

Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»
(СибГУТИ)

И.В. Грищенко

А.Г. Иванова

В.В. Лубский

В.И. Машанов

МЕХАНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, МАГНЕТИЗМ, КОЛЕБАНИЯ

Учебное пособие по физике

Новосибирск

2024

Утверждено редакционно-издательским советом СибГУТИ

Рецензенты:

И.В. Грищенко, А.Г. Иванова, В.В. Лубский, В.И. Машанов. Механика, электричество, магнетизм, колебания.: Учебное пособие по физике/И.В. Грищенко, А.Г. Иванова, В.В. Лубский, В.И. Машанов: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики: каф. физики. – Новосибирск, 2024 г. – 96 с.

Учебное пособие Методическое пособие предназначено для ознакомления студентов 1 курса с основными понятиями механики, электричества, магнетизма и колебаний, для ознакомления с основными электроизмерительными приборами и служит руководством к выполнению соответствующих лабораторных работ. Учебное пособие предназначено для студентов направлений 11.01.01, 11.03.02, 11.03.03, 11.03.04, 09.03.01, 09.03.02, 02.03.02, 20.03.01, 11.05.01, 11.05.02, 10.03.01, 10.05.02.

© Грищенко И.В., Иванова А.Г., Лубский В.В., Машанов В.И., 2024

© Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
Лабораторная работа 1.1 ПРОВЕРКА ОСНОВНОГО ЗАКОНА ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА	6
Лабораторная работа 3.1 ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ	16
Лабораторная работа 3.2 ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ	28
Лабораторная работа 3.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА ИЗ МЕТАЛЛА	37
Лабораторная работа 4.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА	48
Лабораторная работа 5.1 ИЗУЧЕНИЕ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОНТУРЕ	57
Лабораторная работа 5.2 ИЗУЧЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СТРУНЫ	71
Приложение 1	80
Приложение 2	81
Приложение 3	82
Приложение 4	83
Приложение 5	86

ВВЕДЕНИЕ

1. ЦЕЛЬ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОСОБИЯ И ЕГО СТРУКТУРА

Выполнение лабораторных работ является одним из наиболее эффективных методов развития навыков самостоятельной работы. Лабораторные работы данного цикла являются первыми работами, с которых начинается знакомство студентов с реальными проявлениями физических законов, с электроизмерительными приборами. Целью данного пособия является ознакомление студентов с методикой измерения некоторых физических величин, получение навыков работы с электроизмерительными приборами, формирование умения проверять полученные результаты на физическую разумность и формирование умения делать мотивированные выводы по результатам произведенных измерений.

В данном пособии исследуются темы: Механика (Тема 1, работа 1.1), Электричество (Тема 3, работы 3.1, 3.2, 3.3), Магнитные явления (Тема 4, работа 4.1), Колебания (Тема 5, работа 5.1), Волны (Тема 5, работа 5.2)

Понимание и грамотное выполнение каждого последующего цикла лабораторных работ предполагает выполнение и защиту предыдущего, а также решение задач по данной теме.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

2.1 Прочитать теоретический материал, содержащийся в теоретическом введении к лабораторной работе и в рекомендованных учебниках.

2.2 Составить отчет, содержащий следующие разделы: а) титульный лист (смотрите [Приложение 1](#)); б) цель работы; в) краткая теория, которая включает в себя: основные определения и изучаемые законы, обоснование использования законов для вывода расчетной формулы, вывод расчетной формулы; г) описание лабораторной установки, включающее в себя схему установки с расшифровкой названий основных элементов. Рисунки и чертежи делаются карандашом с использованием чертежных инструментов; д) список рабочих формул; е) заготовки таблиц для занесения в них измеряемых и расчетных величин с указанием размерности этих величин. Рамки таблиц чертятся карандашом, по линейке.

2.3 Для отчетов должна быть отдельная тетрадь в клетку, отчеты пишутся «от руки».

2.4 Получить допуск к работе. Знать и уметь объяснить: а) какое явление изучается и как; б) основные элементы установки; в) что измеряется, и что рассчитывается по экспериментальным данным; г) какие зависимости и законы исследуются, какие графики необходимо построить в данной работе и примерный вид этих графиков.

2.5 Прodelать измерения и рассчитать результаты одного измерения полностью (расчеты привести после таблицы с обязательным переводом всех величин в СИ).

2.6 Обязательно отметить снятые измерения у преподавателя, проводившего занятие. Без отметки преподавателя работа считается невыполненной.

3. ЗАЩИТА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

3.1 Должны быть полностью произведены все измерения, выполнены все расчеты, и все данные должны быть занесены в таблицы.

3.2 Должны быть построены графики с указанием физических величин и размерностей. Если требуется сравнение экспериментальных данных с теоретическими, то соответствующий график теоретической зависимости строится на том же графическом поле. Графики должны быть построены карандашом с использованием чертежных инструментов, размер графика не может быть меньше 12 см x 12 см. Графики выполняются на масштабной координатной бумаге («миллиметровка»). Должны быть рассчитаны погрешности полученных величин, с использованием формул, приведенных в разделе «ЗАДАНИЕ». Правила построения графиков приведены в [Приложении 5](#).

3.3 В конце отчета должен быть **записан вывод** (краткое резюме по экспериментальным результатам, графическим зависимостям и результатам расчетов).

3.4 После вывода должны быть письменно выполнены ответы на контрольные вопросы.

3.5 Должны быть решены **задачи**, указанные преподавателем. Обычно номера задач соответствуют номеру бригады.

3.6 Должна пройти защита непосредственно у преподавателя результатов проделанной работы.

3.7 Студент, правильно и полностью выполнивший лабораторную работу, правильно и полностью оформивший отчет, правильно письменно ответивший на все контрольные вопросы, правильно решивший 2 задачи, может претендовать на оценку «удовлетворительно» **без устной защиты работы** у преподавателя.

3.8 Обязательно требуется отметить зачтенную работу у преподавателя, проводившего занятие. Без отметки преподавателя работа считается незащищенной!

Лабораторная работа 1.1

ПРОВЕРКА ОСНОВНОГО ЗАКОНА ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить основной закон динамики вращательного движения.
2. Определить собственный момент инерции маятника Обербека (крестовины).
3. Исследовать зависимость момента инерции грузов на крестовине от расстояния.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Вращательным движением твердого тела называется такой вид движения, при котором каждая точка тела описывает окружности вокруг некоторой прямой, называемой осью вращения. Основным законом динамики вращательного движения является связь момента силы \vec{M} с моментом инерции I и угловым ускорением β :

$$\vec{\beta} = \frac{\vec{M}}{I}, \quad (1.1.1)$$

Этот закон является отображением второго закона Ньютона для вращательного движения. Направление вектора углового ускорения $\vec{\beta}$ совпадает с направлением момента сил \vec{M} , который в свою очередь совпадает с осью вращения.

Момент инерции тела является мерой инертности тела во вращательном движении, аналогично тому, как масса тела является мерой его инертности при поступательном движении.

