия, необходимая для отрыва электрона от атома (для большинства полупроводников энергия активации не превышает 1,5 эВ); k – постоянная Больцмана.

Поскольку $\sigma = \frac{1}{\rho}$, то $\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}$. Следовательно, $\rho = \rho_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right)$.

Принимая во внимание, что $R = \rho \frac{l}{S}$, $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$, получим $R = R_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right)$.

Сопротивление чистых полупроводников при $T < 500 \text{ К}$ с достаточной степенью точности может быть рассчитано по этой формуле.

Тогда отношение сопротивлений R_1 и R_2 полупроводника при двух значениях температуры T_1 и T_2 $\frac{R_1}{R_2} = \exp \frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$. Логарифмируя, получим $\ln R_1 - \ln R_2 = \frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$, откуда $\frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = \frac{\Delta E}{2k}$.

Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры можно охарактеризовать *температурным (термическим) коэффициентом сопротивления* вещества α , который равен отношению удельного сопротивления при повышении температуры на 1 К: то есть $\langle \alpha \rangle = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T}$, где $\langle \alpha \rangle$ – среднее значение температурного коэффициента сопротивления в интервале ΔT . В общем случае $\alpha = \alpha(T)$, поэтому при определенной температуре T его значение составляет:

$$\alpha = \frac{1}{\rho(T)} \frac{d\rho}{dT} = \frac{\rho'(T)}{\rho(T)}.$$

Следовательно, температурный коэффициент сопротивления при температуре T равен отношению первой производной от удельного сопротивления по температуре к удельному сопротивлению проводника при этой температуре. Этот коэффициент может быть как положительным, так и отрицательным.

В металлах концентрация свободных электронов практически не зависит от температуры, поэтому их сопротивление при повышении температуры возрастает благодаря росту интенсивности рассеивания свободных электронов на ионах кристаллической решетки, совершающих тепловые колебания, то есть для металлов $\alpha > 0$.

В полупроводниках при повышении температуры происходит изменение концентрации носителей тока и интенсивности их рассеивания на ионах и атомах кристаллической решетки, а также на дефектах структуры благодаря увеличению количества последних, причем рост концентрации свободных носителей тока превышает рост рассеивания, вследствие чего при возрастании температуры сопротивление полупроводника уменьшается. Поэтому для полупроводников $\alpha > 0$ (по крайней мере, в определенном температурном интервале).

Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры в общем случае является нелинейной. Для металлических проводников α незначительно зависит от температуры. Поэтому, если интервал изменения температуры достаточно мал, можно считать коэффициент α постоянным и равным среднему его значению внутри взятого интервала. Тогда

в первом приближении зависимость удельного сопротивления металлов от температуры можно считать линейной: $\Delta\rho = \alpha\rho\Delta T$.

В интервале температур вблизи 0°C для всех чистых металлов: $\alpha \approx \frac{1}{273}\text{K}^{-1}$. Поэтому в этом интервале $\rho = \rho_0(1 + \alpha t) = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$, где ρ_0 и ρ – удельные сопротивления при температурах 0°C ($T_0 = 273\text{K}$) и $t^\circ\text{C}$, ($T\text{ K}$), а $\Delta T = T - T_0$, соответственно.

При нагревании металлического проводника его размеры меняются незначительно. Поэтому изменение сопротивления металлических проводников обусловлено температурной зависимостью удельного сопротивления: $R = R_0(1 + \alpha t) = R_0(1 + \alpha\Delta T)$. Следовательно, $\frac{R_2}{R_1} = \frac{1 + \alpha\Delta T_2}{1 + \alpha\Delta T_1}$,

$$\text{да } \alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1\Delta T_1 - R_2\Delta T_2}.$$

В области низких температур сопротивление металлических проводников пропорционально пятой степени абсолютной температуры. Примерно для половины химически чистых металлов существует такая температура (ее называют критической T_K), при которой их сопротивление скачком падает до нуля и остается равным нулю при дальнейшем понижении температуры. Металл переходит в *сверхпроводящее состояние*. Сверхпроводниками являются более 1000 сплавов и химических соединений металлов. Согласно современным представлениям, возникновение сверхпроводимости обусловлено тем, что при температурах, близких к абсолютному нулю, вследствие взаимодействия с ионами кристаллической решетки электроны объединяются в пары. Это приводит к исчезновению сопротивления.

Температурный коэффициент сопротивления чистого полупроводника при $T < 500\text{ K}$ составляет: $\alpha = -\frac{\Delta E}{2k} \frac{1}{T^2}$

Методика измерений и обработка результатов

Лабораторная установка (рис. 5.9) состоит из сушильного шкафа СШУ 20, в который помещаются пробирки с исследуемыми образцами, приборов для измерения сопротивления образцов (мультиметр М890D) и температуры (мультиметр М890G с термопарой).

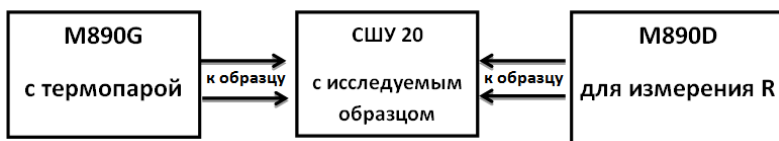


Рис. 5.9

Сушильный шкаф (рис. 5.10). представляет собой термокамеру объемом 10 л, с электронагревателем, мощность которого можно регулировать реостатом расположенном на боковой стороне шкафа. Максимальная температура в термокамере не менее 150 °С.



Рис. 5.10

Зависимость сопротивления металлического (медь) и полупроводникового (термистор) образцов от температуры изучается на приборах для измерения температурного коэффициента сопротивления.

Прибор (рис. 5.11) для определения температурного коэффициента сопротивления меди состоит из катушки 1. Катушка представляет собой картонный каркас 2, на который намотан медный изолированный провод, толщиной 0,10÷0,12 мм. При температуре $t = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ сопротивление проволоки $R \approx 80\text{ Ом}$. Концы провода выведены к зажимам 3, установленным на пластмассовой колодке 4. В этой же колодке закреплена стеклянная пробирка, в которую вставлен каркас катушки. Сверху в колодке имеется отверстие 5 для термопары (термометра), измеряющей температуру обмотки катушки.

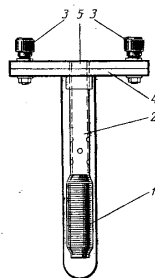


Рис. 5.11

Терморезистор ММТ-1 (рис. 5.12), состоит из спрессованной и термически обработанной смеси порошкообразных оксидов металлов. Он имеет форму цилиндрического стержня 6, длиной 12 мм и диаметром 2 мм. На концы стержня надеты металлические колпачки с выводами, а боковая поверхность покрыта слоем эмалевой краски. Выводы терморезистора припаяны к двум медным проволокам 5; концы проволок подведены к двум винтовым зажимам 1, укрепленным на пластмассовой панели 2.

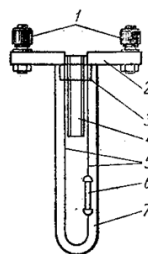


Рис. 5.12

В середине панели сделано отверстие, в которое вставлена картонная трубка 4, на верхний конец трубки надето резиновое кольцо 5, а на кольцо – стеклянная пробирка 7.

Пробирки с исследуемыми образцами помещаются в изолированный сушильный шкаф, в который вмонтирован реостат для регулировки тока нагрева. Для измерения сопротивления образцов используется мультиметр М890D или аналогичный ему, в режиме измерения сопротивления R. Температура измеряется термопарой подключенной к мультиметру М890G. Термопара вставляется в отверстие пластмассовой колодки, а к ее клеммам присоединяется прибор для измерения сопротивления.

Порядок выполнения работы

ЗАДАНИЕ 1

1. Подготовьте экспериментальную установку к работе. Включите мультиметр М890D и установите переключатель рода работы в положение «измерение сопротивления $[R]$ »; переключатель пределов измерения поставьте на значение 200 Ом при измерениях на медном образце или на значение 20 кОм при измерении сопротивления термистора.

2. **Соблюдая полярность**, подключите термопару к гнездам на передней панели мультиметра М890G, предназначенным для измерения температуры, установите переключатель рода работы в положение «измерение температуры $[^{\circ}\text{C}]$ ».

3. Включите мультиметры, измерьте температуру и сопротивление образца при комнатной температуре.

4. Включите сушильный шкаф в сеть и, передвигая подвижный контакт реостата, отрегулируйте скорость его нагревания.

5. Нагревание исследуемого образца осуществляйте в интервале температур $(20 \div 100)^{\circ}\text{C}$, измеряя его температуру и сопротивление с шагом $\Delta t = 5^{\circ}\text{C}$.

6. Результаты измерений и вычислений для медного образца запишите в табл. 1, а результаты измерений и вычислений для термистора – в табл. 2.

Таблица 1

№	T, К	R, Ом	α , K^{-1}	$\Delta\alpha$, K^{-1}
1				
			$\langle\alpha\rangle$, K^{-1}	$\langle\Delta\alpha\rangle$, K^{-1}

Таблица 2

№	T, К	R, Ом	$\ln R$	$\ln \frac{1}{T}$	ΔE , эВ	α , K^{-1}
1						
					$\langle\Delta E\rangle$, эВ	$\langle\alpha\rangle$, K^{-1}

ЗАДАНИЕ 2

1. Вычислите натуральный логарифм сопротивления R для каждого измерения и рассчитайте не менее пяти значений энергии активации (ширины запрещенной зоны) полупроводникового термистора по форму-

$$\ln R_2 - \ln R_1 = \frac{\Delta E}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

2. Постройте в логарифмическом масштабе график зависимости $\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right)$ и, убедившись, что зависимость близка к линейной проведите, аппроксимирующую прямую.

3. Вычислите угловой коэффициент наклона прямой к оси абсцисс и определите ширину запрещенной зоны ΔE .

4. Рассчитайте температурный коэффициент сопротивления термистора при нескольких значениях температуры и проверьте выполнимость теоретического соотношения: $\alpha = -\frac{\Delta E}{2k} \cdot \frac{1}{T^2}$.

5. Сформулируйте выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Что представляют собой термометры сопротивления?
2. Почему и как изменяется сопротивление а) металлов, б) полупроводников с ростом температуры?
3. Изобразите графически температурную зависимость удельного сопротивления сверхпроводящего и несверхпроводящего металлов. Объясните различие при низких температурах.
4. Изобразите графически температурную зависимость удельного сопротивления а) чистого, б) примесного полупроводника.
5. Предложите способ расчета средней скорости упорядоченного движения электронов в проводнике.
6. Приведите схему энергетических уровней электронов в кристалле и укажите на ней соответствующие зоны.
7. Выделите существенные признаки понятий: «валентная зона», «возбужденная зона», «зона проводимости».
8. Выведите выражение для расчета ширины запрещенной зоны ΔE , назовите ее единицу СИ.
9. Как создают донорные и акцепторные уровни в полупроводниках?

Лабораторная работа 6.

Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли

1. Цель работы: экспериментальное определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли, овладение методикой проведения эксперимента, анализа и оценки экспериментальных данных.

2. Приборы и оборудование: регулируемый источник постоянного тока, миллиамперметр, резистор, тангенс-гальванометр, соединительные провода.

3. Вопросы для допуска лабораторной работе

1. Назовите существенные признаки понятия «магнитное поле» и его источники.

2. Какие тела называют постоянными магнитами? Где расположены их полюса? Как взаимодействуют постоянные магниты?

3. Опишите опыт Ампера и объясните причину взаимодействия проводников с током в этом опыте.

4. Назовите физические величины, характеризующие силовое действие магнитного поля на проводник с током, запишите формулу связывающую их.

5. Дайте определения единиц индукции и напряженности магнитного поля в СИ.

6. Что называют линиями магнитной индукции? Как определить направление линий магнитной индукции проводника с током; катушки с током; постоянного магнита?

7. Почему магнитное поле называют вихревым?

8. Почему утверждение о том, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, не является бесспорным?

9. Запишите формулу для расчета индукции магнитного поля кругового тока и проанализируйте ее.

10. Назовите физический механизм, благодаря которому Земля является источником магнитного поля.

11. Что такое магнитосфера Земли и почему она защищает биосферу планеты от гибели?

12. Что вы знаете об изменении магнитного поля нашей планеты под действием «солнечного ветра»;

13. Назовите основные этапы эксперимента по определению горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

4. Основы теории

Источниками магнитного поля являются движущиеся заряженные частицы (электрические токи), частицы, обладающие магнитным моментом и переменные электрические поля.

Существование магнитного поля обнаруживается по его силовому действию на *движущиеся* частицы, обладающие электрическим зарядом (электрические токи), и на частицы, обладающие магнитным моментом, независимо от их состояния движения.

Силовой характеристикой магнитного поля является физическая векторная величина – *магнитная индукция* $\vec{B}$. Индукция $\vec{B}$ поля – зависит от формы проводника с током, создающего поле, и свойств окружающей среды.

За направление магнитной индукции принимается направление, по которому устанавливается магнитный диполь (например, стрелка компаса), помещенный в магнитное поле.

Магнитное поле Земли в первом приближении можно моделировать как поле магнитного диполя (полосового магнита), ось которого наклонена под углом $\alpha = 11,5^\circ$ к оси вращения Земли. Центр диполя смещен в Восточное полушарие от центра Земли на 430 км.

В северном полушарии линии индукции магнитного поля Земли сходятся в точке, лежащей на $75^\circ 50'$ северной широты и 96° западной долготы. Эта точка называется **Южным** магнитным полюсом Земли. В южном полушарии точка схождения линий индукции магнитного поля Земли лежит на $70^\circ 10'$ южной широты и $150^\circ 45'$ восточной долготы; она называется **Северным** магнитным полюсом Земли (рис.6.1, а).



Рис.6.1 Магнитное поле Земли

Причем точки схождения линий земного магнитного поля находятся не на поверхности Земли, а на некоторой глубине. Следовательно, магнитные полюсы Земли, не совпадают с ее географическими полюсами. Магнитная ось Земли, то есть прямая, проходящая через оба магнитных

полюса Земли, не проходит через ее центр и, таким образом, не является земным диаметром.

Поскольку магнитные и географические полюсы Земли не совпадают, то магнитная стрелка указывает направление север – юг только приблизительно. Плоскость, в которой устанавливается магнитная стрелка, называют *плоскостью магнитного меридиана* данного места, а линию, по которой эта плоскость пересекается с горизонтальной плоскостью, называют *магнитным меридианом*. Угол α между направлениями магнитного и географического меридианов называют *магнитным склонением*. Магнитное склонение изменяется от места к месту при перемещении по поверхности Земли.

Магнитное склонение называют западным или восточным в зависимости от того, к западу (*W*) или к востоку (*O*) от плоскости географического меридиана отклоняется северный полюс магнитной стрелки (рис. 6.2). Шкала измерения склонения – от 0 до 180°. Часто восточное склонение отмечают знаком «+», а западное знаком «-». Линии индукции магнитного поля Земли, не параллельны ее поверхности. Это означает, что вектор индукции магнитного поля Земли не лежит в плоскости горизонта данного места, а образует с этой плоскостью некоторый угол. Этот угол называется *магнитным наклонением* (угол φ на рис. 6.1, б). В разных местах Земли магнитное наклонение различно.

Магнитное склонение и магнитное наклонение (углы α и φ) полностью определяют направление индукции магнитного поля Земли в данном месте.

Пусть вертикальная плоскость на рис. 6.1 представляет собой плоскость магнитного меридиана данного места. Лежащий в этой плоскости вектор индукции $\vec{B}$ магнитного поля Земли мы можем разложить на две составляющие: горизонтальную B_{Γ} и вертикальную $B_{\text{в}}$. Зная угол φ (наклонение) и одну из составляющих, можно вычислить другую составляющую или сам вектор $\vec{B}$. Если, например, нам известен модуль горизонтальной составляющей B_{Γ} , то

$$B = \frac{B_{\Gamma}}{\cos \varphi}, \quad B_{\text{в}} = B_{\Gamma} \operatorname{tg} \varphi.$$

Таким образом, три величины: склонение, наклонение и числовое значение горизонтальной составляющей индукции B_{Γ} полностью характеризуют магнитное поле Земли в данном месте ее поверхности. Эти величины называют элементами магнитного поля Земли.

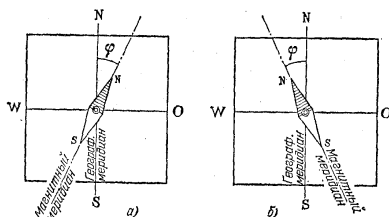


Рис. 6.2. Положение магнитной стрелки стран света: а) в местах с восточным склонением; б) в местах с западным склонением.

Магнитное поле Земли изменяется с течением времени. Исследования показывают, что период этих изменений составляет примерно 5000 лет. В течение последних 10–20 млн. лет примерно через каждые 300 000 лет, направление магнитного поля Земли менялось на противоположное. Магнитное поле Земли является неоднородным, его индукция имеет наименьшее значение вблизи экватора и наибольшее – вблизи магнитных полюсов. Среднее значение модуля индукции магнитного поля Земли вблизи ее поверхности $\langle B \rangle \approx 5$ мкТл.

В соответствии с современными научными представлениями, источником магнитного поля Земли являются токи, которые возникают при движении заряженных частиц в жидком электропроводном ядре Земли (теория гидромагнитного динамо). Земное ядро имеет средний радиус (около 3,5 тыс. км) и делится на внешнее ядро и субъядро с радиусом около 1,3 тыс. км. Их разделяет переходная зона толщиной около 300 км, которую относят обычно к внешнему ядру (рис. 6.3). На границе ядра наблюдается скачкообразное падение скорости продольных волн (от 13,6 до $8,1 \frac{\text{км}}{\text{с}}$).

Внутри ядра скорость возрастает, увеличиваясь скачком вблизи границы субъядра до $11,2 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. В субъядре сейсмические волны распространяются почти с неизменной скоростью. Внешнее ядро находится в жидком (расплавленном) состоянии, поскольку **поперечные сейсмические волны, не способные распространяться в жидкости, через него не проходят.** Субъядро состоит из вещества в твердом состоянии (продольные волны, подходя к границе субъядра, возбуждают в нем поперечные волны).

Область космического пространства вокруг Земли, физические свойства которой определяются магнитным полем Земли и его взаимодействием с заряженными частицами космического происхождения, называют магнитосферой. Заряженные частицы, попадающие в магнитное поле Земли, образуют радиационные пояса Земли. В них магнитное поле удерживает протоны, электроны и α -частицы, испускаемые Солнцем. Выходу заряженных частиц из радиационных поясов Земли мешает конфигурация

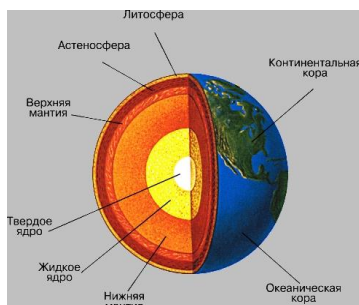


Рис. 6.3

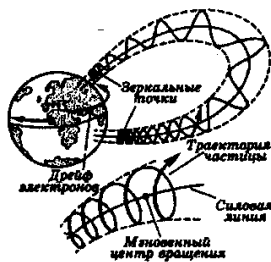


Рис. 6.4

линий индукции магнитного поля Земли, которое является магнитной ловушкой для этих частиц. Под действием силы Лоренца, заряженные частицы, движутся по спиральным траекториям из северного в южное полушарие и обратно, одновременно перемещаясь в восточном (отрицательно заряженные частицы) или западном (положительно заряженные частицы) направлениях (рис. 6.5). Если частица движется по спирали в сторону возрастания магнитного поля (приближается к Земле), радиус и шаг спирали уменьшаются. Модуль скорости частицы в процессе движения остается постоянным, а угол между векторами $\vec{v}$ и $\vec{B}$ приближается к 90° . В некоторой точке траектории происходит «отражение» и частица начинает двигаться в обратном направлении к сопряженной точке во втором полушарии. В зависимости от энергии частицы делают полный оборот вокруг Земли за промежуток времени от нескольких минут до нескольких суток.

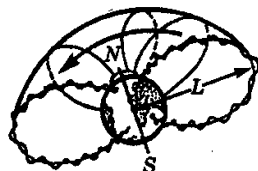


Рис. 6.5

Движение частицы по спирали можно представить как одновременное движение этой частицы вокруг мгновенного центра вращения и ее перемещение вдоль линии индукции магнитного поля. При движении частицы в магнитном поле Земли мгновенный центр вращения описывает в пространстве некоторую поверхность, которую называют *магнитной оболочкой*.

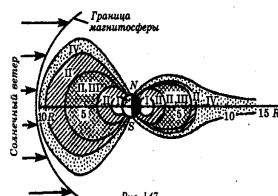


Рис. 6.6

Магнитная оболочка характеризуется параметром L , который примерно равен расстоянию между центром Земли и точками оболочки в плоскости экватора (рис. 6.6).

Обычно выделяют внутренний *I* и внешний *III* радиационные пояса Земли, пояс протонов малых энергий (пояс кольцевого тока) *II* и зону квазизахвата частиц *IV* (рис. 6.7).

Внутренний радиационный пояс Земли пояс располагается в экваториальных широтах. С внешней стороны он ограничен магнитной оболочкой, для которой $L \sim 2$. Эта оболочка пересекает поверхность Земли на широте 45° . Наименьшее расстояние между внутренним поясом и поверхностью Земли – вблизи Бразильской магнитной аномалии. Здесь он находится на высоте 200–300 км над поверхностью.

Внешний радиационный пояс заключен между магнитными оболочками, для которых $3 < L < 6$. Наибольшая плотность частиц в этом поясе на оболочке, для которой L соответствует $\sim 4,5$. Этот пояс удерживает

электроны с энергиями 40–100 кэВ. Среднее время жизни электронов в этом поясе составляет $\langle \tau \rangle \sim (0,1-10) \text{ Мс}$.

Пояс протонов с малыми энергиями (0,03–10 МэВ) находится в пределах магнитных оболочек, для которых $1,5 \leq L \leq 8$.

Зона квазизхвата находится за внешним радиационным поясом. Структура этой зоны очень сложная, что обусловлено деформацией магнитосферы Земли в результате воздействия на нее солнечного ветра (заряженных частиц, которые излучает Солнце в космическое пространство). Эта зона в основном удерживает электроны и протоны с энергиями меньше, чем 100 кэВ. Проникновение частиц солнечного ветра в радиационные пояса Земли возможно только через отдельные точки магнитосферы (эти точки называют дневными полярными каспами) и через нейтральный слой в хвосте магнитосферы с ее ночной стороны (рис. 6.8).

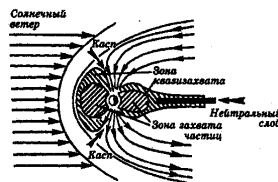


Рис. 6.8

5. Методика измерений и обработка результатов

Для определения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли используется тангенс-гальванометр (рис. 6.9). Он представляет собой магнитную стрелку со шкалой (компас), расположенный в центре короткого цилиндра (катушки), состоящего из вертикальных проволочных круговых витков. При отсутствии тока в витках соленоида, магнитная стрелка тангенс-гальванометра (под действием магнитного поля Земли) установится в плоскости магнитного меридиана практически горизонтально, поскольку она удерживается вертикальной осью компаса.

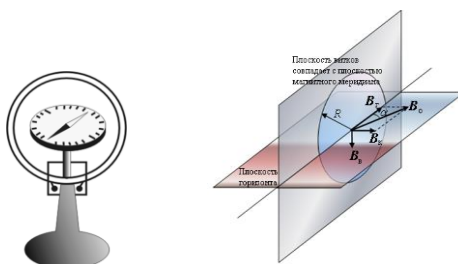


Рис. 6.9. Тангенс-гальванометр

Если плоскость витков катушки тангенс-гальванометра совместить с плоскостью магнитного меридиана, а затем пропустить через витки постоянный ток I , то на магнитную стрелку, кроме магнитного поля Земли, будет действовать и магнитное поле катушки, направленное перпендику-

лярно плоскости витков. Модуль индукции магнитного поля катушки $B_{\varphi} = \frac{\mu_0 n I}{2R} = \frac{\mu_0 n I}{D}$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная, n – число витков, R – радиус витков, $D = 2R$ диаметр витка).

В соответствии с принципом суперпозиции поле Земли и поле рамки складываются, а направление результирующего поля определяется по стрелке компаса, помещенного внутрь рамки, то есть магнитная стрелка, установится по направлению вектора $\vec{B}_0 = \vec{B}_r + \vec{B}_k$, отклонившись от плоскости магнитного меридиана на угол α . Из рис. 6.9 видно, что

$$B_r = B_k \operatorname{ctg} \alpha = \frac{\mu_0 n I}{D \operatorname{tg} \alpha}.$$

На результаты измерения угла отклонения стрелки влияет ряд таких факторов, как точность начальной установки рамки и шкалы, неоднородность поля внутри рамки и т. д., поэтому рекомендуется сделать серию измерений и провести статистический анализ данных.

ЗАДАНИЕ 1. Подготовка к измерениям

1. Перемещая компас вдоль рабочего стола, определите место с наименьшими паразитными магнитными полями, создаваемыми приборами, деталями стола и т. д.

2. Установите плоскость витков катушки вдоль магнитной стрелки и поверните шкалу компаса так, чтобы стрелка показывала на 0.

3. Подключите один провод (желтый) катушки к положительному «+» полюсу источника тока, а второй (зеленый) – к отрицательному «-».

4. По правилу буравчика (правой руки) определите направление вектора магнитной индукции катушки с током (направление тока при соблюдении полярности подключения указано на корпусе катушки) и определите, в какую сторону должна повернуться стрелка компаса.

5. Переключатель миллиамперметра установите в положение 150 мА.

6. Тумблер на панели источника постоянного тока установите в положение 3–15 В.

7. Микроамперметр подключите к выводам катушки.

8. Измерьте диаметр витков катушки и запишите в тетрадь данные о количестве витков (число витков в катушке **$n=50$** ; радиус витков **$R=0,10$ м**).

9. Подготовьте таблицу для записи экспериментальных данных.

ЗАДАНИЕ 2. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

1. Проверьте правильность сборки электрической цепи лабораторной установки (рис. 6.10), пределов регулировки напряжения и измерения силы тока.

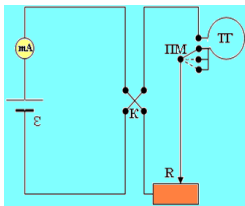


Рис. 6.10. Принципиальная схема и общий вид лабораторной установки. $\mathcal{E}$ – источник постоянного тока, mA – миллиамперметр, K – переключатель направления тока в витках, TГ – витки тангенс-гальванометра, ПМ – перемычка для выбора количества витков (перемычка ПМ на измерительной установке может отсутствовать), R – добавочное сопротивление.

2. Подключите источник постоянного тока к сети, регулятор выходного напряжения поверните в крайнее левое положение и включите источник питания.

3. Замкните переключатель «К» (двойной ключ) в любом из 2-х его возможных положений и измерьте силу тока в катушке тангенс-гальванометра.

4. Измерьте угол α_1 отклонения магнитной стрелки при заданном значении силы тока в катушке.

5. Измените, направление тока в катушке с помощью двойного ключа «К», при том же значении силы тока и измерьте угол α_2 отклонения магнитной стрелки.

6. Повторите измерения при других значениях силы тока с шагом, соответствующим одному делению шкалы компаса тангенс-гальванометра.

7. Определите среднее значение угла отклонения магнитной стрелки для каждого значения силы тока $\langle \alpha \rangle = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$.

8. Рассчитайте горизонтальную составляющую индукции магнитного поля B_H для каждого значения угла $\langle \alpha \rangle$.

9. Найдите среднее значение $\langle B_H \rangle$, среднюю абсолютную погрешность ΔB_H и относительную погрешность $\langle \delta B_H \rangle$.

10. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

№ измерения	n	I , мА	α , град		B_r , Тл	ΔB_r , Тл	$(B_r \pm \Delta B_r)$, Тл
1.			$\alpha_1 =$	$\langle \alpha \rangle =$			
			$\alpha_2 =$				
2.			$\alpha_1 =$	$\langle \alpha \rangle =$			
			$\alpha_2 =$				
				$\langle \alpha \rangle =$			
							
5.			$\alpha_1 =$	$\langle \alpha \rangle =$			
			$\alpha_2 =$				
Среднее							

ЗАДАНИЕ 3

1. Вычислите $\operatorname{tg} \langle \alpha \rangle$ для каждого значения угла $\langle \alpha \rangle$.
2. На миллиметровой бумаге нанесите точки, откладывая по оси ОУ значения $\operatorname{tg} \langle \alpha \rangle$, а по оси ОХ — соответствующие значения силы тока I .
3. Постройте график зависимости тангенса угла $\langle \alpha \rangle$ от силы тока в витках катушки тангенс-гальванометра: $\operatorname{tg} \langle \alpha \rangle = f(I)$.
4. Погрешности измерений для каждой точки отложите в виде крестиков.
5. Убедитесь в том, что построенный график аналитически можно описать уравнением: $\operatorname{tg} \langle \alpha \rangle = kI + b$.
6. По данным, приведенным на графике, найдите значение k и вычислите $\langle B_r \rangle$.
7. Вычислите погрешность определения k , и погрешность определения $\langle B_r \rangle$ (см. пособие по обработке данных).
8. *Примечание:* для обработки данных используйте программу Grapher или Excel.
9. Проанализируйте результаты и сформулируйте выводы.

Вопросы и задания для самоконтроля:

1. Назовите существенные признаки понятий «индукция и напряженность магнитного поля».
2. Сформулируйте принцип суперпозиции для магнитного поля.
3. Дайте определение циркуляции напряженности магнитного поля.

4. Запишите формулу, являющуюся аналитическим выражением закона полного тока.

5. Запишите формулу для расчета модуля индукции магнитного поля:

а) прямолинейного проводника с током;

б) на оси кругового витка (контура) с током: соленоида с током.

6. Какую форму имеет линия индукции, проходящая через центр кругового витка с током?

7. Запишите закон Био–Савара–Лапласа. Находите ли Вы в нем сходство с законом Кулона?

8. Как выглядят линии индукции магнитного поля прямого провода с током?

9. Охарактеризуйте магнитное поле Земли.

10. Роль магнитного поля Земли для всего живого на планете.

11. Что Вы знаете о магнитосфере и изменении магнитного поля нашей планеты под действием «солнечного ветра».

12. Как, используя тангенс-гальванометр, определить индукцию магнитного поля Земли?

13. Вертикально стоящие железные оконные решетки с течением времени намагничиваются. Объясните это явление.

14. В книге одного из первых исследователей земного магнетизма Джильберта описан следующий опыт. Если бить молотком по железной полосе, расположенной с севера на юг, то полоса намагнитится. Объясните это явление. Укажите, как будут расположены северный и южный полюсы на намагнитившейся таким образом полосе?