Для *материальной точки* момент инерции определяется как произведение массы на квадрат расстояния от оси вращения до точки:

$$I = mR^2 \quad (1.1.2)$$

Чтобы определить *момент инерции системы* из N материальных точек, вращающихся относительно некоторой неподвижной оси, нужно найти сумму моментов инерции всех материальных точек относительно этой оси:

$$I = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2, \quad (1.1.3)$$

где m_i — масса i -й точки, r_i — расстояние от i -й точки до оси вращения. Для *твердого тела* суммирование нужно проводить для всех точек тела, следовательно, сумма заменяется интегралом:

$$I = \int_m r^2 dm = \int_V \rho \cdot r^2 dV, \quad (1.1.4)$$

где $dm = \rho dV$ масса малого элемента объёма тела dV , ρ — плотность, r — расстояние от элемента dV до оси вращения.

Моментом силы относительно оси вращения называется векторное произведение величин:

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}], \quad (1.15)$$

где \vec{F} - сила, действующая на тело, \vec{r} - расстояние от оси вращения до точки приложения силы. Направление вектора \vec{M} перпендикулярно плоскости, в которой лежат вектора \vec{r} и \vec{F} в соответствии с правилом векторного произведения и совпадает с направлением поступательного движения правого винта при его повороте от \vec{r} к \vec{F} на угол, меньший π . Значение вектора \vec{M} может быть определено как (рис.1.1.1):

$$M = F \cdot r \cdot \sin \alpha, \quad (1.1.6)$$

где $r \cdot \sin \alpha = l$ плечо приложения силы \vec{F} .

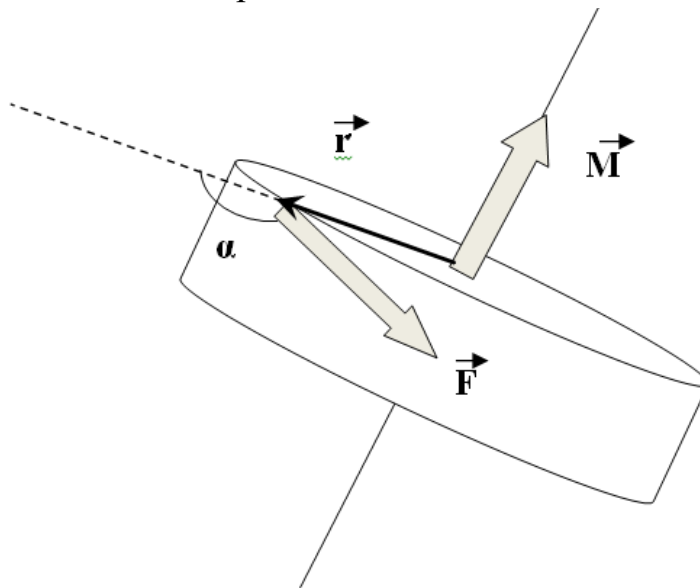


Рисунок 1.1.1 – Иллюстрация к определению момента силы

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Законы вращательного движения проверяются на установке, называемой маятником Обербека, который представляет собой крестовину, вращающуюся вокруг горизонтальной оси (рис. 1.1.2). На шкив радиуса r наматывается нить, к которой через блок прикреплен подвес. Подвес представляет собой цилиндр с прорезью для закрепления на нити. Подвес при опускании движется вдоль

вертикальной линейки, на которой отмечаются начальная и конечная точки движения. С помощью секундомера фиксируется точное время движения между этими точками.

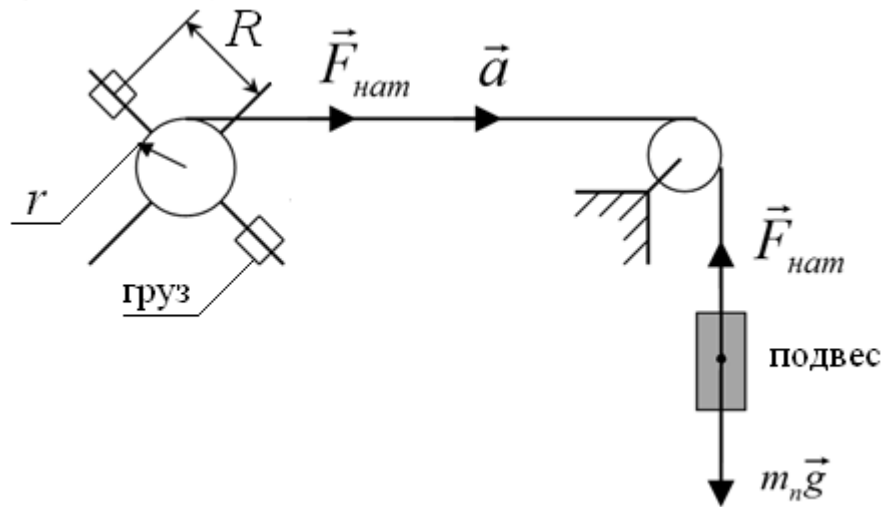


Рисунок 1.1.2. – Схема лабораторной установки

Перед выполнением лабораторной работы необходимо установить основные физические закономерности, наблюдаемые на маятнике Обербека.

Исходя из основного закона динамики вращательного движения (1.1.1), график зависимости углового ускорения от момента силы, приложенной к маятнику, должен представлять собой прямую линию.

Второй закон Ньютона, применимый к описанию движения подвеса m_n , запишется как:

$$m_n a = m_n g - F_{\text{нат}} , \quad (1.1.7)$$

Вращение маятника вызывает сила натяжения нити.

$$F_{\text{нат}} = m_n g - m_n a , \quad (1.1.8)$$

а момент силы натяжения нити:

$$M_{\text{нат}} = r \cdot F = r \cdot m_n (g - a) , \quad (1.1.9)$$

Если подвес падает из неподвижного положения с высоты h , то ускорение a определится из закона равноускоренного движения:

$$h = \frac{at^2}{2} \rightarrow a = \frac{2h}{t^2} , \quad (1.1.10)$$

где t – время опускания груза.

Поскольку нить намотана на шкив, то ускорение движения подвеса, равное ускорению движения нити, является также тангенциальным (касательным) ускорением для точек на ободе шкива. Тангенциальное ускорение при вращательном движении связано с угловым ускорением шкива формулой:

$$\beta = \frac{a}{r} , \quad (1.1.11)$$

Построив график зависимости β от $M_{нат}$, получим прямую линию (см. формулу (1.1.1)). Установление линейной зависимости углового ускорения от момента силы натяжения и является сутью проверки основного закона динамики вращательного движения. Через экспериментальные точки прямую проводят так, чтобы точки в среднем были одинаково расположены по обе стороны от проведенной линии (рис.1.1.3). Поскольку в основной закон динамики вращательного движения (1.1.1) входит равнодействующий момент сил, то прямая не будет проходить через начало координат. Она будет смещена по оси момента сил на величину момента силы трения $M_{тр}$ (рис.1.1.3).