15. Самопроизвольное намагничивание железных предметов в магнитном поле Земли было использовано для устройства магнитных мин, которые устанавливаются на некоторой глубине под поверхностью воды и взрываются при прохождении над ними корабля. Механизм, заставляющий мину всплывать и взрываться, приходит в действие, когда магнитная стрелка, вращающаяся вокруг горизонтальной оси, поворачивается под влиянием магнитного поля проходящего над миной железного корабля, который всегда оказывается самопроизвольно намагниченным. Предложите способы борьбы с магнитными минами.

Лабораторная работа 7.

Изучение основных параметров полупроводниковых диодов

Цель работы: экспериментально исследовать зависимость силы тока через полупроводниковый диод, овладеть методикой измерений силы тока при прямом и обратном включении диода в электрическую цепь.

Приборы и оборудование: диод полупроводниковый на колодке; источник электропитания для практикума ИЭПП-1 и батарея аккумуляторов 3-НКН-10 — 2 шт.; миллиамперметр постоянного тока М45М; вольтметр постоянного тока М45М; реостат ползунковый РПШ-2; ключ; комплект проводов соединительных.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Объясните механизм примесной проводимости полупроводников.
2. При каком условии в примесном полупроводнике возникает электронная проводимость? Приведите примеры.
3. При каком условии в примесном полупроводнике возникает дырочная проводимость? Приведите примеры.
4. Какой проводимостью будет обладать германий при введении в него небольшого количества алюминия? мышьяка?
5. Как влияет на проводимость металлических проводников, полупроводников и диэлектриков наличие в них небольшого количества примесей?
6. Объясните, как образуется n - p -переход.
7. Можно ли получить n - p -переход сплавлением алюминия в индий? Почему?

Основы теории

Проводимость, обусловленная наличием примесей в полупроводнике, называется примесной проводимостью полупроводника. Примеси, создающие в полупроводниках свободные электроны без возникновения равного им количества дырок, называют донорными. Полупроводники, содержащие донорные примеси, называют электронными полупроводниками или полупроводниками n -типа. Примеси, наличие которых в кристалле полупроводника приводит к образованию дырок, называют акцепторными. Полупроводники, содержащие акцепторные примеси, называют дырочными полупроводниками или полупроводниками p -типа.

Широкое использование полупроводников в современной радиоэлектронике связано с эффектами, возникающими при контакте полупроводников n - и p -типов. В зоне контакта полупроводников с разными типами примесной проводимости образуется тонкий слой, который обладает

односторонней проводимостью и называется *электронно-дырочным переходом* или *n - p -переходом*. Это свойство n - p -перехода используется при изготовлении полупроводниковых диодов.

Электронно-дырочный переход. Рассмотрим полупроводник, одна часть которого содержит донорную примесь и поэтому является полупроводником n - типа, а вторая – акцепторную примесь и является полупроводником p - типа.

Вследствие того что концентрация электронов в n -области значительно выше, чем в p -области, а соответственно, и концентрация дырок в p -области значительно больше, чем в n -области, через границу раздела происходит диффузия электронов из n - в p -область и диффузия дырок из p - в n -область. Диффундирующие через n – p - переход во встречных направлениях дырки и электроны рекомбинируют друг с другом. Поэтому n - p -переход оказывается сильно обедненным носителями тока и приобретает большое сопротивление. Одновременно на границе между n - и p - областями возникает двойной электрический слой, образованный отрицательно заряженными ионами, возникшими в результате захвата электронов атомами примеси, заряд которых не скомпенсирован в p -области, и положительно заряженными ионами примеси, заряд которых не компенсируется электронами в n -области. Электрическое поле в этом слое направлено так, что оно противодействует дальнейшему переходу основных носителей тока через границу раздела. Иначе говоря, в зоне перехода между полупроводниками n - и p -типов образуется *запирающий слой* (рис. 7.1).

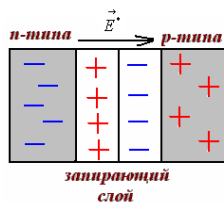


Рис. 7.1

Соберем электрическую цепь, состоящую из источника тока, лампочки и полупроводника с n - p -переходом. При этом положительный полюс источника тока подключим к p -области, а отрицательный – к n -области (рис. 7.2). При замыкании цепи лампочка светится, то есть по цепи проходит электрический ток.

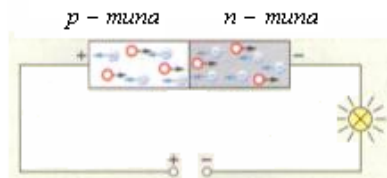


Рис. 7.2

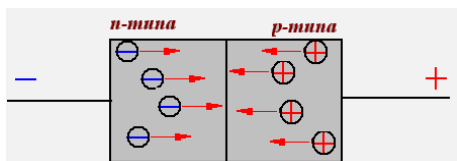


Рис. 7.3

Это обусловлено тем, что под действием электрического поля, созданного источником, запирающий слой начнет исчезать, поскольку напряженность $\vec{E}$ внешнего электрического поля источника противоположна по направлению напряженности $\vec{E}^*$ поля запирающего слоя, и практически полностью компенсирует ее. Это приводит к возобновлению диффузии основных носителей заряда через n - p -переход: из области n в область p -электронов, а из области p в область n -дырок. При этом толщина n - p -перехода уменьшается, следовательно, уменьшается его сопротивление (рис. 7.3). В этом случае n - p -переход включен в прямом (пропускном) направлении.

Вольт-амперная характеристика прямого перехода представлена участком OB на рисунке 7.4.

Если изменить полярность включения источника тока (рис. 7.5). При замыкании цепи лампочка не светится, то есть электрического тока в цепи нет.

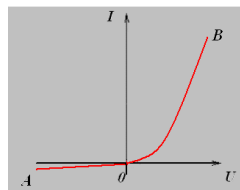


Рис. 7.4

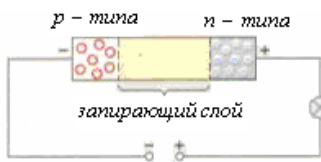


Рис. 7.5

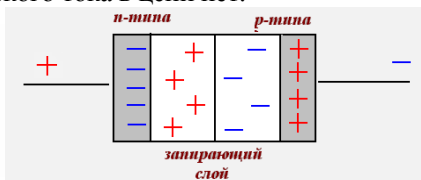


Рис. 7.6

Причина в том, что толщина запирающего слоя и, следовательно, его сопротивление увеличиваются, так как направление напряженности $\vec{E}$ электрического поля, созданного источником, совпадает с направлением напряженности $\vec{E}^*$ поля запирающего слоя. В этом случае n - p -переход включен в обратном (запирающем) направлении (рис. 7.6) и ток через n - p -переход практически равен нулю (если не учитывать ток, созданный неосновными носителями, концентрация которых мала по сравнению с концентрацией основных носителей тока). Вольт-амперная характеристика обратного перехода представлена на рис. 4 (участок OA). Таким образом, n - p -переход в полупроводнике обладает односторонней проводимостью.

Сила тока I через n - p -переход зависит от температуры перехода T и напряжения U , приложенного к нему. Ее можно определить по формуле: $I = I_0(e^{\frac{eU}{kT}} - 1)$, где I_0 – максимальная сила тока, создаваемого не-

основными носителями тока; e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана.

Свойство односторонней проводимости n – p -перехода используется при изготовлении полупроводниковых диодов. Для получения n – p -перехода берется, например, кристалл германия с донорной примесью. Такой кристалл обладает электронной проводимостью (или проводимостью n -типа). Если в одну из поверхностей кристалла германия вплавить индий, то в поверхностном слое германия образуется область с проводимостью p -типа. Это объясняется результатом диффузии атомов индия в глубь кристалла германия. Та часть кристалла, в которую атомы индия не проникли, по-прежнему имеет проводимость n -типа. Между двумя областями с проводимостями разных типов возникает n – p -переход (рис. 7.7). В полупроводниковом диоде германий служит катодом, а индий – анодом. Схематическое обозначение диода приведено на рис. 7.8.

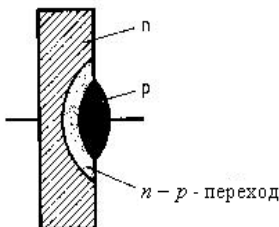


Рис. 7.7



Рис. 7.8



Рис. 7.9

Для защиты от внешних воздействий кристалл германия помещают в герметичный металлический или стеклянный корпус (рис. 7. 9).

Полупроводниковые диоды имеют высокий коэффициент полезного действия, они долговечны и миниатюрны по размерам. К недостаткам полупроводниковых диодов относится то, что они могут работать в ограниченном интервале температур (от - 70 °С до 125 °С).

Полупроводниковые диоды являются основными элементами выпрямителей переменного тока и детекторов электромагнитных сигналов.

С помощью полупроводниковых диодов можно осуществить непосредственное превращение энергии электромагнитного излучения в электрическую энергию. Такие диоды называют фотодиодами (рис. 7.10).

Если к выводам фотодиода подключить, например, резистор, то в электрической цепи по-

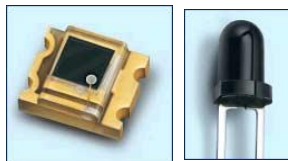


Рис. 7.11

явится электрический ток, созданный неосновными носителями тока, возникающими под действием излучения, падающего на фотодиод, вследствие их диффузии через n - p -переход. В данном режиме фотодиод работает как источник тока. Причем, электрический ток, проходящий через фотодиод, линейно зависит от интенсивности падающего на него света. В данном режиме фотодиод работает как источник тока (солнечная батарея).

Если к фотодиоду приложить запирающее напряжение и направить на него электромагнитное излучение, то через диод будет проходить обратный ток. Сила этого тока изменяется прямо пропорционально интенсивности излучения, падающего на диод (рис. 7.11). В таком режиме фотодиод работает как *фоторезистор* и его можно использовать для управления током в электрической цепи. Фотодиоды применяются в измерительной технике, системах автоматики.

Светоизлучающий диод (светодиод) представляет собой миниатюрный полупроводниковый диод, помещенный в прозрачный корпус (рис. 7.12). Излучение света происходит при рекомбинации электронов и дырок, которые под действием электрического поля, созданного источником тока, проходят через n -

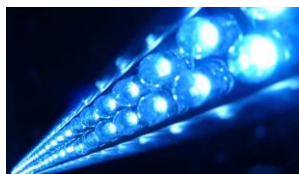


Рис. 7.13

p -переход, включенный в пропускном направлении («плюс» источника тока подключен к p -, а «минус» – к n -области диода). Излучение света таким диодом происходит при восстановлении ковалентной связи в кристалле полупроводника. Используя светодиоды, изготавливают, например,



Рис. 7.12

светодиодные светильники (рис. 7.13).

Вольт-амперные характеристики (зависимость силы тока от напряжения) германиевого и кремниевого диодов приведены на рис. 7.14.

Коэффициентом выпрямления k диода называют отношение значения силы прямого тока $I_{пр}$ к значению силы обратного тока $I_{обр}$, измеренные при одинаковых значениях пря-

мого и обратного напряжения $k = \frac{I_{пр}}{I_{обр}}$.

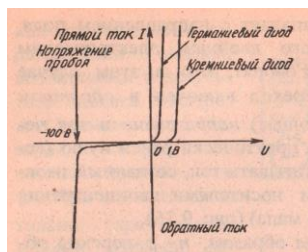


Рис. 7.14

Методика измерений и обработка результатов

Работу выполняют с полупроводниковым диодом Д 226, или аналогичным ему. Основная деталь его — монокристаллическая пластинка германия 5 (рис. 7.15), к одной из сторон которой приварена капля индия 4. В результате в пластинке, имеющей сначала лишь электронную проводимость, получились две разграниченные области с электронной (n) и дырочной (p) проводимостями. На границе этих областей образовался электронно-дырочный переход ($n - p$), обладающий односторонней проводимостью для электрического тока.

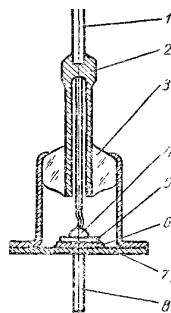


Рис. 7.15

Пластинка германия припаяна оловом 6 к основанию металлического корпуса 7, который защищает кристалл от внешних воздействий. Один контактный выход 8 соединен с пластинкой германия, второй контактный выход 1 — с каплей индия. Он проходит в металлической трубке 2, вплавленной в стеклянный изолятор 3. Выводы диода подведены на панели к двум зажимам, которые обозначены знаками «+» и «-».

При отсутствии внешнего электрического поля через электронно-дырочный переход диода взаимно диффундируют основные носители заряда: электроны из n -германия диффундируют в p -германий, а дырки из p -германия переходят в n -германий. В результате по обе стороны от границы раздела двух полупроводников образуются объемные заряды различных знаков, а вместе с этим и электрическое поле. Это поле препятствует диффузии основных носителей заряда и поддерживает обратное движение неосновных носителей заряда, то есть перемещает дырки из n -области в p -область, а электроны из p -области перемещает обратно в n -область.

При встречном движении электронов и дырок часть из них рекомбинирует, в результате в $n-p$ -переходе образуется слой толщиной 10^{-4} – 10^{-5} см, обедненный подвижными носителями заряда. Этот слой называют запирающим слоем. Несмотря на малую толщину, запирающий слой составляет главную часть сопротивления диода.

При отсутствии внешнего электрического поля токи, образованные движением основных и неосновных носителей заряда, равны по абсолютной величине, но противоположны по направлению, поэтому сила тока через **переход равна нулю**.

При действии на диод внешнего электрического поля, направленного от дырочного полупроводника к электронному, электрическое поле перехода $n - p$ слабеет, основные носители зарядов движутся к границе раздела двух полупроводников, толщина и сопротивление запирающего слоя уменьшаются, в результате чего диффузионный ток основных носителей заряда возрастает, и общая сила тока через переход стано-

вится отличной от нуля. Ток, образованный движением основных носителей заряда и направленный от дырочного полупроводника к электронному, называют прямым током диода.

С изменением полярности приложенного напряжения электрическое поле *n-p*-перехода возрастает и диффузионное движение основных носителей заряда через переход прекращается: электрическое поле удаляет основные носители зарядов из пограничных слоев в глубь электронной и дырочной областей. Поэтому толщина запирающего слоя увеличивается, а его сопротивление возрастает. Однако и в этом случае через диод, проходит небольшой ток, который создается движением неосновных носителей заряда. Этот ток направлен от электронного полупроводника к дырочному и называется обратным током диода. В зависимости от направления тока в диоде приложенное к нему напряжение, а также сопротивление диода называют прямым или обратным.

В данной работе исследуются зависимости силы прямого и обратного токов диода от приложенного к нему напряжения. Необходимо построить график этой зависимости и вычислить коэффициент выпрямления *k* диода.

Порядок выполнения работы

ЗАДАНИЕ 1. Исследуйте зависимость силы прямого тока от напряжения, приложенного к диоду.

1. Соберите электрическую цепь по схеме, показанной на рисунке 7.16. Диод включите в пропускном направлении, обратив внимание на знаки «+» и «-», указанные на его панели. Источником тока в этих измерениях служит один аккумулятор из батареи 3-НКН-10. Напряжение на диод подают с потенциометра и измеряют вольтметром со шкалой 3 В, силу прямого тока диода измеряют миллиамперметром, включенным вначале со шкалой 7,5 мА, а затем со шкалами 15 и 30 мА.

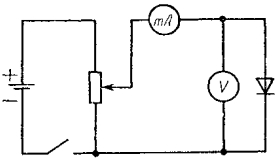


Рис. 7.16

2. Увеличивая напряжение на диоде от $U_0 = 0$ до $U = 0,8$ В, измерьте соответствующие значения силы тока и напряжения.