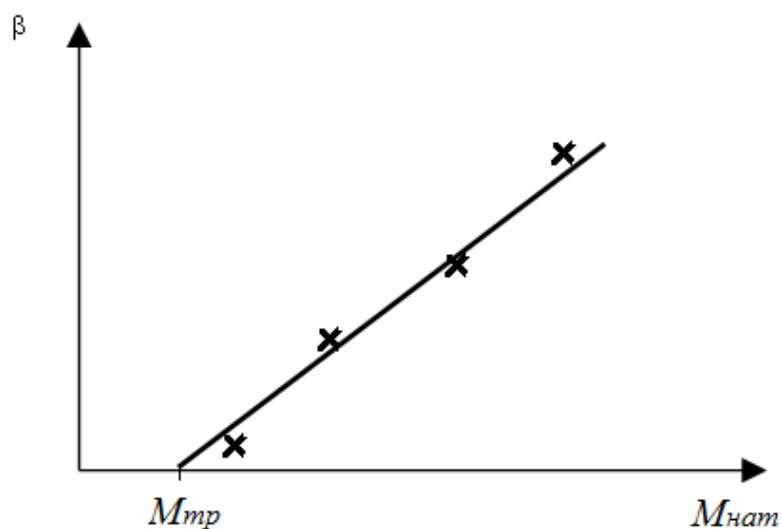


Рисунок 1.1.3 – Зависимость углового ускорения от момента силы натяжения нити

Момент инерции маятника Обербека определится из уравнения (1.1.1) как:

$$I_0 = \frac{M_{нат} - M_{тр}}{\beta}, \quad (1.1.12)$$

Если на крестовине маятника не находятся грузы, то формула (1.1.12) позволяет определить собственный момент инерции маятника I_0 . Если же на крестовине маятника закреплены грузы, то по этой же формуле (1.1.12) определяется момент инерции маятника с грузами I . Исходя из формулы (1.1.2), момент инерции материальной точки прямо пропорционален квадрату расстояния от точки до оси вращения. Если считать грузы на спицах крестовины материальными точками, то график зависимости момента инерции грузов от квадрата расстояния до оси вращения должен быть линейным. Установление линейной зависимости момента инерции грузов от квадрата расстояния до оси вращения является одной из целей работы. Поскольку момент инерции тела – величина аддитивная, то момент инерции маятника с грузами I равен сумме момента инерции крестовины I_0 и момента инерции грузов $I_{гр}$. Отсюда момент инерции грузов равен:

$$I_{гр} = I - I_0, \quad (1.1.13)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На фотографии (рис. 1.1.4) изображен маятник Обербека.

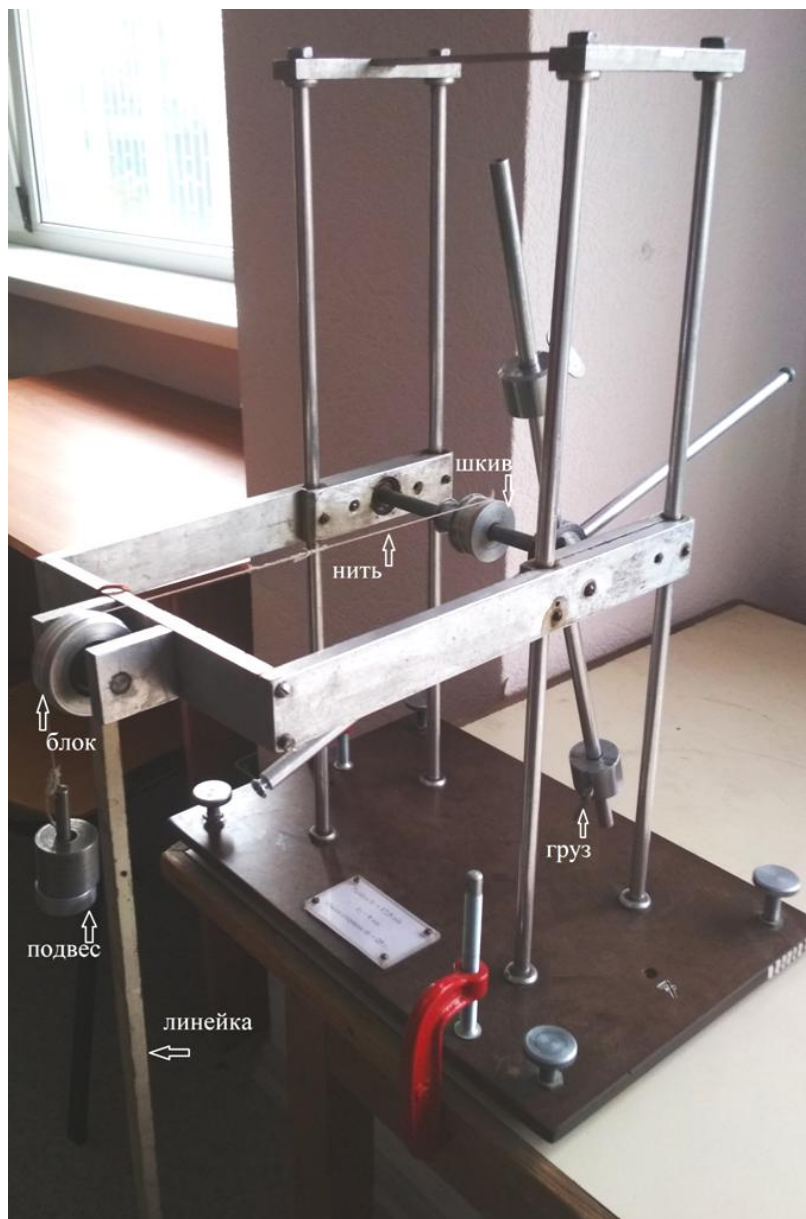


Рисунок 1.1.4 – Экспериментальная установка

Шкив представляет собой два диска разных радиусов, закрепленных на одной оси. Это позволяет менять момент силы натяжения нити, наматывая нить либо на шкив одного радиуса, либо на шкив другого радиуса. Радиус большего шкива 17,5 мм, радиус меньшего шкива 9 мм. На данной фотографии нить намотана на больший шкив, следовательно, $r = 0,0175$ м. Нить перекинута через блок. К концу нити прикреплен стержень массой 25 грамм, на который надеваются цилиндрические подвесы. Плоский цилиндр имеет массу 50 грамм, высокий цилиндр имеет массу 150 грамм. Таким образом, на фотографии общая масса подвеса $m_n = 0,025 + 0,05 + 0,150 = 0,225$ кг. Высота нахождения подвеса измеряется линейкой и определяется от уровня пола. На стержни маятника

можно поместить грузы, на данной фотографии на стержнях закреплены два груза. Расстояние R измеряется от середины оси вращения до центра инерции груза.

4. ЗАДАНИЕ

Выпишите отдельно рабочие формулы

Сводная таблица 1.1.

№ формулы	Формула	Величины, входящие в формулы
1.1.10	$a = \frac{2h}{t^2}$	a – ускорение, с которым опускается подвес h – высота опускания подвеса t – время опускания подвеса
1.1.11	$\beta = \frac{a}{r}$	β – угловое ускорение вращения маятника r – радиус шкива
1.1.9	$M_{\text{нат}} = r \cdot m_n(g - a)$	$M_{\text{нат}}$ – момент силы натяжения нити m_n – масса подвеса g – ускорение свободного падения
1.1.12	$I_0 = \frac{M_{\text{нат}} - M_{\text{тр}}}{\beta}$	I – момент инерции маятника $M_{\text{тр}}$ – момент силы трения
1.1.13	$I_{\text{гр}} = I - I_0$	$I_{\text{гр}}$ – момент инерции грузов на стержнях маятника I – момент инерции маятника вместе с грузами I_0 – момент инерции маятника без грузов (собственный момент инерции маятника)

I часть работы. **Определение собственного момента инерции крестовины I_0 и проверка основного закона динамики вращательного движения.**

Изменяя массу подвеса, измерить время падения подвеса. Определить ускорение движения подвеса по формуле (1.1.10). Определить угловое ускорение по формуле (1.1.11).

1. Запишите исходные данные:
высота опускания подвеса $h = \dots$ м,
радиус шкива $r = \dots$ м.
2. Для измерения выбираются: 1) один плоский цилиндр; 2) два плоских цилиндра; 3) высокий цилиндр; 4) высокий и плоский цилиндры, 5) высокий и два плоских цилиндра. Запишите массу подвеса m_n в первый столбик Таблицы 1.1, учитывая наличие стержня на конце нити.

- Измерьте три раза время падения каждой из выбранных масс подвесов. Время движения удобно считать до удара подвеса о пол.
- Данные измерений и расчетов ускорений движения моментов сил и моментов инерции занесите в Таблицу 1.1.1. Исходя из малых числовых значений линейного ускорения a , следует ускорение свободного падения брать с точностью до сотых единиц: $g = 9,81 \frac{м}{с^2}$.
- Постройте график зависимости углового ускорения маятника от момента силы натяжения нити $\beta = f(M_{нат})$.
- По графику определите момент силы трения.
- По графику, пользуясь формулой (1.1.12), определите собственный момент инерции крестовины.

Таблица 1.1.1 – Определение собственного момента инерции крестовины.

Масса подвеса $m_n, кг$	Время падения $t, с$	Среднее время $\langle t \rangle, с$	Ускорение $a, \frac{м}{с^2}$	Угловое ускорение $\beta, \frac{рад}{с^2}$	Момент силы натяжения нити, $M_{нат}, Н \cdot м$	Момент инерции крестовины $I_0, кг \cdot м^2$	Среднее значение момента инерции крестовины $\langle I_0 \rangle, кг \cdot м^2$

II часть работы. Установление зависимости момента инерции тела от квадрата расстояния до оси вращения.

- Выберите и зафиксируйте подвес.
- Запишите исходные данные:
высота опускания подвеса $h = \dots м$,
радиус шкива $r = \dots м$,
масса подвеса $m_n = \dots кг$

3. На крестовине маятника Обербека закрепите симметрично два груза. Расстояние от центра каждого груза до середины оси вращения запишите в таблицу 1.1.2.
4. Намотайте нить на шкив и трижды определите время опускания подвеса для нескольких различных положений грузов на крестовине маятника.
5. Определите момент инерции маятника с грузами по формуле (1.1.12), используя значение момента силы трения, найденное в первой части работы.
6. По формуле (1.1.13) определите момент инерции грузов на крестовине.
7. Данные измерений и расчетов занесите в таблицу 1.1.2.
8. Постройте график зависимости момента инерции маятника с грузами от квадрата расстояния грузов до оси вращения $I = f(R^2)$.

Таблица 1.1.2 – Зависимость момента инерции грузов от квадрата расстояния

Расстояние до оси вращения, $R, м$	Квадрат расстояния до оси вращения $R^2, м^2$	Время падения $t, с$	Среднее время $\langle t \rangle, с$	Ускорение $a, \frac{м}{с^2}$	Угловое ускорение $\beta, \frac{рад}{с^2}$	Момент силы натяжения нити, $M, Н \cdot м$	Момент инерции маятника с грузами $I, кг \cdot м^2$	Момент инерции грузов $I_{гр}, кг \cdot м^2$

III часть работы.

Определение погрешности измерения моментов инерции грузов на осях маятника (Смотрите Приложение 4, [расчет](#) погрешности для работы 1.1).

1. Выведите формулу и определите погрешность измерения момента инерции.
2. Сделайте вывод о результатах работы и точности измерений.

6. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Две таблицы с экспериментальными и расчетными данными.
2. График зависимости $\beta = f(M_{нат})$.
3. График зависимости $I = f(R^2)$.
4. Результаты вычисления погрешностей.
5. Выводы.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое движение называется вращательным? Приведите примеры. В каких случаях размером тел при рассмотрении законов движения можно пренебречь?
2. Провести аналогию между параметрами кинематики и динамики поступательного и вращательного движения. Указать единицы измерения основных величин
3. Дайте определение момента инерции твердого тела. Расскажите о теореме Штейнера.
4. Вывести формулу основного закона динамики вращательного движения.
5. Как в данной работе определить момент инерции маятника Обербека без грузов?
6. Как в данной работе можно определить массу грузов на стержнях маятника Обербека?
7. Как можно изменить момент инерции маятника Обербека?
8. Если увеличить высоту опускания подвеса, то какие величины изменяются и как (момент инерции маятника, время опускания подвеса, кинетическая энергия системы маятник-груз, угловое ускорение маятника)? Ответ обосновать.

8. ЗАДАЧИ

Нумерация задач: первая цифра – номер бригады, вторая цифра – номер задачи. Для получения численного ответа на вопросы задач, числовые значения всех величин необходимо взять по результатам измерений или расчетов, сделанных бригадой при выполнении лабораторной работы 1.1, часть 1.

- 1.1. Определить угол между направлением векторов тангенциально \vec{a}_τ и полного \vec{a} ускорений точки на ободе шкива r перед ударом подвеса о пол для опыта с массой подвеса $m_n = 175$ г.
- 1.2. Определить, во сколько раз отличается кинетическая энергия крестовины маятника Обербека при ударе подвеса о пол в случаях использования массы подвеса $m_{n1} = 125$ г и $m_{n2} = 225$ г.
- 2.1. Определить угловую скорость ω вращения крестовины маятника Обербека и линейную скорость v движения подвеса перед ударом о пол, если масса подвеса $m_n = 125$ г.
- 2.2. Определить, во сколько раз отличается кинетическая энергия подвеса при ударе подвеса о пол в случаях использования массы подвеса $m_{n1} = 75$ г и $m_{n2} = 175$ г.

3.1. Определите число оборотов крестовины маятника Обербека за время движения подвеса массой и $m_n = 75 \text{ г}$.

3.2. Определите момент импульса L крестовины маятника Обербека перед ударом подвеса о пол в двух случаях: при массе подвеса $m_{n1} = 75 \text{ г}$ и $m_{n2} = 175 \text{ г}$. Проанализируйте полученный результат.

4.1. Определите нормальное ускорение точки, расположенной на спице крестовины на расстоянии 20 см от центра оси вращения, перед ударом подвеса о пол, если масса подвеса $m_n = 175 \text{ г}$.

4.2 По графику зависимости углового ускорения от момента силы натяжения нити определите момент силы трения. Определите работу силы трения в случае использования массы подвеса $m_n = 125 \text{ г}$.