3. Результаты измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

<i>U</i> , В													
<i>I</i> , мА													

Предупреждение. Сила прямого тока диода не должна превышать 300 мА, иначе диод выйдет из строя.

ЗАДАНИЕ 2. Исследуйте зависимость силы обратного тока от приложенного к диоду напряжения.

1. Соберите электрическую цепь по новой схеме, изображенной на рис. 7.17, обратите внимание на отличие включения диода и вольтметра. Напряжение на диод подают с потенциометра тока, подключенного к источнику, и измеряют вольтметром по шкале 15 В. Силу тока – миллиамперметром со шкалой 1,5 мА.

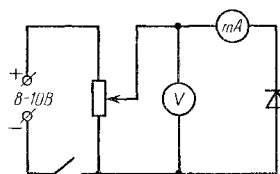


Рис. 7.17

2. Плавно увеличивая обратное напряжение на диоде измерьте силу обратного тока диода при значениях напряжения $U = 0,2 \text{ В}, 0,4 \text{ В}, 0,6 \text{ В}, 0,8 \text{ В}, 1 \text{ В}, 1,2 \text{ В}$.

3. Результаты измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

$U, \text{В}$													
$I, \text{мА}$													

4. По экспериментальным данным постройте график зависимости силы тока от приложенного напряжения. Силу прямого тока и прямое напряжение считайте положительными, а их обратные значения — отрицательными. По оси абсцисс отложите напряжение в вольтах, а по оси ординат — силу тока в миллиамперах. Масштаб для прямого напряжения: 1 см — 0,1 В, для обратного: 1 см — 1 В. Масштаб для силы прямого тока: 1 см — 2 мА, для обратного: 1 см — 0,2 мА.

5. Определите коэффициент выпрямления k диода при напряжении $U_1 = 0,2 \text{ В}, U_2 = 0,4 \text{ В}, U_3 = 0,8 \text{ В}$.

6. Проанализируйте полученные результаты и сформулируйте выводы.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Почему при измерении силы прямого тока в диоде все соединения в электрической цепи должны иметь хорошие контакты?

2. Почему опасно подавать прямое напряжение на диод более 0,5 В?

3. Почему длительное прохождение прямого тока изменяет сопротивление диода?

4. Зачем изменяют схему включения приборов, когда измеряют силы прямого и обратного токов в диоде?

5. На каком участке вольт-амперной характеристики сопротивление диода остается почти постоянным?

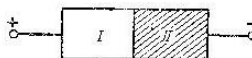


Рис. 7.18

6. Определите тип проводимости полупроводников I и II на рис. 7.18, если диод включен в обратном направлении.

7. На рис. 7.19 а), б) изображены n – p -переходы двух диодов и направления движения основных носителей электрических зарядов. Определите, через какой из диодов проходит электрический ток? Почему?

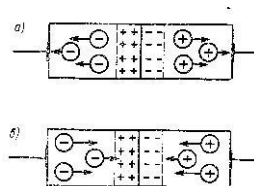


Рис. 7.19

Лабораторная работа 8.

Изучение закона Ома для цепей переменного тока

Цель работы: Экспериментально проверить закон Ома для последовательной RLC-цепи переменного тока, овладеть методикой работы с осциллографом и звуковым генератором при определении физических характеристик переменного тока

Приборы и оборудование: звуковой генератор, осциллограф, резистор, конденсатор, катушка индуктивности, набор цифровых электроизмерительных приборов переменного тока, соединительные провода.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Какое значение силы переменного тока называют действующим?
2. Какова связь между действующим и амплитудным значениями напряжения переменного синусоидального тока?
3. Почему в цепях переменного тока мгновенные значения силы тока и напряжения не совпадают по фазе?
4. Назовите основные физические характеристики участка цепи переменного тока.
5. Сформулируйте закон Ома для участка цепи переменного тока.
6. Как определить сдвиг фаз между током и напряжением в цепи переменного тока?
7. Почему конденсатор и катушка индуктивности оказывают сопротивление переменному току?

Основы теории

Переменным током называют ток, сила, направление и напряжение которого периодически меняются. Он представляет собой вынужденные электромагнитные колебания, происходящие в электрической цепи под действием периодически изменяющейся внешней ЭДС. Если внешняя ЭДС изменяется с течением времени по гармоническому закону, пере-

менный ток называют синусоидальным. Источник такой ЭДС – генератор переменного тока. Периодом переменного тока называется наименьший промежуток времени, в течение которого напряжение и сила тока выполняют одно полное колебание. Частотой переменного тока называется число периодов переменного тока за секунду, то есть частота – величина, обратная периоду.

Согласно закону электромагнитной индукции, мгновенное значение ЭДС индукции, возникающей в рамке площадью S , которая равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией B вокруг оси, расположенной в плоскости рамки и перпендикулярной к вектору индукции магнитного поля, с угловой скоростью ω , равно первой производной магнитного потока, пронизывающего рамку,

по времени: $\mathcal{E}_i = -\Phi'(\Delta t)$. Так как

$\Phi = BS \cos \alpha$, где $\alpha = \omega t$ — угол между направлением поля и нормалью к плоскости рамки, то

$\mathcal{E}_i = -(BS \cos \omega t)' = BS\omega \sin \omega t$. Макси-

мальное (амплитудное) значение ЭДС индукции $\mathcal{E}_0 = BS\omega$. Значит, $\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$.

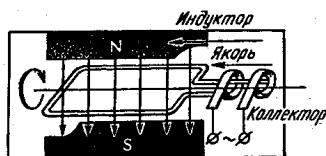


Рис. 8.1

Таким образом, ЭДС индукции в рамке изменяется во времени по гармоническому закону. Рамка, вращающаяся в магнитном поле, представляет собой простейший генератор переменного тока. Промышленный генератор переменного тока состоит из трех основных частей — индуктора, якоря и коллектора. Индуктором является постоянный магнит или электромагнит, создающий магнитное поле. Якорь — это обмотка, в которой индуцируется ЭДС. С помощью коллектора, который в простейшем случае состоит из контактных колец и скользящих по ним щеток, выводы обмотки якоря соединяются с электрической цепью (рис. 8.1).

Неподвижная часть генератора называется статором, а подвижная — ротором. В маломощных генераторах статором является индуктор, а ротором — якорь; в мощных — наоборот.

Если к генератору подключить внешнюю электрическую цепь, сопротивление которой значительно больше сопротивления обмотки якоря, то напряжение на зажимах этой цепи будет равно ЭДС индукции, возникающей в якоре. Поэтому $U = \mathcal{E}$, $U = U_0 \sin \omega t$, то есть напряжение в цепи также изменяется по гармоническому закону. При изменении напряжения с частотой ω напряжение поля в цепи, а значит и ток в ней изменяются с той же частотой, то есть $I = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$, где I_0 — максимальное значение силы тока в цепи; φ_0 — сдвиг фаз между током

и напряжением в цепи (φ_0 зависит от того, какие элементы входят в состав цепи).

Резистор в цепи переменного тока

Простейшей цепью переменного тока является цепь, содержащая только резистор сопротивления R (рис. 8.2). При синусоидальном переменном напряжении на зажимах цепи, если $U = U_0 \sin \omega t$, то и ток в ней будет синусоидальным, так как, согласно закону Ома, $I = U/R = U_0 \sin \omega t / R = I_0 \sin \omega t$. Причем ток и напряжение в цепи в этом случае совпадают по фазе (рис. 8.3).

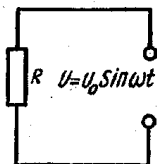


Рис. 8.2

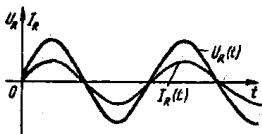


Рис. 8.3

В цепи происходит превращение работы тока только во внутреннюю энергию проводника. Поэтому мгновенная мощность, потребляемая цепью, $P = IU = I^2 R = I_0^2 R \sin^2 \omega t$, где $P_0 = I_0^2 R$ — максимальная мощность (рис. 8.4).

Средняя мощность равна отношению работы тока ко времени. Пусть $t = T$, тогда

$$\langle P \rangle = \frac{A}{T} = \langle I_0^2 R \sin^2 \omega T \rangle = I_0^2 R \langle \sin^2 \omega T \rangle. \quad \text{Если}$$

учесть, что $\langle \sin^2 \omega T \rangle = \frac{1}{2}$, полу-

чим $\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_0^2 R$. Сравнивая эту формулу с

формулой для расчета мощности в цепи постоянного тока: $P_0 = I_0^2 R$,

получаем $I^2 = \frac{I_0^2}{2}$.

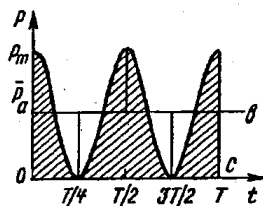


Рис. 8.4

Действующим значением переменного тока называют такое значение постоянного тока, который по своему тепловому действию эквивалентен переменному. По закону Джоуля — Ленца тепловая мощность в цепи постоянного тока $P = I_n^2 R$, а в цепи переменного тока

$\langle P \rangle = \frac{I_0^2 R}{2} = I_a^2 R$. Так как $P_{\Pi} = \langle P \rangle$, то действующее значение силы тока в цепи переменного тока связано с его максимальным значением отношением: $I_d = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0,707 I_0$. Аналогично: $U_d = \frac{U_0}{\sqrt{2}} = 0,707 U_0$.

Сопротивление участка цепи переменного тока (резистора), в котором происходит превращение электрической энергии только во внутреннюю энергию участка, называют *активным или омическим сопротивлением*.

При небольшой частоте переменного тока активное сопротивление не зависит от нее и совпадает с сопротивлением проводника (резистора) в цепи постоянного тока.

Конденсатор в цепи переменного тока

Если конденсатор включен в цепь переменного тока с напряжением $U = U_0 \sin \omega t$ (рис. 8.5), то мгновенное значение заряда на его обкладках $q = CU = CU_0 \sin \omega t$. В результате периодической перезарядки конденсатора в цепи возникает переменный электрический ток, мгновенное значение которого равно первой производной заряда по времени: $I = q'(t) = CU'(t) = CU_0 \omega \cos \omega t$ или $I = I_0 \sin(\omega t + \pi/2)$, где $I_0 = CU_0 \omega$ — максимальное значение силы тока в цепи. Следовательно, в цепи переменного тока с конденсатором ток опережает напряжение по фазе на $\pi/2$ (рис. 8.6).

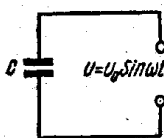


Рис. 8.5

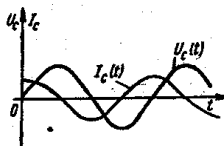


Рис. 8.6

Согласно закону Ома, $I_0 = \frac{U_0}{X_C}$ или $I_d = \frac{U_d}{X_C}$. Величину $X_C = \frac{1}{\omega C}$ называют *емкостным сопротивлением*.

Причина сдвига фаз между током и напряжением в цепи переменного тока с конденсатором заключается в том, что напряжение между обкладками конденсатора в любой момент времени определяется зарядом конденсатора, который был накоплен на его обкладках к этому моменту времени. Так, если конденсатор включить в цепь в момент времени $t_0 = 0$ (рис. 8.6), когда напряжение начинает расти, заряд на обкладках конден-

сатора будет равен нулю. Поэтому носители тока свободно двигаются к обкладкам, и сила тока в цепи большая. Когда напряжение приближается к максимальному значению U_0 , заряд, уже накопленный на обкладках конденсатора, начинает мешать дальнейшему притоку носителей тока к обкладкам, и сила тока в цепи падает до нуля. Начиная с момента времени

$t_1 = \frac{T}{4}$, напряжение уменьшается, накопленный на обкладках заряд начинает покидать их, и сила тока в цепи вновь увеличивается, но уже в противоположном направлении. Она достигает максимального отрицательного значения в момент времени $t_2 = \frac{T}{2}$, когда напряжение на обкладках конденсатора становится равным нулю. Поэтому, если $U = U_0 \sin \omega t$, то

$$I = I_0 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Вследствие того, что ток и напряжение сдвинуты по фазе на $\frac{\pi}{2}$, мощность, потребляемая от источника переменного тока конденсатором, в среднем равна нулю. В первую и третью четверти периода конденсатор заряжается и энергия источника превращается в энергию электростатического поля конденсатора, где и накапливается, а во вторую и четвертую четверти периода конденсатор разряжается и энергия его электростатического поля возвращается к источнику тока. Потеря энергии при этом не происходит.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока

В цепи переменного тока, содержащей катушку индуктивности (рис. 8.7), под действием приложенного напряжения проходит переменный ток $I = I_0 \sin \omega t$, который создает переменный магнитный поток

$$\Phi = LI_0 \sin \omega t.$$

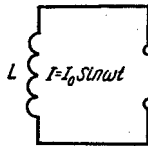


Рис. 8.7

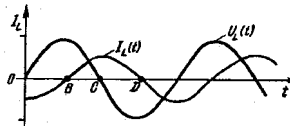


Рис. 8.8

Этот поток в свою очередь вызывает в цепи ЭДС самоиндукции, мгновенное значение которой $\mathcal{E}_c = -\Phi'(t)$. Если активное сопротивление цепи равно нулю то, согласно закону Ома для полной цепи $-\mathcal{E}_c + U = 0$,

где U – мгновенное значение напряжения источника переменного тока, включенного в цепь. Поэтому $U = -\mathcal{E}_c = LI'(t)$. Если подставить в эту формулу значение силы тока, получим $U = L(I_0 \sin \omega t)' = I_0 \omega L \cos \omega t$, где $I_0 \omega t = U_0$ – амплитудное значение напряжения. Поскольку $\cos \omega t = \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$, то мгновенное значение напряжения $U = U_0 \sin(\omega t + \pi/2)$.

Согласно закону Ома для участка цепи – $I_0 = \frac{U_0}{X_L}$ ($I_a = \frac{U_a}{X_L}$). С учетом того, что $U_0 = I_0 \omega L$, получим $X_L = \omega L$. Величина $X_L = \omega L$ называется *индуктивным сопротивлением*.

Напряжение на катушке индуктивности, включенной в цепь переменного тока, в любой момент времени равно ЭДС самоиндукции, взятой с противоположным знаком, причем колебания напряжения опережают по фазе колебания силы тока в катушке на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 8.8). К этому же выводу можно прийти исходя из энергетических рассуждений.

Сдвиг фаз между колебаниями силы тока и колебаниями напряжения в цепи переменного тока, в которую включена катушка индуктивности, обусловлен тем, что ЭДС самоиндукции пропорциональна не мгновенному значению тока, а скорости его изменения, поэтому она максимальна в те моменты времени, когда сила тока в цепи равна нулю, то есть максимумы напряжения совпадают с нулевыми значениями силы тока, и наоборот.

Если $U = U_0 \sin \omega t$, то $I = I_0 \cos \omega t = I_0 \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$. Поскольку напряжение на катушке $U = L \frac{dI}{dt}$, то скорость возрастания силы тока наибольшая в тот момент времени, когда напряжение максимальное, то есть при $U = U_0$, а скорость убывания — при $U = -U_0$. Эти два момента времени соответствуют точкам B и D на графике зависимости напряжения от времени (рис. 8.8). Из этого же графика видно, что точки O и C , соответствующие моментам времени, когда $U = 0$ ($\frac{dI}{dt} = 0$) и сила тока не изменяется, являются точками, соответствующими максимальному и минимальному значениям силы тока.