5.1 Определите полное ускорение точки на ободе шкива r при массе подвеса $m_n = 225 \text{ г}$ перед ударом подвеса о пол. Как изобразить направление вектора \vec{a} ?

5.2 Определите импульс закрепленного на нити подвеса перед его ударом о пол. Масса подвеса $m_n = 175 \text{ г}$.

6.1. Определите угол поворота φ спицы крестовины маятника Обербека за время движения t подвеса массой 125 г .

6.2. Используя закон сохранения энергии, определите работу силы трения за время движения подвеса массой $m_n = 225 \text{ г}$.

9 ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с. Глава 3, §§16 – 19.
2. Лисейкина Т.А. Курс физики. Раздел 1. Механика [Текст]: учеб. пособие / Т.А. Лисейкина, Т.Ю. Пинегина, А.Г. Черевко ; Сиб.гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Новосибирск : СибГУТИ, 2007. – 122с.
3. Черевко А.Г. Расчет неопределенности результатов измерений в физическом эксперименте [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Черевко ; Сиб.гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Новосибирск : СибГУТИ, 2008. - 72 с.

Лабораторная работа 3.1

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить основные электроизмерительные приборы, определить их основные характеристики, освоить методику измерения с помощью этих приборов.
2. Исследовать зависимость силы тока от напряжения на резисторе.
3. Используя амперметр и вольтметр, определить величину неизвестного сопротивления.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Электроизмерительные приборы широко применяются при различных измерениях в электрических цепях. Приборы различаются по назначению: амперметры, вольтметры, ваттметры и др. Мы рассмотрим лишь аналоговые (стрелочные) вольтметры и амперметры.

Амперметр служит для измерения силы тока и включается в цепь последовательно. Вольтметр предназначен для измерения напряжения на участке цепи и включается параллельно этому участку.

При включении приборы не должны вносить заметных изменений в цепь, чтобы не изменять токи и напряжения. Это значит, что амперметр должен обладать малым сопротивлением, а вольтметр большим по сравнению с сопротивлением цепи.

Основными характеристиками электроизмерительных приборов являются: система, класс точности, пределы измерения и цена деления, которые обычно обозначены на шкале условными знаками.

Электроизмерительный прибор состоит из подвижной и неподвижной частей. По величине перемещения подвижной части (рамки со стрелкой) судят о величине измеряемого тока или напряжения. Наиболее распространенными являются системы: магнитоэлектрическая (обозначение на шкале \square) и электромагнитная (обозначение на шкале ∇).

Работа приборов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии поля постоянного магнита и подвижной катушки, по которой течет измеряемый ток. Достоинством приборов такого типа являются: высокая чувствительность и точность, равномерная шкала, малое потребление мощности, но применять их можно только в цепях постоянного тока.

В приборах электромагнитной системы измеряемый ток протекает по неподвижной катушке и создает магнитное поле, в которое втягивается ферромагнитный сердечник, намагниченный этим полем. Достоинства этого типа: простота и надежность, возможность измерения как постоянных, так и переменных токов. Недостатки – невысокая чувствительность, неравномерная

шкала. В связи с неравномерной шкалой, измерения в начале шкалы имеют очень высокую погрешность, и начальная часть шкалы прибора считается нерабочей.

Рассмотрим некоторые характеристики электроизмерительных приборов.

2.1 Класс точности

Любой электроизмерительный прибор дает при измерении некоторую погрешность. Пусть \bar{A} – истинное значение измеряемой величины, A – показание прибора. Тогда разность:

$$\Delta A = \bar{A} - A, \quad (3.1.1)$$

определяет абсолютную погрешность измерения прибора. Относительной погрешностью называется отношение:

$$\delta A = \frac{\Delta A}{\bar{A}} \cdot 100\%, \quad (3.1.2)$$

Все электроизмерительные приборы снабжены указателем класса точности, обычно это жирные цифры на шкале прибора, разделенные запятой. Класс точности соответствует приведенной погрешности прибора (γ):

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_m} \cdot 100\%, \quad (3.1.3)$$

и определяет максимальную абсолютную погрешность прибора ΔA , которая считается одинаковой для всех точек шкалы:

$$\Delta A = \frac{\gamma \cdot A_m}{100}, \quad (3.1.4)$$

В приведенных формулах A_m – максимально возможное показание прибора, предел измерений.

Ясно, что при малом отклонении стрелки прибора точность измерения уменьшается. Для повышения точности рекомендуется проводить измерения таким образом, чтобы стрелка находилась во второй половине шкалы прибора.

Пример

Вольтметр со шкалой 200 В , класс точности 2.0 , при измерении дает показание 80 В . Максимальная абсолютная погрешность прибора, связанная с его классом точности, в соответствии с формулой (3.1.4), равна:

$$\Delta U = 0,02 \times 200 = 4\text{ В}.$$

Относительная погрешность (2) равна:

$$\delta U = \frac{4 \times 100\%}{80} = 5\%.$$

Результат измерения записывается так:

$$\Delta U = 80 \pm 4\text{ В}, \quad \delta U = 5\%.$$

2.2 Чувствительность и цена деления

Важной характеристикой прибора является цена деления — величина, равна значению измеряемой величины при отклонении стрелки прибора на одно деление шкалы и может быть рассчитана по формуле:

$$C = \frac{A_m}{N}, \quad (3.1.5)$$

где N — полное число делений шкалы.

С другой стороны, цена деления обратная чувствительности:

$$C = \frac{1}{S}, \quad (3.1.6)$$

Зная цену деления и число делений, на которые отклонилась стрелка n_c , легко рассчитать значение измеряемой величины:

$$A = C \cdot n_c, \quad (3.1.7)$$

Чувствительностью измерительного прибора называется отношение линейного перемещения стрелки прибора к измеряемой величине, вызвавшей это перемещение

$$S = \frac{N}{A_m}, \quad (3.1.8)$$

Приборы с более высокой чувствительностью позволяют измерить меньшие абсолютные значения физических величин.

Пример

При измерении напряжения, равного $2,5V$, стрелка прибора переместилась на 50 делений. Следовательно, чувствительность прибора равна $S = \frac{50}{2,5} = 20 \frac{\text{дел}}{V}$, а цена деления $C = \frac{1}{20} = 0,05 \frac{V}{\text{дел}}$.

2.3 Пределы измерений

Значение измеряемой величины, при котором стрелка прибора отклонится до конца шкалы, называется пределом измерения. Электроизмерительные приборы могут иметь несколько пределов измерений (многопредельные приборы), осуществляемых с помощью переключателя пределов. НЕОБХОДИМО ПОМНИТЬ, что цена деления многопредельных приборов на различных пределах измерений — различна.

Многопредельность амперметра достигается его шунтированием. Шунт — дополнительное сопротивление, подключаемое параллельно к амперметру (рис. 3.1.1).

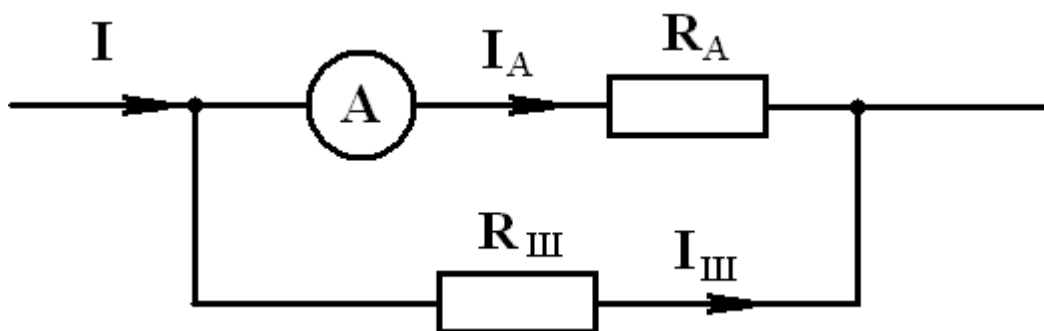


Рисунок 3.1.1 – Шунтирование амперметра

При шунтировании только часть измеряемого тока I течет через амперметр (I_A), остальной ток идет через шунт. Пусть надо измерить ток I в n раз больший, чем максимально допустимый через прибор ток (рис. 3.1.1).

Здесь R_A — внутреннее сопротивление амперметра. Определим сопротивление шунта $R_{ш}$, пользуясь законом Ома. Напряжение на шунте и амперметре одинаково, т. к. они соединены параллельно:

$$I_{ш} \cdot R_{ш} = I_A \cdot R_A ,$$

Полный ток в цепи равен сумме токов:

$$I = I_A + I_{ш} ,$$

По условию требуется, чтобы:

$$n = \frac{I}{I_A} ,$$

Окончательно находим:

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n - 1} , \quad (3.1.9)$$

Следовательно, для увеличения предела измерения в n раз сопротивление шунта должно быть в $(n - 1)$ раз меньше сопротивления амперметра.

Предел измерения вольтметра изменяют с помощью дополнительного сопротивления R_D , подключаемого последовательно к вольтметру (рис. 3.1.2).

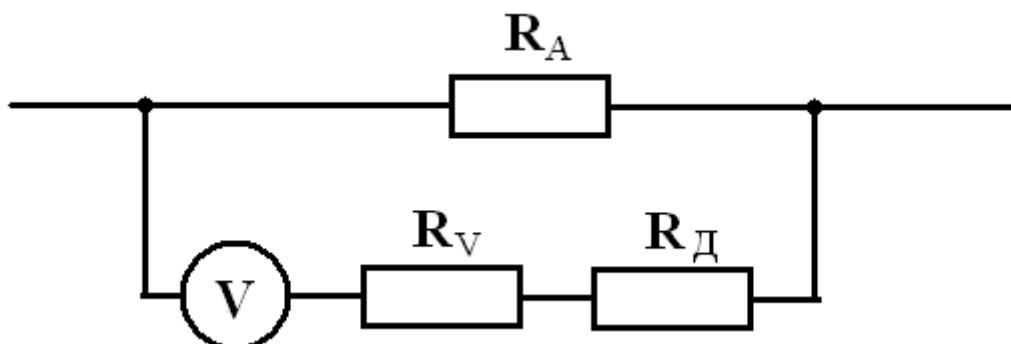


Рисунок 3.1.2 – Изменение пределов измерений вольтметра

Здесь R_V — внутреннее сопротивление вольтметра, R — сопротивление нагрузки, на котором измеряется напряжение. Для того, чтобы измерить с помощью вольтметра напряжение, в n раз превышающее максимально

измеряемое вольтметром, нужно подключить дополнительное сопротивление, равное:

$$R_D = R_V \cdot (n - 1) , \quad (3.1.10)$$

Эта формула может быть получена из соображений, аналогичных при рассмотрении шунтирующего сопротивления к амперметру. Следовательно, для увеличения предела измерения вольтметра в n раз, последовательно к нему нужно подключить дополнительное сопротивление в $(n - 1)$ раз большее внутреннего сопротивления вольтметра.

Рассмотрим простой метод определения сопротивления проводника с помощью вольтметра и амперметра. Измеряя величину тока, протекающего по сопротивлению, и напряжение на нем, можно рассчитать величину сопротивления по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I} , \quad (3.1.11)$$

Для повышения точности обычно проводится несколько измерений и строится график зависимости силы тока от напряжения (вольтамперная характеристика сопротивления, ВАХ), (рис.3.1.3). Через экспериментальные точки прямую проводят так, чтобы точки в среднем были одинаково расположены по обе стороны от проведенной линии.

Относительную погрешность определения сопротивления находим по формуле (см. Приложение 4):

$$\delta R = \left(\sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U} \right)^2} \right) \cdot 100\% , \quad (3.1.12)$$

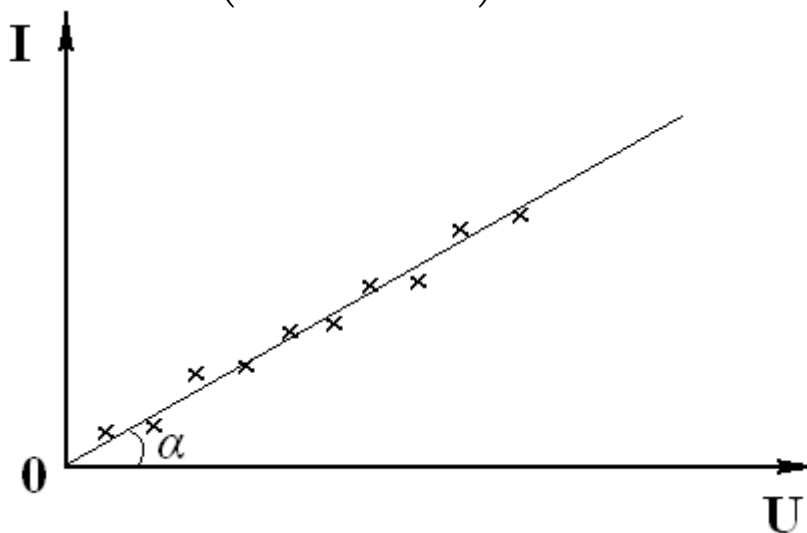


Рисунок 3.1.3 – ВАХ резистора

Абсолютные погрешности при измерении силы тока и напряжения определяются классом точности приборов. В качестве I и U в формуле (3.1.12) можно взять наибольшие измеренные величины, если экспериментальные

точки отклоняются от прямой не более чем на $\frac{\Delta I}{I}$ и $\frac{\Delta U}{U}$. Абсолютную погрешность расчета сопротивления определим следующим образом:

$$\Delta R = \frac{R_{\text{изм}} \cdot \delta R}{100}, \quad (3.1.13)$$

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из регулируемого источника постоянного напряжения с подключенными к нему многопредельными амперметром и вольтметром, и неизвестным сопротивлением. Она смонтирована на электрическом стенде согласно схеме, рис. 3.1.4.