Из формулы $U = L \frac{dI}{dt}$ следует, что при постоянной частоте, чем больше индуктивность катушки L , тем меньше скорость изменения силы

тока, а следовательно, и сила тока в цепи. Таким образом, $X_L \sim L$. Чем выше частота, тем быстрее изменяется магнитный поток, который пронизывает витки катушки. Так как модуль ЭДС самоиндукции равен напряжению на полюсах источника переменного тока, то при увеличении частоты сила тока должна уменьшаться. Поэтому чем выше частота, тем больше индуктивное сопротивление: $X_L \sim \omega$.

Поскольку сила тока и напряжение сдвинуты по фазе на $\frac{\pi}{2}$, то средняя мощность, рассеиваемая катушкой, равна нулю. При возрастании силы тока энергия от источника тока попадает в катушку, где накапливается ее магнитным полем, а при его убывании — возвращается источнику.

Закон Ома для цепи переменного тока

Для определения силы тока на разных участках цепи переменного тока часто используют метод векторных диаграмм. Векторная диаграмма представляет собой чертеж, на котором в масштабе показаны в виде векторов амплитудные или действующие значения токов и напряжений на каждом участке цепи с учетом сдвига фаз между ними.

Рассмотрим векторную диаграмму цепи переменного тока, состоящей из резистора сопротивлением R , конденсатора емкостью C и катушки индуктивностью L , соединенных последовательно (рис. 8.9). Сила тока на всех участках цепи одинаковая, поэтому строить векторную диаграмму начнем с вектора $\vec{I}_{0R}$, модуль которого равен амплитудному значению тока в цепи. Ориентация этого вектора может быть любой. Направим его под углом $\alpha = \omega t$ к горизонтали AB (рис. 8.10).

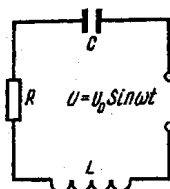


Рис. 8.9

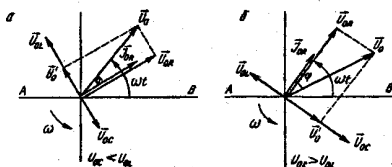


Рис. 8.10

Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с силой тока, поэтому вектор $\vec{U}_{0L}$, модуль которого $U_{0L} = I_{0R}R$ совпадает по направлению с вектором $\vec{I}_{0R}$. Сдвиг фаз между током и напряжением на индуктивном сопротивлении составляет $\frac{\pi}{2}$, причем ток отстает от напря-

жения. Поэтому вектор $\vec{U}_{0R}$, модуль которого $U_{0L} = I_0 \omega L$, необходимо повернуть относительно вектора $\vec{I}_{0R}$ на угол, равный $\frac{\pi}{2}$, против часовой стрелки. И, наконец, вектор $U_{0C} = I_{0R}/(\omega C)$ отстает по фазе от вектора $\vec{I}_{0R}$ на $\frac{\pi}{2}$, поэтому его надо повернуть на этот угол по часовой стрелке.

Чтобы найти напряжение на зажимах цепи, необходимо сложить три вектора: $\vec{U}_0 = \vec{U}_{0R} + \vec{U}_{0L} + \vec{U}_{0C}$. Удобно сначала сложить векторы $\vec{U}_{0L}$ и $\vec{U}_{0C}$. Модуль этой суммы $U'_0 = |\vec{U}_{0L} + \vec{U}_{0C}| = I_0(\omega L - 1/(\omega C))$, если $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ (рис. 8.10, а), или $U''_0 = I_0(1/(\omega C) - \omega L)$, если $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ (рис. 8.12, б). После этого складывают векторы $\vec{U}_{0R}$ и $\vec{U}'_0$.

Модуль вектора $\vec{U}'_0$ в обоих случаях определяют по теореме Пифагора, согласно которой, $U_0^2 = U_{0R}^2 + (U_{0C} - U_{0L})^2 = I_0^2 R^2 + I_0^2 (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2$, откуда

амплитудное значение силы тока в цепи $I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} = \frac{U_0}{Z}$, где Z – полное сопротивление цепи;

$(\omega L - 1/\omega C)$ – ее реактивное сопротивление.

Итак, амплитудное значение силы тока прямо пропорционально амплитудному значению напряжения и обратно пропорционально полному сопротивлению цепи. Последнее утверждение называют законом Ома для последовательной RLC -цепи переменного тока.

Сдвиг фаз между силой тока и напряжением равен углу φ между векторами $\vec{U}_0$ и $\vec{I}_0$. Если $\omega L > 1/(\omega C)$ (рис. 8.10, а), то ток отстает по фазе от напряжения на угол φ_1 , поэтому $\text{tg } \varphi_1 = \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R}$.

Проецируя соответствующие векторы напряжений для последовательной RLC цепи на заранее выбранное направление AB (рис. 8.10), получим мгновенные значения напряжения на отдельных элементах участка цепи:

$$U_R = I_0 R \sin(\omega t - \varphi_1), \quad U_L = I_0 \omega L \sin(\omega t - \varphi_1 - \frac{\pi}{2}),$$

$$U_C = \frac{I_0}{\omega C} R \sin(\omega t - \varphi_1 + \frac{\pi}{2}).$$

Если $\omega L < \frac{1}{\omega C}$, то $\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{1/(\omega C) - \omega L}{R}$, причем ток опережает напряжение по фазе на этот угол (рис. 8.10, б).

Из закона Ома следует, что сила тока в последовательной RLC цепи переменного тока достигает максимального значения, если реактивное сопротивление цепи $\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$. В этом случае $I_{\max} = \frac{U}{R}$, а соответствующая максимальной силе тока частота переменного тока $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Причем напряжение на конденсаторе $U_C = \frac{I_{\max}}{\omega_0 C} = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}$ и напряжение на катушке индуктивности $U_L = I_m \omega_0 L = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}$ в этом случае численно одинаковы.

Поскольку напряжение на конденсаторе и напряжение на катушке индуктивности сдвинуты по фазе друг относительно друга на π , то их сумма равна нулю в любой момент времени. Рассмотренное явление называется *резонансом напряжений*. Таким образом, резонанс напряжений наблюдается в последовательной цепи переменного тока; максимальное значение силы тока при резонансе напряжений зависит только от активного сопротивления цепи; напряжение источника переменного тока при резонансе равно напряжению на активном сопротивлении цепи; при резонансе напряжений колебания силы тока и колебания напряжения совпадают по фазе. При этом мощность, потребляемая цепью от источника, максимальна.

Рассмотрим цепь переменного тока, состоящую из резистора, катушки индуктивности и конденсатора, соединенных параллельно (рис. 8.11). В этом случае напряжения на резисторе, катушке и конденсаторе в любой момент времени одинаковые: $U_R = U_C = U_L$, а между полным током в цепи и напряжением существует сдвиг фаз. Причем $I_{OR} = U_R/R$, $I_{OC} = U_C \omega C$,

$I_{OL} = \frac{U_0}{\omega L}$. Векторная диаграмма параллельной цепи для случая $I_{OL} > I_{OC}$

приведена на рис. 8.12, а, а для случая $I_{OL} < I_{OC}$ — на рис. 8.12, б. Вектор полного тока является суммой векторов токов на отдельных участках цепи: $\vec{I}_0 = \vec{I}_{OR} + \vec{I}_{OL} + \vec{I}_{OC}$. Модуль вектора полного тока

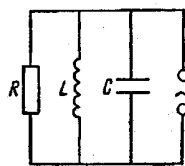


Рис. 8.11

$I_0 = U_0 \sqrt{1/R^2 + (1/(\omega L) - \omega C)^2}$. Вектор полного тока $\vec{I}_0$ направлен под углом φ к вектору $\vec{U}_0$, причем $\operatorname{tg} \varphi = R \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right)$.

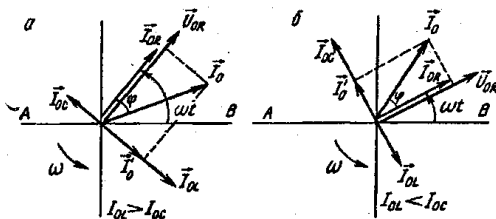


Рис. 8.12

Если индуктивное сопротивление равно емкостному: $\omega C = \frac{1}{\omega L}$, то сдвиг фаз между полным током и напряжением равен нулю, а полный ток равен току, проходящему через резистор: $I_0 = I_{0R} = \frac{U_0}{R}$.

Проецируя векторы, изображающие токи для параллельной RLC -цепи на заранее выбранное направление AB (рис. 8.12), получим мгновенные значения силы тока на отдельных элементах участка цепи:

$$I_R = \frac{U_0}{R} \sin \omega t, \quad I_L = \frac{U_0}{\omega L} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad I_C = U_0 \omega C \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Мгновенное значение силы тока в неразветвленном участке цепи $I = I_0 \sin(\omega t - \varphi)$

В параллельной RLC -цепи переменного тока может наблюдаться *резонанс токов*. Пусть активное сопротивление цепи равно нулю. Так как при заданном синусоидальном напряжении источника переменного тока, подключенного к цепи, мгновенные значения силы тока в конденсаторе и в катушке индуктивности сдвинуты по фазе на π (токи имеют противоположные направления), причем $I_C = \frac{U}{X_C} = U \omega C$, $I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega L}$, то сила

тока в цепи $I = I_C - I_L = U \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$. Если $\omega_0 C = \frac{1}{\omega_0 L}$, то есть частота переменного тока ω_0 удовлетворяет условию $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, сила тока в цепи равна нулю. Рассмотренное явление называется резонансом токов.

Катушка индуктивности всегда имеет активное сопротивление R . В этом случае резонансная частота переменного тока определяется по

формуле $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}}$. На этой частоте полное сопротивление цепи яв-

ляется чисто активным и имеет наибольшее при данных параметрах цепи значение. Причем токи I_C и I_L значительно больше тока I , проходящего через источник. Мощность, развиваемая источником тока при резонансе токов, выделяется только на активном сопротивлении.

В результате анализа простейших цепей переменного тока можно сделать некоторые выводы:

1. Переменный ток представляет собой вынужденные электрические колебания, возбуждаемые в цепи генератором переменного тока.

2. Частота вынужденных колебаний силы тока совпадает с частотой колебаний напряжения источника переменного тока и не зависит от параметров электрической цепи.

3. Амплитуда вынужденных колебаний силы тока (максимальное значение силы тока в цепи) пропорциональна амплитуде колебаний напряжения источника переменного тока и зависит от параметров цепи, в частности от соотношений между частотой колебаний напряжения, емкостью и индуктивностью цепи.

4. При определенной частоте переменного тока полное сопротивление цепи является чисто активным. При резонансе напряжений оно минимальное, а при резонансе токов — максимальное.

5. Мощность, которую развивает источник переменного тока, выделяется только на активном сопротивлении цепи, причем $\langle P \rangle = I_d^2 R$ или $P = I_d U_d \cos \varphi$, где φ — сдвиг фаз током и напряжением в конкретной цепи.

6. Закон Ома в цепи переменного тока выполняется только для амплитудных или действующих значений силы тока и напряжения. Для мгновенных значений использовать его нельзя.

Методика измерений и обработка результатов

Задание 1. Подготовка приборов и оборудования к работе

В качестве источника переменного тока в работе используется генератор сигналов Г6-46, который обеспечивает формирование выходных сигналов синусоидальной, треугольной, прямоугольной и пилообразной форм в диапазоне частот от 0,1 Гц до 1 МГц с разделением на 7 поддиапазонов.

Формирование выходного сигнала конкретной формы осуществляется кнопками переключателя «**режим**».

Выбор поддиапазонов генерации осуществляется переключением частото задающих конденсаторов и коммутацией токов управления кнопками «**частота**» блока переключателей.

В пределах каждого поддиапазона предусмотрена грубая и плавная перестройка частоты выходного сигнала, осуществляемая резисторами, ручки которых «**грубо**» и «**плавно**» выведены на переднюю панель прибора.

Для измерения частоты генератор имеет внутренний частотомер, индикаторное табло которого находится на передней панели прибора.

Ступенчатая регулировка амплитуды выходного сигнала осуществляется дискретным аттенуатором «**аттенуатор, dB**», а плавная регулировка – резистором «**ампл.**». Кнопки аттенуатора и ручка резистора находятся на передней панели прибора.

Гнездо «**выход**» предназначено для подключения к внешним исследуемым цепям.

Гнездо «**выход ЧМ**» предназначено для управления частотой генератора внешним сигналом (частотная модуляция).

Задание 2. Исследование зависимости емкостного сопротивления от частоты переменного тока

1. Соберите электрическую цепь в соответствии со схемой, приведенной на рис. 8.13, и установите на магазине сопротивление 600 Ом.

2. Включите генератор в сеть напряжением 220 В.

3. Установите на выходе генератора напряжение 5–7 В и частоту 1 кГц.

4. Измерьте значения силы тока и напряжения при различных значениях частоты переменного тока, изменяя ее от 25 Гц до 1,0 кГц.

5. По результатам измерений найдите емкостное сопротивление конденсатора при различных частотах.

6. Постройте график зависимости емкостного сопротивления от частоты.

7. По измеренным значениям силы тока и напряжения при различных частотах найдите емкость конденсатора.

8. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 1.

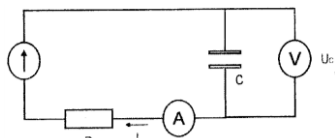


Рис. 8.13

Таблица 1

№	ν , Гц	U_C , В	I , А	C , Ф	X_C , Ом

Задание 3. Исследование зависимости индуктивного сопротивления от частоты переменного тока.

1. Измерьте мультиметром активное сопротивление R_L катушки.
2. Соберите электрическую цепь в соответствии со схемой, приведенной на рис. 8.14, и установите на магазине сопротивлений 600 Ом.

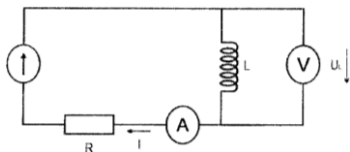


Рис. 8.14

3. На выходе генератора включенного в сеть напряжением 220 В, установите напряжение 5–7 В и частоту 1 кГц.
4. Измерьте значения силы тока и напряжения при различных значениях частоты переменного тока, изменяя ее от 50 Гц до 1,0 кГц.
5. По измеренным значениям силы тока и напряжения на различных частотах, найдите полное сопротивление $Z = \frac{U_L}{I}$ катушки, ее индуктивное

сопротивление $X_L = \sqrt{\frac{U_L^2}{I^2} - R_L^2}$ и индуктивность $L = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{\frac{U_L^2}{I^2} - R_L^2}$.

6. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 2.

Таблица 2

№	ν , Гц	U_L , В	I , А	L , Гн	X_L , Ом

7. Постройте график зависимости индуктивного сопротивления катушки от частоты переменного тока.

Задание 4. Проверка закона Ома для последовательной RLC-цепи переменного тока.

1. Соберите электрическую цепь из последовательно соединенных миллиамперметра переменного тока, катушки индуктивности, конденсатора емкостью $C = 1,0$ мкФ и магазина сопротивлений (рис.8.15). Установите на магазине сопротивление 600 Ом

2. Подключите выводы цепи и милливольтметр переменного тока к звуковому генератору.

3. Измерьте значения силы тока и напряжения при различных значениях частоты переменного тока.

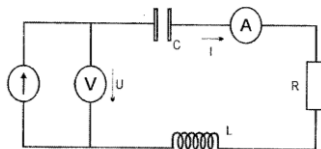


Рис. 8.15

4. По измеренным значениям силы тока и напряжения на различных частотах, найдите экспериментальное значение полного сопротивления

$$Z = \frac{U_L}{I} \text{ RLC-цепи переменного тока.}$$

5. Рассчитайте теоретическое значение полного сопротивления

$$Z = \sqrt{(R + R_L)^2 + \left(2\pi\nu L - \frac{1}{2\pi\nu C}\right)^2} \text{ RLC-цепи переменного тока используя значения } (R_L + R), C \text{ и } L, \text{ определенные в заданиях 1 и 2.}$$

6. Выключите из цепи магазин сопротивлений и повторите измерения силы тока и напряжения при различных значениях частоты переменного тока.