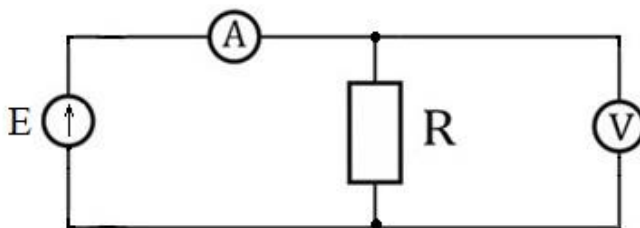


Рисунок 3.1.4 – Схема экспериментальной установки

4. ЗАДАНИЕ

Выпишите отдельно рабочие формулы

Сводная таблица 3.1

№ формулы	Формула	Величины, входящие в формулы
3.1.5	$C = \frac{A_m}{N}$	C – цена деления прибора A_m – максимально возможное показание прибора, предел измерений. N – полное число делений шкалы
3.1.4	$\Delta A = \frac{\gamma \cdot A_m}{100}$	ΔA – абсолютная максимальная погрешность прибора γ – класс точности прибора A_m – максимально возможное показание прибора, предел измерений.
3.1.6	$S = \frac{1}{C}$	S – чувствительность прибора

3.1.11	$R = \frac{U}{I}$	R – сопротивление резистора U – падение напряжения на резисторе I – сила тока, протекающего через резистор
3.1.12	$\delta R = \left(\sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2} \right) \cdot 100\%$	δR – относительная погрешность измерения сопротивления резистора ΔI – абсолютная погрешность измерения силы тока ΔU – абсолютная погрешность измерений падения напряжения U – падение напряжения на резисторе I – сила тока, протекающего через резистор
13	$\Delta R = \frac{R_{\text{изм}} \cdot \delta R}{100}$	ΔR – абсолютная погрешность измерения сопротивления $R_{\text{изм}}$ – среднее экспериментальное значение сопротивления

I часть работы. Изучение аналоговых электроизмерительных приборов

Таблица 3.1.1. – Характеристики аналоговых электроизмерительных приборов (количество строчек задает преподаватель, данная таблица оформлена для одного прибора)

Наименование прибора	Система	Класс точности	Множитель	Предел измерений	Число делений шкалы	Цена деления	Чувствительность	Абсолютная погрешность

Заполнить таблицу характеристик для приборов, указанных преподавателем. Смотри ниже пример заполнения таблицы для одного прибора (рис. 3.1.5).

Пример заполнения таблицы для одного прибора.

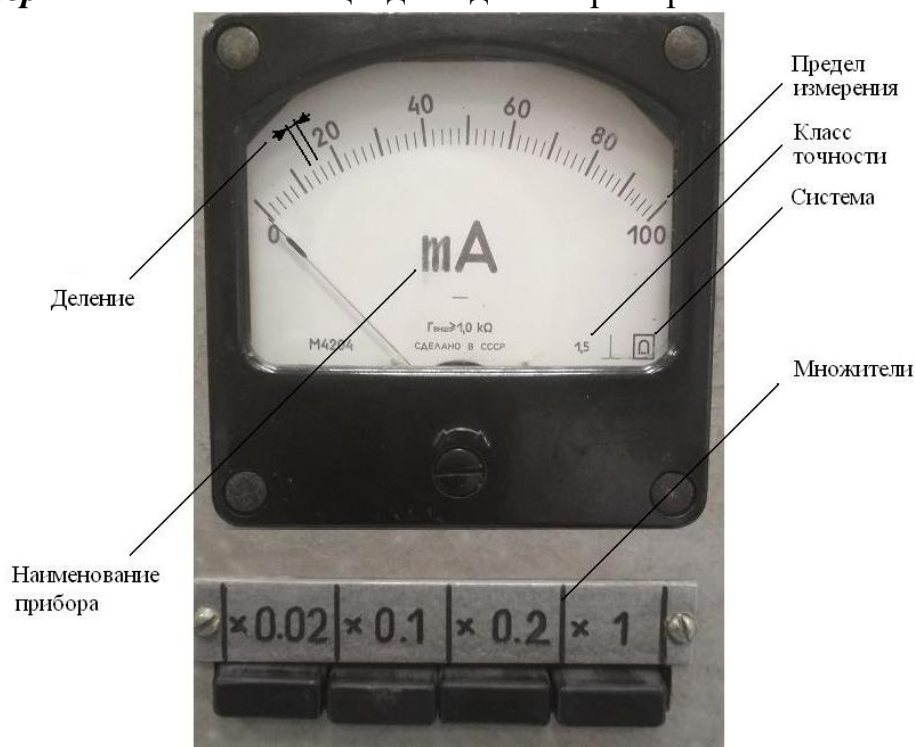


Рисунок 3.1.5 – Пример описания прибора

Таблица 3.1.2. – Пример описания прибора

Наименование прибора	Система	Класс точности	Множитель	Предел измерений	Число делений шкалы	Цена деления	Чувствительность	Абсолютная погрешность
Миллиамперметр	Магнитоэлектрическая	1,5	x0,02	2 mA	50	0,04 mA/дел	25 дел/мА	0,03 mA
			x 0,1	10 mA		0,2 mA/дел	5 дел/мА	0,15 mA
			x 0,2	20 mA		0,4 mA/дел	2,5 дел/мА	0,3 mA
			x 1	100 mA		2 mA/дел	0,5 дел/мА	1,5 mA

II часть. Определение сопротивления резистора.

1. Вместе с преподавателем подключите сопротивление к регулируемому низковольтному источнику напряжения согласно схеме Рис. 3.1.4 и самостоятельно выберите пределы измерения вольтметра и амперметра.
2. Исследуйте зависимость силы тока от напряжения на сопротивлении, данные занесите в таблицу 3.1.3. Для этого плавно увеличивайте напряжение, начиная с нуля, на равные величины и измеряйте соответствующие значения силы тока. Экспериментальных точек должно быть не менее 10.
3. Постройте график зависимости силы тока от напряжения на сопротивлении (ВАХ резистора). Через экспериментальные точки проведите прямую таким образом, чтобы количество точек по обе стороны от нее было приблизительно одинаковым. (см. рис. 3.1.3).
4. По формуле (3.1.11) рассчитайте сопротивление (примеры всех расчетов должны быть в отчете).
5. Рассчитайте погрешности определения сопротивления по формулам (3.1.12) и (3.1.13) (примеры всех расчетов должны быть в отчете).
6. Запишите конечный результат в виде:

$$R = \langle R_{\text{эсп}} \rangle \pm \Delta R, \text{ Ом}, \delta R = \dots \%$$

Таблица 3.1.3 – ВАХ резистора

U		I		$\Delta U, \text{ В}$	$\Delta I, \text{ mA}$	$R_{\text{эсп}}, \text{ Ом}$
дел.	В	дел.	mA			
5						
10						
15						
20						
25						
...						
...						
...						
...						
...						

Сделайте вывод по проделанной лабораторной работе.

5. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. 2 таблицы.
2. График вольтамперной характеристики резистора $I = f(U)$.

3. Результаты расчета сопротивления резистора.
4. Результаты вычисления погрешностей.
5. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте схемы подключения к измеряемой цепи амперметра и вольтметра.
2. Каким условием должны удовлетворять внутренние сопротивления амперметра и вольтметра?
3. Вольтметром на 15 В (класс точности $1,0$) измерено напряжение $6,0\text{ В}$. Каковы абсолютная и относительная погрешности измерения?
4. Определите цену деления и чувствительность амперметра на 30 мА , шкала которого имеет 500 делений.
5. Можно ли использовать миллиамперметр на 10 мА для измерения силы тока 10 А ? Внутреннее сопротивление прибора 50 Ом . Аргументы подкрепите расчетами.
6. Проанализируйте возможные погрешности при измерении сопротивления по схеме рис. 3.1.4. Как можно уменьшить влияние этих погрешностей?

7. ЗАДАЧИ

(нумерация задач: первая цифра- номер бригады, вторая цифра- номер задачи)

- 1.1. Амперметр с сопротивлением $R_a=0,16\text{ Ом}$ зашунтирован сопротивлением $R = 0,04\text{ Ом}$. Амперметр показывает ток $I_0 = 8\text{ А}$. Найти ток I в цепи. (40 А).
- 1.2. Гальванический элемент с ЭДС $\varepsilon=1,5\text{ В}$ и внутренним сопротивлением 1 Ом замкнут на внешнее сопротивление 4 Ом . Найти силу тока в цепи и падение напряжения на внешнем сопротивлении. ($0,3\text{ А}$; $1,2\text{ В}$).
- 2.1. Внутреннее сопротивление источника питания в n раз меньше внешнего сопротивления R , на который замкнут источник с ЭДС ε . Найти силу тока в цепи и падение напряжения на внешнем сопротивлении. ($\frac{\varepsilon n}{(n+1)R}$; $\frac{\varepsilon n}{(n+1)}$).
- 2.2. Вывести формулу для определения дополнительного сопротивления вольтметра и применить ее для решения следующей задачи. Вольтметр с внутренним сопротивлением 2500 Ом показывает напряжение 125 В . Определить дополнительное сопротивление, при подключении которого вольтметр показывает 100 В . (625 Ом).
- 3.1. Два одинаковых источника тока ($\varepsilon=1,5\text{ В}$, $r= 0,4\text{ Ом}$) соединены параллельно и замкнуты на внешнее сопротивление 1 Ом . Определить силу тока в цепи. ($1,2\text{ А}$).

3.2. Два одинаковых источника тока ($\varepsilon=1,5B$, $r=0,4\text{ Ом}$) соединены последовательно и замкнуты на внешнее сопротивление 1 Ом . Определить силу тока в цепи. ($1,7\text{ А}$).

4.1. Миллиамперметр предназначен для измерения силы тока не более 10 мА . Что нужно сделать, чтобы миллиамперметр можно было использовать для измерения токов до 1 А ? Внутреннее сопротивление прибора $9,9\text{ Ом}$. ($0,1\text{ Ом}$).

4.2. Шесть элементов с ЭДС $\varepsilon=1,5B$ и внутренним сопротивлением $0,4\text{ Ом}$ каждый, соединены в батарею так, что по нагрузке $R=0,2\text{ Ом}$ протекает ток $5,6\text{ А}$. Как соединены элементы? (*параллельно*).

5.1. Вольтметр имеет сопротивление 200 Ом . Последовательно с ним включено дополнительное сопротивление 1000 Ом . Во сколько раз увеличилась цена деления вольтметра? (*в 6 раз*).

5.2. Найти падение потенциала в сопротивлениях R_1 , R_2 и R_3 (рис.3.1.7) и токи I_2 и I_3 в сопротивлениях R_2 и R_3 если через цепь протекает ток $I_1=3\text{ А}$. Сопротивления $R_1=R_2=4\text{ Ом}$, $R_3=2\text{ Ом}$. ($U_1=12B$, $U_2=U_3=4B$, $I_2=1\text{ А}$, $I_3=2\text{ А}$).

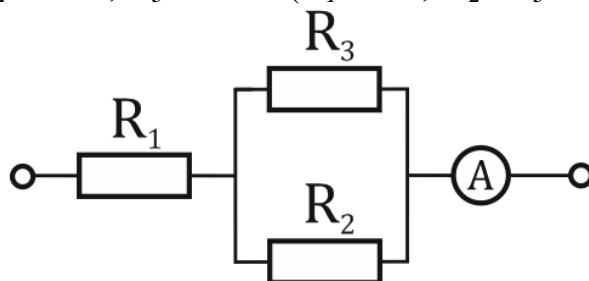


Рисунок 3.1.7 – К задаче 5.2

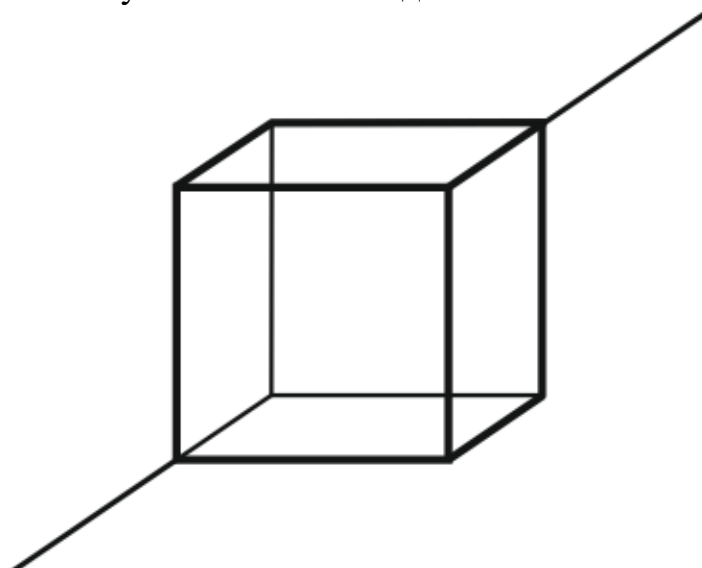


Рисунок 3.1.8 – К задаче 6.1

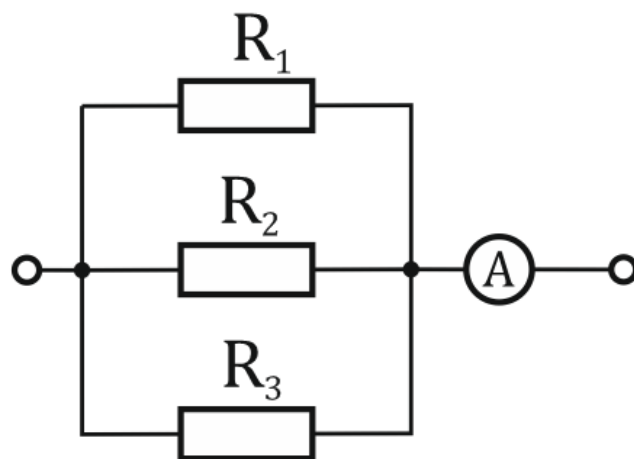


Рисунок 3.1.9 – К задаче 6.2

6.1. Вычислить сопротивление проволочного куба, если он включен в электрическую цепь, как показано на рис. 3.1.8. Сопротивление каждого ребра куба равно 1 Ом . ($\frac{5}{6}\text{ Ом}$).

6.2. Найти сопротивление R_1 (рис. 3.1.9), а также токи I_2 и I_3 в