7. Постройте графики зависимости силы тока в цепи от частоты при включенном и отключенном магазине сопротивлений и определите частоту, силу тока и напряжение, соответствующие резонансу напряжений в обоих случаях.

8. По измеренным значениям сила тока и напряжения при резонансной частоте найдите активное сопротивление, волновое сопротивление и добротность контура с резистором и без резистора.

9. Измерьте напряжение на конденсаторе при резонансной частоте, найдите добротность контура по формуле $Q = \frac{U_C}{U}$ и сравните с результатом, полученном в пункте 7.

10. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 3.

Таблица 3

№	ν , Гц	$R_L + R$, Ом	C, Ф	L, Гн	U_L , В	I, А	$Z_{\text{эсп}}$, Ом	$Z_{\text{теор}}$, Ом

По результатам выполнения каждого задания сформулируйте выводы.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Введите формулы для расчета емкостного и индуктивного сопротивлений и укажите причины их существования.

2. Запишите формулу для расчета полного сопротивления последовательной **RLC**-цепи переменного тока.

3. Как строится векторная диаграмма для последовательной **RLC**-цепи переменного тока.

4. При каких условиях в последовательной **RLC**-цепи переменного тока возникает резонанс напряжений?

5. Почему при резонансе напряжений значения напряжений на катушке индуктивности (U_L) и на конденсаторе (U_C) могут быть больше напряжения U на полюсах источника переменного тока?

6. Как изменяется сдвиг фаз между током и напряжением в цепи переменного тока, при изменении частоты тока?

7. Постройте графики зависимости активного, емкостного и индуктивного сопротивлений от частоты переменного тока.

8. Постройте график зависимости силы тока в цепи от частоты в последовательной RLC -цепи переменного тока.

Лабораторная работа 9.

Изучение вынужденных электрических колебаний и снятие семейства резонансных кривых

1. Цель работы. Изучение вынужденных электрических колебаний и явления резонанса в электрических цепях; снятие семейства амплитудных резонансных кривых.

2. Приборы и принадлежности: звуковой генератор, милливольтметр переменного тока, микроамперметр переменного тока, конденсатор, катушка индуктивности, набор резисторов или магазин сопротивлений, соединительные провода.

3. Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Сформулируйте цель работы.
2. Какие колебания называются свободными?
3. Какие колебания называются вынужденными?
4. Запишите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний.
5. Что называется резонансом колебаний?
6. Какова природа сторонних сил, вызывающих ЭДС индукции в генераторах переменного тока?
7. Как графически и с помощью вектора изобразить колебание?

4. Основы теории

Всякий реальный контур обладает активным сопротивлением. Энергия заряженного конденсатора при замыкании RLC -цепи постепенно превращается во внутреннюю энергию катушки и соединительных проводов. Поэтому свободные электромагнитные колебания (колебания заряда конденсатора, напряжения между обкладками конденсатора, силы тока в цепи) в RLC -контуре постепенно затухают. Для получения незатухающих колебаний в таком контуре к нему необходимо подводить извне энергию, компенсирующую тепловые потери. Для этого колебательный контур разрывают и подают на образовавшиеся контакты напряжение от источника переменного тока (генератора): $U(t) = U_m \cos \omega t$, где U_m – амплитудное значение переменного напряжения; ω – циклическая частота (рис. 9.1).

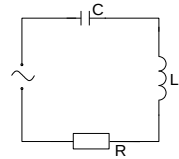


Рис. 9.1

Под действием приложенного напряжения в контуре устанавливаются электромагнитные колебания с частотой, равной частоте колебаний подведенного к контуру переменного напряжения ω , называемые **вынужденными** электромагнитными колебаниями. Такая схема подключения источника к контуру называется *последовательным колебательным контуром* (рис. 9.1), так как все элементы RLC -контра и источник переменного напряжения соединены между собой последовательно.

По второму правилу Кирхгофа с учетом возникающей ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}$ для этой цепи имеем: $IR + U_c = U_m \cos \omega t - L \frac{dI}{dt}$.

С учетом того, что $U_c = \frac{q}{C}$, а $I = \frac{dq}{dt}$, получим $L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = U_m \cos \omega t$.

Разделив последнее выражение на LC с учетом того, что $\frac{R}{2L} = \beta$ – коэффициент затухания, а $\sqrt{\frac{1}{LC}} = \omega_0$ – циклическая частота собственных колебаний, получим дифференциальное уравнение второго порядка для вынужденных колебаний:

$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t$. Полное решение неоднородного дифференциального уравнения равно сумме решения, соответствующего однородного линейного дифференциального уравнения и частного решения.

Общее решение однородного уравнения имеет вид: $q(t) = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \varphi)$, где q_0 – амплитуда заряда на конденсаторе;

$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – частота затухающих колебаний не равная циклической частоте источника (вынуждающей силы).

Величина первого слагаемого этой суммы очень быстро убывает с течением времени, так как оно описывает свободные затухающие колебания в контуре.

Для того чтобы фаза тока равнялась $(\omega t - \varphi)$, запишем частное решение уравнения в виде: $q = q_m \cos[\omega t - (\varphi + \frac{\pi}{2})] = q_m \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2})$,

где $q_m = \frac{\frac{U_m}{L}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + 4\beta^2 \omega^2}}$, причем $tg(\varphi + \frac{\pi}{2}) = \frac{2\beta \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$.

Подставив значения β и ω_0^2 в последнюю формулу получим

$$tg \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Сила тока при установившихся вынужденных колебаниях:

$$I(t) = \frac{dq}{dt} = -q_m \omega \sin(\omega t - \varphi) = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad \text{где} \quad I_m = q_m \omega. \quad \text{Сле-}$$

довательно,
$$I_m = q_m \omega = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{U_m}{Z}, \quad \text{где} \quad Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

называется *импедансом*, то есть полным сопротивлением электрической цепи, а $X_L = \omega L$ и $X_C = \frac{1}{\omega C}$ называются *индуктивным и емкостным* сопротивлениями (*реактивными сопротивлениями*).

Формула
$$I_m = q_m \omega = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} =$$
 соответствует закону Ома

для амплитудных значений переменного тока. Амплитудное значение силы тока I_m зависит от ω , L , C и R , при $\omega \rightarrow 0$, как и при $\omega \rightarrow \infty$, I_m также стремится к нулю.

Резонансная частота $\omega_{\text{рез}}$ не зависит от R : $\omega_{\text{рез}} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. При этой частоте максимальное значение амплитуды силы тока: $I_m = \frac{U_m}{R}$.

С ростом R , а следовательно, и коэффициента затухания $\beta = R/2L$, I_m уменьшается.

Зависимость амплитудных значений силы тока от частоты периодической вынуждающей разности потенциалов ($I_m(\omega)$) для различных коэффициентов затухания $\beta = R/2L$ показана на рис. 9.2. Такие кривые называются *резонансными амплитудно-частотными характеристиками*.

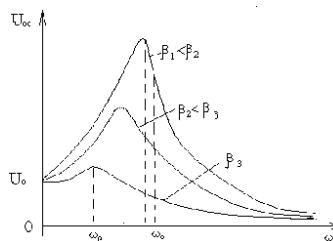


Рис. 9.2

Резонансные кривые амплитудных значений напряжения отличаются от резонансных кривых амплитуды тока. На рис. 9.3 приведены резонансные кривые изменения амплитудного значения напряжения на конденсаторе от частоты ω для разных значений коэффициента затухания β , которые иллюстрируют увеличение остроты кривых с уменьшением β , а также – уменьшение резонансной частоты с увеличением этого же коэффициента.

Из рис. 9.3 видно, что при $\omega \rightarrow 0$ амплитудное значение напряжения U_{mc} стремится к U_m . Резонанс колебаний напряжения U_{mc} наступает при частоте

$$\omega_p = \sqrt{\omega_o^2 - 2\beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}},$$

значение которой смещается в сторону меньших частот с ростом коэффициента затухания β .

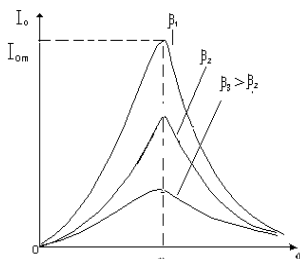


Рис. 9.3

5. Методика измерений и обработка результатов

1. Соберите электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 9.4.

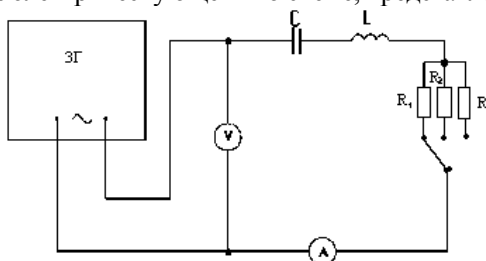


Рис. 9.4

2. Установите на звуковом генераторе начальное значение частоты $\nu_1 = 200$ Гц.

3. Регулятором напряжения установите на выходе звукового генератора напряжение, равное 30 мВ.

4. Включите в цепь последовательно с катушкой L и конденсатором C резистор R_1 .

5. Измерьте значения силы тока I_1, I_2, I_3 , изменяя частоту в интервале от 200 до 2,0 кГц через каждые 200 Гц, поддерживая напряжение в цепи неизменным с помощью регулятора напряжения для резистора R_1 .

6. Замените резистор R_1 сначала резистором R_2 , а затем резистором R_3 и повторите измерения при других значениях напряжения на выходе звукового генератора.

7. Результаты измерений занесите в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Частота, Гц			200	400	600	800		1600	1800	2000
1	$R_1 = \dots\dots \text{ Ом}$	Сила тока I , мкА								
	$U_1 = \dots\dots \text{ В}$									
2	$R_2 = \dots\dots \text{ Ом}$									
	$U_2 = \dots\dots \text{ В}$									
3	$R_3 = \dots\dots \text{ Ом}$									
	$U_3 = \dots\dots \text{ В}$									

8. По результатам измерений на миллиметровой бумаге постройте семейство амплитудно-частотных резонансных кривых.

9. По полученному графику зависимости $I=I(\nu)$ и по максимальному значению силы тока I_m определите резонансную частоту $\nu_{\text{рез}}^{\text{эк}}$.

10. По формуле $\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ рассчитайте значение резонансной частоты ν_0 , подставляя значения L и C электрической цепи.

11. Сравните экспериментальное $\nu_{\text{рез}}^{\text{эк}}$ и рассчитанное по формуле ν_0 значения резонансной частоты.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется колебательным контуром? Объясните возникновение вынужденных электрических колебаний в цепи переменного тока.

2. Выведите закон Ома для электрической цепи переменного тока, содержащей омическое сопротивление, емкость и индуктивность.

3. Получите дифференциальное уравнение вынужденных электрических колебаний.

4. Выведите формулу для резонансных частот колебаний силы тока и напряжения.

5. Изобразите и поясните ход резонансных кривых (амплитудных и фазовых).

6. Что такое полное сопротивление (импеданс) переменной электрической цепи?

7. Покажите, что при резонансе подводимая к контуру мощность равна мощности, рассеянной на омическом сопротивлении контура.

8. Чему равен сдвиг фаз между амплитудными значениями тока и напряжения на различных элементах RLC-цепи? Приведите векторные диаграммы.

9. Какова разность фаз между колебаниями напряжений на индуктивности и конденсаторе в последовательном контуре?

10. Выведите формулы для емкостного и индуктивного реактивных сопротивлений.

11. Чему равна амплитуда напряжений на индуктивности и конденсаторе при резонансе в последовательном контуре, если напряжение источника меняется по гармоническому закону?

12. Покажите, что при $\omega = \omega_0$ добротность колебательного контура равна коэффициенту усиления напряжения на конденсаторе $Q = U_C/E_0$.

По результатам выполнения каждого задания сделайте соответствующие выводы.

Лабораторная работа 10.

Изучение свойств электромагнитных волн

1. **Цель работы:** экспериментальное изучение свойств электромагнитных волн, овладение методикой определения длины электромагнитной волны, анализа и оценки экспериментальных данных.

2. **Приборы и оборудование:** Комплект приборов и принадлежностей для изучения свойств электромагнитных волн.

3. Вопросы для допуска лабораторной работе.

1. Назовите существенные признаки понятия «электромагнитное поле» и его источники.

2. Назовите физические величины, характеризующие электромагнитное поле.

3. Дайте определение понятия «электромагнитная волна».

4. Какие научные факты свидетельствуют о том, что электромагнитные волны являются поперечными?

5. Почему утверждение о том, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, не является бесспорным?

6. Запишите формулу для расчета плотности энергии электромагнитной волны и проанализируйте ее.

7. Назовите физический механизм, образования электромагнитной волны.

8. Что вы знаете о воздействии электромагнитного излучения на человека и его последствиях?

1. Основы теории

Экспериментальные факты свидетельствуют о том, что электрическое поле порождается не только электрическими зарядами, но и переменным магнитным полем.

Дж. Максвелл сформулировал гипотезу, в соответствии с которой изменение электрического поля должно сопровождаться возникновением магнитного поля. Если в некоторой области пространства существует переменное электрическое поле, то в этой же области должно быть и магнитное поле. Значит, переменное электрическое поле по его магнитному действию можно рассматривать как своеобразный ток без зарядов. Максвелл назвал этот ток *током смещения*.

Переменные электрические и магнитные поля не существуют обособленно, независимо друг от друга. Нельзя создать переменное магнитное поле без того, чтобы одновременно в пространстве не возникло электрическое поле, и наоборот, переменное электрическое поле не может существовать без магнитного. Таким образом, переменные электрические и магнитные поля тесно взаимодействуют, они образуют единое электромагнитное поле. Электромагнитное поле является особой формой существования материи, посредством которой осуществляется электромагнитное взаимодействие.

Взаимное расположение трех векторов $\vec{E}$, $\vec{B}$ и $\vec{v}$, характеризующих электромагнитную волну в определенный фиксированный момент времени, показано на рис. 10.1. Как видно из рисунка, эти векторы перпендикулярны друг другу, то есть электромагнитные волны, являются поперечными.

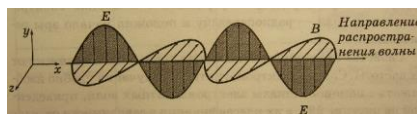


Рис. 10.1

Электромагнитное поле описывают четырьмя векторными величинами: $\vec{E}$ – напряженность электрического поля, $\vec{B}$ – магнитная индукция, $\vec{D}$ – электрическая индукция, $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля.

Временные и пространственные производные этих векторов связаны уравнениями Максвелла в тех областях пространства, где физические свойства среды непрерывны:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}; \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \operatorname{div} \vec{D} = \rho; \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad \text{где} \quad \rho = \frac{dq}{dV} —$$

плотность электрических зарядов, $\vec{j}$ — плотность тока.

Для описания поведения веществ под влиянием поля вводятся материальные уравнения: $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$; $\vec{D} = \varepsilon_0 \eta \vec{E}$; $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, где σ — удельная проводимость, ε и μ — относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды соответственно; ε_0 и μ_0 — диэлектрическая и магнитная постоянные соответственно.

Решения уравнений Максвелла дают распределение напряженности электрического и индукции магнитного полей, $\vec{E}(r, t)$ и $\vec{B}(r, t)$, в каждой точке пространства и их изменение во времени.

В простейшем случае уравнения Максвелла имеют решения типа плоской монохроматической волны, волны имеющей плоский волновой фронт и распространяющейся в направлении оси Ох: $E = E_y = E_0 \sin(\omega t + kx)$; $B = B_z = B_0 \sin(\omega t + kx)$, где $\vec{E}_0$ и $\vec{B}_0$ — амплитуды напряженности электрической и магнитной составляющей поля, ω — циклическая частота, k — волновое число. Циклическая частота ω , частота ν , длина волны λ , волновое число k и период колебаний источника T , излучающего ее, связаны соотношениями $\omega = 2\pi\nu$; $\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{2\pi v}{\omega} = vT$; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, где v — скорость волны.

Свойства электромагнитных волн аналогичны свойствам упругих волн. Однако необходимо иметь в виду, что в электромагнитных волнах происходят колебания полей, а не вещества как, например, в упругих волнах. Как уже отмечалось выше, источниками электромагнитных волн в вакууме являются только ускоренно движущиеся электрические заряды. Скорость распространения электромагнитных волн зависит от электрических и магнитных свойств среды и, как следует из теории Максвелла, определяется по формуле: $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0}}$.

Для вакуума $\mu = 1$ и $\varepsilon = 1$, поэтому скорость распространения электромагнитной волны в вакууме $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$.

Поскольку $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/Нм², $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Тл·м/А, то численное значение $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Таким образом скорость распространения электромагнитных волн в вакууме совпадает со скоростью света в вакууме.

С учетом этого $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$, откуда $\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu} = n$. Поэтому источниками электромагнитных волн в веществе являются не только ускоренно движущиеся электрические заряды, но и заряды, скорость которых больше скорости света в данном веществе, движущиеся равномерно.

Величину n , показывающую во сколько раз скорость распространения электромагнитных волн в вакууме больше их скорости в какой-нибудь среде, называют *абсолютным показателем преломления* этой среды:

$$n = \frac{c}{v}. \text{ Таким образом, абсолютный показатель преломления — } n = \sqrt{\epsilon\mu}.$$

Для диэлектриков, в которых могут распространяться электромагнитные волны, $\mu \approx 1$, а $\epsilon > 1$. Поэтому абсолютный показатель преломления среды также больше единицы и скорость распространения электромагнитных волн в среде меньше, чем в вакууме. Для вакуума $c = \lambda_0\nu$, где λ_0 — длина волны в вакууме. Чаше всего при характеристике электромагнитных волн определяют длину волны в вакууме. Надо иметь в виду, что при переходе волн из одной среды в другую неизменной остается частота колебаний, а длина волны меняется. Если λ — длина волны в среде, то

$$n = \frac{cT}{\nu T} = \frac{\lambda_0}{\lambda}, \text{ следовательно, } \lambda = \frac{\lambda_0}{n}.$$

Таким образом, основные свойства электромагнитных волн определяются, с одной стороны, особенностями источника излучения, с другой — свойствами среды, в которой они распространяются.

Распространение электромагнитных волн в пространстве связано с переносом энергии электромагнитного поля. Эта энергия состоит из энергии электрического и магнитного полей: $W = W_{\text{Э}} + W_{\text{М}}$. Плотность

энергии электрического поля $\left(W_{\text{эл}} = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} \right)$ пропорциональна квадрату напряженности электрического поля $\vec{E}$, а плотность энергии магнитного поля — квадрату индукции магнитного поля волны $\vec{B} \left(W_{\text{м}} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \right)$.

Если электромагнитная волна распространяется в вакууме или в неограниченной однородной среде, то плотность энергии ее электрического и магнитного полей одинакова: $\epsilon\epsilon_0 E^2/2 = B^2/(2\mu\mu_0)$. Поэтому индукция магнитного поля волны связана с напряженностью ее электрического поля отношением $B = \frac{E}{c}$.

Поскольку амплитуды колебаний напряженности $\vec{E}$ и индукции $\vec{B}$ пропорциональны ускорению заряженных частиц, излучающих электромагнитную волну, ($\vec{E} \sim \vec{a}$ и $\vec{B} \sim \vec{a}$), то полная плотность энергии электромагнитного поля пропорциональна квадрату амплитуды ускорения. При гармонических колебаниях модуль ускорения пропорционален квадрату циклической частоты колебаний: $|\vec{a}| \sim \omega^2$. Поэтому плотность энергии электромагнитного поля, а следовательно, и энергия излучаемая в единицу времени, пропорциональна четвертой степени частоты.

Простейшей системой, излучающей электромагнитные волны, является элементарный диполь, который представляет собой два противоположных заряда $\pm q$, находящихся на расстоянии $r \ll \lambda$, значительно меньше длины волны излучения λ . При изменении расстояния r или зарядов q по гармоническому закону $\sim \sin(\omega t)$ диполь является источником электромагнитных волн с циклической частотой ω .

Характер поля диполя существенно зависит от расстояния r от диполя до точки наблюдения. Если расстояние от диполя до этой точки мало, то есть $r \ll \lambda$, то амплитуда напряженности электрического поля $\vec{E}$ убывает с расстоянием пропорционально $\frac{1}{r^3}$, а амплитуда магнитной индукции пропорционально $\frac{1}{r^2}$. В этой области излучение диполя представляет собой излучение рупорной антенны. Объект, попавший в такое поле, облучается неравномерно, в разных точках под разными углами. Эту область также называют областью не сформировавшейся волны.

На больших расстояниях от диполя, $r \gg \lambda$ закон убывания становится другим, а именно $\vec{E}$ и $\vec{B}$ убывают обратно пропорционально расстоянию от центра диполя до точки наблюдения.

Эта область называется волновой областью или областью сформировавшейся волны. Фронт волны в данной области можно считать сферическим.

Обычно перенос энергии электромагнитного поля характеризуется энергией, которую переносит волна за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны. Эту величину называют плотностью потока электромагнитной энергии ω (интенсивностью излучения). Плотность потока электромагнитной энергии является векторной величиной (вектор Умова–Пойнтинга, в честь русского физика Н. А. Умова (1846–1915) и английского физика Дж. Пойнтинга (1852–1914)). Направление этого вектора совпадает с направлением распространения электромагнитной волны: $\vec{S} = [\vec{E} \times \vec{B}]$

Вектор Умова–Пойнтинга зависит от времени, поэтому удобно пользоваться его средним за период значением. Для диполя: $\langle S \rangle = \frac{\rho^3 \omega^4 \sin^2 \theta}{32\pi^2 \epsilon c^3}$.

Следовательно, поток мощности убывает пропорционально квадрату расстояния от источника. Таким образом, расстояние от источника излучения является очень важным параметром.

Однако при воздействии поля на биообъект необходимо также принимать во внимание соотношение радиуса r кривизны волнового фронта и геометрических размеров d объекта, например, человеческого тела. Если $d \approx r$, то падающую волну следует считать сферической, а если $d \approx r$, то волновой фронт можно считать плоским.

Если имеется некоторая система заряженных частиц, излучающих электромагнитные волны, то поток электромагнитной энергии через замкнутую поверхность, ограничивающую систему частиц, определяет энергию, которую теряет система за единицу времени в результате излучения электромагнитных волн. В качестве примера можно привести плотность потока солнечного излучения, падающего на границу земной атмосферы. Эта плотность потока равна $1,35 \text{ кВт/м}^2$.

В табл.10.1 приведена шкала электромагнитных волн, с указанием некоторых наиболее характерных источников излучения.

Реальные источники не излучают строго монохроматическую волну частоты ω – в спектре излучения всегда присутствует определенная полоса частот $\delta\omega$. Даже такой прибор, как лазер, не является источником строго монохроматического излучения.

Кроме того, большинство техногенных информационных сигналов являются модулированными. Модуляция – это изменение высокочастотного несущего колебания в соответствии с изменением низкочастотного информационного сигнала. В процессе модуляции может изменяться частота, амплитуда или фаза несущего колебания.

Таблица 10.1.

Шкала электромагнитных волн

Волны	Диапазон длин волн	Диапазон частот	Источники
Радиоволновой диапазон			
сверхдлинные	>1000м	<300 кГц	Устройства для передачи данных (телевидение, ра- дио и др.), индукционные печи, электротранспорт, проводка, устройства для диатермии и др.
длинные	100 1000 м	300 кГц–3 МГц	
средние	10–100 м	3 МГц–30 МГц	
короткие	1–10м	30 МГц–300 МГц	
Сверхвысокочастотный диапазон (СВЧ)			
дециметровые	10–100 см	300 МГц–3 ГГц	СВЧ-печи, сотовая и спутниковая связь, СВЧ- и КВЧ-диатермия, радио-
сантиметровые	1–10 см	3 ГГц–30 ГГц	
миллиметровые	1–10 мм	30 ГГц–300 ГГц	

субмиллиметровые	0,1–1 мм	300 ГГц–3 ТГц	локация и др.
Оптический диапазон			
инфракрасные	0,76–100 мкм	3 ТГц–400 ТГц	Лазеры в ИК- и УФ-диапазонах, ксеноновые излучатели, ртутные лампы
видимые	400–760 нм	400 ТГц–750 ТГц	
ультрафиолетовые	10–400 нм	750 ТГц–30 ПГц	
Диапазон ионизирующих излучений			
Рентгеновское, гамма-излучение	< 10 нм	> 30 ПГц	Используются в медицине для лечения и диагностики злокачественных новообразований

Любой модулированный сигнал приближенно может быть представлен в виде суммы нескольких монохроматических компонент с помощью разложения в конечный (бесконечный) ряд Фурье:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t),$$

где ω_1 – частота основной гармоники, $n\omega_1$ – частота гармоник, a_n и b_n – амплитуды гармоник.

На рис. 10.2 показаны схематически спектры монохроматического (а), прямоугольного (б) и сигнала с амплитудной модуляцией (в).

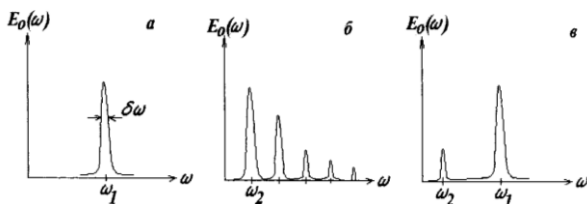


Рис. 10.2

Поскольку электромагнитная волна является поперечной волной, можно говорить о ее поляризации.

Ориентация вектора $\vec{E}$ в линейно-поляризованной волне сохраняется неизменной, то есть колебания вектора $\vec{E}$ происходят в одной плоскости. Эта плоскость называется плоскостью колебаний.

В общем случае плоская волна может быть представлена в виде суперпозиции двух линейно-поляризованных волн с взаимно-перпендикулярной ориентацией одноименных полей, направления векторов в результирующей волне

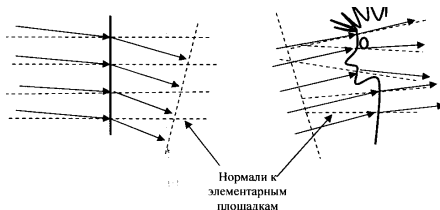


Рис. 10.3

не будет оставаться постоянным (рис.10.3, *a*). В общем случае монохроматическая волна является эллиптически поляризованной (рис.10.3, *a*). Электрический и магнитный вектор волны взаимно перпендикулярны, поэтому на рисунке (рис. 10.3) изображен только вектор E . Частным случаем эллиптической поляризации является круговая поляризация.

При определении биологического действия излучения поляризация падающих волн может иметь большое значение в том случае, когда биологический объект имеет несколько осей симметрии. Например, таким случаем является определение поглощенной мощности всем телом человека.

Если на границу двух сред с разными электрофизическими свойствами падает плоская волна, она разделяется на две волны: проходящую во вторую среду и отраженную.

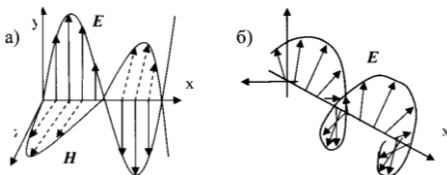


Рис. 10.4

В случае, когда плоская волна падает на плоскую поверхность, в каждой точке она преломляется одинаково, а во второй среде фронт волны продолжает оставаться плоским (рис. 10.4, *a*).

В реальных же условиях биологический объект очень редко бывает плоским и возникает необходимость рассмотрения преломления падающей волны на элементарных площадках поверхности. В этом случае фронт преломленной волны может иметь достаточно сложную трехмерную структуру. На рис. 10.4 *б* показана упрощенная схема преломления плоской волны сложной поверхностью.

В случае, когда волновой фронт преломленной волны не является плоским, в объекте возможно появление эффектов дифракции и интерференции, которые будут приводить к возникновению областей повышенной поглощенной мощности ЭМИ, так называемых «горячих точек». Возникновение «горячих точек», обусловленных интерференцией преломленной волны, было впервые обнаружено при исследовании математической модели биологического объекта сферической формы (например, головы человека).

Кроме отражения и преломления волн самим биообъектом, для оценки возможного биологического действия ЭМИ в некоторых случаях необходимо учитывать отражение волн от окружающих поверхностей.

Поглощение энергии ЭМИ в тканях определяется главным образом двумя процессами. Один из них заключается в колебании свободных зарядов (ионов), дру-

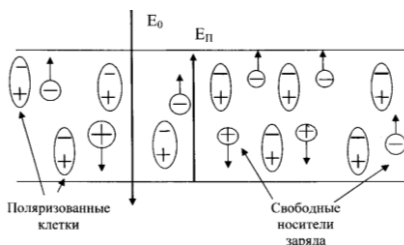


Рис. 10.5

гой — в колебании дипольных молекул. Первый эффект проводит к возникновению токов проводимости и связанных с электрическим сопротивлением среды потерь энергии, другой процесс — к потерям энергии за счет трения дипольных молекул в вязкой среде. Оба процесса в конечном итоге ведут к нагреву тканей. Величина потерь того и другого вида зависят от частоты и параметров ткани.

Поясним кратко физические причины изменения электрофизических свойств в указанных трех диапазонах частот.

1. Диапазон 0–100 кГц/ При воздействии на биологическую ткань постоянного поля она поляризуется (рис. 10.5). Проводимость ткани мала и обусловлена только ионными токами в межклеточной жидкости, возможен электрофорез таких заряженных объектов, как макромолекулы или клетки. Такая же ситуация сохраняется и при частотах менее 10 кГц. Мембраны клеток успевают перезарядаться за счет ионов внутри и вне клетки. Внутриклеточное содержимое надежно изолировано и не участвует в образовании ионного тока. Поэтому ткани даже с высоким содержанием воды ведут себя как диэлектрики и обладают низкой проводимостью.

С увеличением частоты падающего излучения мембраны не успевают полностью перезарядиться, вследствие чего емкостное сопротивление мембран падает, внутриклеточное содержимое вовлекается в процесс образования ионных токов, а проводимость клетки возрастает.

Зависимость глубины проникновения ЭМИ, источником которых является: 1) мобильный телефон стандарта CDMA-450; 2) мобильный телефон стандарта GSM-900; 3) мобильный телефон стандарта GSM-1800; 4) микроволновая печь от частоты излучения приведена на рис. 10.6.

Таким образом, с увеличением частоты падающей волны глубина проникновения ЭМИ в ткани снижается. Если для ЭМИ промышленной частоты (50 Гц) глубина проникновения составляет более 100 м, то микроволны с частотой 2,45 ГГц (например, излучение микроволновой печи) могут проникать в мышечную ткань на глубину

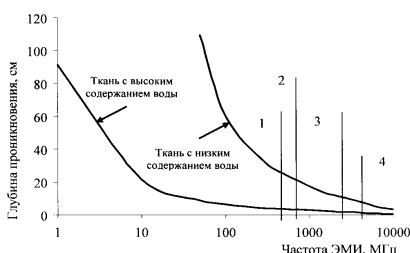


Рис. 10.6

около 2 см, а СВЧ-излучение с частотой выше 10 ГГц (например, оборудование для радиорелейной связи) только на несколько миллиметров, поглощается в основном кожей человека. Можно сказать, что для ЭМИ промышленной частоты тело человека является диэлектриком, а для ча-

стот порядка 108 Гц и выше (например, сотовая связь) хорошим проводником.

Любой живой организм является источником электромагнитных волн в достаточно широком диапазоне частот. Существует много методов регистрации биоэлектрической активности тканей, которые используются для решения прикладных задач в биологии и медицине, однако в большинстве случаев механизм генерации биопотенциалов неизвестен. Частоты основных источников собственных ЭМИ человека приведены в табл. 10.2.

В настоящее время электромагнитные излучения (ЭМИ) являются существенным экологическим фактором среды обитания человека. Это обусловлено тем, что многие техногенные источники излучения работают в диапазонах частот, не встречающихся в природе, и биологическая адаптация к ним отсутствует. Термин «электромагнитная загрязненность», вполне отражают существующую ситуацию.

Таблица 10.2

Частота(Гц)	Характеристика излучения
Биоэлектрические потенциалы мозга	
0,5–3	Дельта-ритм, амплитуда – 500–1000 мкВ. Проявляется в глубоком сне, у детей до 10 лет и во время бодрствования
3–7	Тета-ритм, амплитуда – 140–250 мкВ. Связан с эмоциями, усиливается при их возникновении
8–13	Альфа-ритм, амплитуда – 0–120 мкВ. Амплитуда зависит от внешних раздражений (болевых, звуковых, тактильных и др.). Основной ритм взрослого человека
14–40	Бета-ритм, амплитуда – 5–50 мкВ. Основной ритм взрослого человека
40–100 и выше	Гамма-ритм. Регистрируется при значительном возбуждении, выполнении умственной работы
Электромагнитные излучения (диапазон 10^{-2}–10^{12} Гц)	
10^{-2} – 10^4	Регистрируются на расстоянии от 1 мм до 1 м от поверхности тела человека.
10^4 – 10^8	Достоверные данные отсутствуют
10^9 – 10^{10}	Собственное СВЧ-излучение тела человека

$10^{11}-10^{12}$	Теоретические исследования показывают возможность генерации излучения этого диапазона за счет когерентных переходов в мембранных каналах между энергетическими уровнями, возникающими в электрическом поле мембранного потенциала. Также предполагается генерация электромагнитных волн частотой 1011 Гц за счет эффекта Джозефсона у клеточных белков.
Инфракрасное излучение ($10^{12}-10^{14}$ Гц)	
$10^{12}-10^{14}$	Любое нагретое тело излучает электромагнитные волны за счет преобразования энергии теплового движения частиц в энергию излучения. Органы и ткани человека, имеющие температуру 28–42 °С, испускают тепловое излучение в инфракрасном диапазоне. Максимум излучения (при температуре кожи 30 °С) лежит на длине волны 9,6 мкм.

При исследовании ЭМИ как фактора внешней среды можно выделить три основных направления: мониторинг; физические механизмы воздействия на биологические объекты (биологические ткани, кожа, мышцы, кровь, отдельные клетки, молекулы), биомедицинские механизмы воздействия, социально-экономические и психологические аспекты воздействия ЭМИ.

Принципиально не решенной фундаментальной научной проблемой остаются механизмы воздействия ЭМИ низкой и сверхнизкой интенсивности. Источники электромагнитного излучения активно используются для лечения и диагностики различных заболеваний.

Современное общество не может отказаться от бытовых электроприборов и других техногенных источников ЭМИ. Особой «популярностью» пользуются микроволновые печи, сотовые телефоны и компьютеры. При этом социальные последствия ухудшения электромагнитной обстановки могут быть даже более серьезными, чем объективные показатели ухудшения здоровья.

5. Методика измерений и обработка результатов

Для изучения свойств электромагнитных волн в данной работе используется комплект приборов. В него входит: блок СВЧ-генератора, блок приемника, диполь-диод (высокочастотный диод) на стойке, три пластины-экраны из дюралюминия, два бруска из дерева, парафиновая равнобедренная призма, два сетевые кабеля, четыре пластмассовые подставки для пластин-экранов и соединительные провода.

Блок СВЧ-генератора (microwave transmitter) (рис. 10.1) включается в сеть 220 В 50 Гц.

Основными компонентами блока являются электронная схема с излучающим диодом Гана на выходе. Диод Гана генерирует электромагнитные колебания частотой $11 \pm 1,1$ ГГц (длина волны $\lambda \approx 2,7$ см) и мощностью 10 мВт. Эти колебания генерируются в металлизированном волноводе и излучаются рупорной антенной. Внутри блока смонтирован модулятор – звуковой генератор.

На боковой стороне блока расположены органы управления (рис. 10.7): тумблер включения

питания (1); сигнал включения прибора (светодиод) (2); переключатель вида модулирующего сигнала (3): от встроенного звукового генератора дискретный (off-on), мелодичный (music) и непрерывный (1 кГц) от внешнего модулирующего устройства (out mod) и при высокочастотном сигнале постоянной амплитуды (EQ EMPL); гнездо для под-

ключения внешнего модулирующего устройства, например, звукового генератора или микрофона (4); гнездо выхода для соединения генератора с приемником (5) (на громкоговоритель приемника подается модулирующий низкочастотный сигнал); гнездо для прослушивания модулирующего сигнала с помощью головных телефонов (6).

Диполь-диод (высокочастотный диод) на стойке (рис. 10.8) предназначен для обнаружения (приема) высокочастотных электромагнитных колебаний. Выводы этого диода соединены с контактами гнезда, закрепленного в нижней части стойки.

Блок приемника (microwave receiver) (рис. 10.8) принимает модулированный высокочастотный сигнал, выделяет из него низкочастотный сигнал модулирующей частоты и преобразует его в звуковой.

По размеру и внешней конструкции блок приемника практически совпадает с блоком СВЧ-генератора. Отличить его можно по той стороне блока, на которой смонтированы органы управления (рис. 10.8): тумблер включения

питания (1); сигнал включения прибора (светодиод) (2); линейка светодиодов, где число светящихся диодов говорит об уровне выходного сигнала (3); регулятор уровня громкости выходного сигнала (4); кнопка включения звукового сигнала (5); гнездо для включения диполь-диода или генератора (6); гнездо выходного сигнала (например, для головных



Рис. 10.7

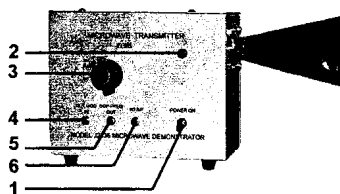


Рис. 10.8

телефонов, вольтметра с пределом измерения 10 В или осциллографа) (7). Блок приемника включается в сеть 220 В, 50 Гц.

Если переключатель генератора стоит в положении *EQ EMPL*, индикатором принимаемого сигнала на приемнике служит линейка светодиодов или внешнее устройство, подключенное к выходу блока приемника. Громкоговоритель при этом отключен. Если генератор и приемник соединить проводом, то излучение через рупорную антенну генератора автоматически отключается.

В комплект также входят два провода: двойной провод длиной 1,2 м с двухконтактными штепселями на концах, предназначенный для соединения диполь-диода с блоком приемника или для соединения генератора с приемником, и провод длиной 1,5 м с двухконтактным штепселем на одном конце и двумя зажимами типа «крокодил» на другом конце.

ВНИМАНИЕ! Следите за тем, чтобы во время работы генератора рупорная антенна не была направлена на человека долгое время, а также не направляйте ее в глаза.

В опытах по изучению свойств электромагнитных волн удобнее всего использовать встроенный в приемник громкоговоритель и по уменьшению и увеличению громкости судить о выходном сигнале приемника. На генераторе при этом лучше выставить непрерывный модулирующий сигнал (1 кГц).

ЗАДАНИЕ 1. Излучение, прием, прохождение, поглощение и поляризация электромагнитных волн

На лабораторном столе установите блок генератора и блок приемника рупорами навстречу друг другу. На модуляторе генератора установите непрерывный звуковой сигнал (1 кГц). Переключатель (5) на приемнике переведите в положение включения звукового сигнала (*on*). После включения обоих блоков в сеть приемник, воспроизведет непрерывный звуковой сигнал. Это значит, что модулированный сигнал, излучаемый генератором, принимается приемником. Если выключить тумблером (1) генератор, исчезает и приемный сигнал.

Передачу и прием сигналов можно наблюдать и при выключенном громкоговорителе приемника. Включают передатчик и приемник, регулятор громкости на приемнике устанавливают в такое положение, когда на линейке светодиодов загорается два-три диода. Далее тумблером генератора замыкают и размыкают цепь его питания и наблюдают прерывистое свечение диодов на приемнике.

Для наблюдения частичного ослабления или отсутствия принимаемого сигнала поместите между рупорами генератора и приемника препят-

ствия из различных материалов (деревянные бруски разной толщины, ладонь, металлическую пластину).

ЗАДАНИЕ 2. Отражение, преломление и полное внутреннее отражение электромагнитных волн

1. **Отражение.** Блок генератора и блок приемника установите рядом параллельно друг другу на расстоянии 2–3 см друг от друга рупорами в одну сторону вдоль крышки лабораторного стола. Включите генератор и приемник и убедитесь в том, что электромагнитные волны, излучаемые генератором, не принимаются приемником. На расстоянии 0,8–1 м от рупоров поставьте металлический экран и наблюдайте отчетливый прием отраженных волн. Уберите экран, и прием снова прекращается.

Соберите экспериментальную установку (рис. 10.9 или 10.10). Металлическую пластину разместите под некоторым углом к генератору и приемнику. Если пластину убрать, то прием прекращается. Измерьте несколько раз угол падения волны на пластину и угол отражения при различных положениях генератора и приемника.

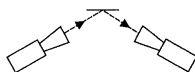


Рис. 10.9

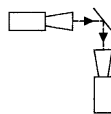


Рис. 10.10

2. Преломление и полное внутреннее отражение

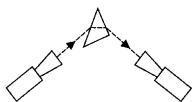


Рис. 10.11

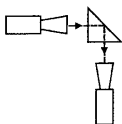


Рис. 10.12

Соберите по очереди экспериментальные установки (рис. 10.11–10.13).

Убедитесь, что при отсутствии парафиновой призмы приема нет. Установите парафиновую призму так, как показано на рис. 10.11–10.13,

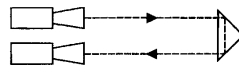


Рис. 10.13

и наблюдайте отчетливый прием электромагнитных волн.

ЗАДАНИЕ 3. Интерференция. Получение стоячих волн и измерение длины волны

1. **Интерференция.** Соберите установку (рис.10.15), подключая к приемнику диполь-диод.

Принимаемые диполем волны являются результатом наложения волн, излучаемых генератором и отраженных металлической пластиной. Перемещая металлическую пластину или диполь в направлении, указанном стрелками, наблюдайте несколько последовательных усилений и ослаблений принимаемого сигнала, что соответствует интерференционным максимумам и минимумам.

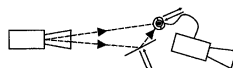


Рис. 10.14

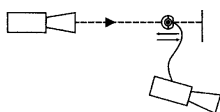


Рис. 10.15

2. **Получение стоячих волн и измерение длины волны.** Соберите

установку (рис. 10.15). Перемещая диполь между генератором и металлической пластиной, наблюдайте усиление и ослабление принимаемого сигнала, соответствующие пучностям и узлам стоячей волны, возникающей в результате сложения излучаемой и отраженной волн. Измерьте расстояние между соседними узлами или пучностями и найдите длину стоячей, а затем и бегущей

волны.

ЗАДАНИЕ 4. Дифракция электромагнитных волн

Соберите установку (рис. 10.16). Перемещая диполь вдоль линии, указанной стрелкой, убедитесь в том, что сигнал пропадает не сразу, а только когда диполь оказывается уже довольно глубоко в области тени за металлической пластиной.

нимумы по усилению и ослаблению сигнала, наблюдайте дифракцию от одной и двух щелей.

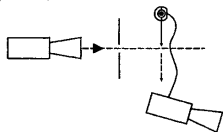


Рис. 10.17

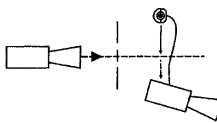


Рис. 10.18

ЗАДАНИЕ 7. Поляризация электромагнитных волн

Для наблюдения поляризации, блок генератора и блок приемника установите напротив друг друга на расстоянии 1–1,5 м рупорами в противоположные стороны вдоль крышки лабораторного стола. Если при выключенных приборах посмотреть в рупоры как блока передатчика, так и приемника, то можно увидеть высокочастотные диоды, расположенные в вертикальной плоскости. Эти диоды и являются излучающим и принимающим диполями соответственно. Это значит, что вектор напряженности электрического поля излучаемой генератором электромагнитной волны имеет вертикальное направление. Такое поле может перемещать заряды (вызывать ток) вдоль приемного диполя-диода, когда он расположен вертикально и не может этого сделать, когда он горизонтален. Это говорит о том, что электромагнитные волны поперечные, в них колебания вектора напряженности электрического поля происходят в одной плоскости, а вектора магнитной индукции в плоскости, перпендикулярной первой.

Устройство, выделяющие колебания, происходящие в одной плоскости, называют поляризатором. Устройство, выделяющее плоскость поляризованной волны, называют анализатором. В нашем случае диполь-диод передатчика излучает поляризованную электромагнитную волну, которую принимает диполь-диод приемника (анализатор), если они расположены в одной плоскости. Изменение плоскости анализатора, например на 90° , приводит к прекращению приема. Эти рассуждения легко проверяются опытом. Приемник и передатчик рупорами устанавливают навстречу друг другу на расстоянии 0,8–1 м и воспринимают принимаемый звуковой сигнал. Далее приемник берут в руки и, не изменяя ориентации прибора, медленно поворачивают его вокруг горизонтальной оси. При этом замечают, что громкость звука постепенно уменьшается и совсем исчезает, когда угол поворота приемника становится равным 90° .

Вопросы для самоконтроля

1. Каким образом можно увеличить энергию электромагнитного излучения?
2. Является ли звук электромагнитной волной?

3. Как должна двигаться заряженная частица, чтобы излучать электромагнитные волны?

4. Может ли электромагнитная волна распространяться в вакууме?

5. Приведите примеры использования электромагнитных волн различной частоты.

6. Каким образом в данной работе определяется длина электромагнитной волны?

7. Перечислите физические свойства среды, от которых зависит скорость распространения электромагнитных волн в этой среде.

8. Что такое стоячая электромагнитная волна и как она образуется?

9. Запишите уравнение плоской электромагнитной волны и поясните физический смысл величин, входящих в это уравнение.

10. Какая из физических характеристик электромагнитной волны не изменяется при ее переходе из одной среды в другую? Почему?

11. По результатам выполнения каждого задания сделайте соответствующие выводы.

Учебное издание

Малишевский Виктор Феликсович
Луцевич Александр Александрович
Сомонова Елена Юрьевна

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
И МАГНЕТИЗМ
Лабораторный практикум

Редактор *Л. М. Кореневская*
Технический редактор *А. В. Красуцкая*
Компьютерная верстка *Д. В. Головач*

Подписано в печать 06.07.2017. Формат 60×90 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 8,19. Уч.-изд. л. 5,73.
Тираж 100 экз. Заказ № 329.

Республиканское унитарное предприятие «Информационно-
вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/161 от 27.01.2014, № 2/41 от 29.01.2014.
Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск.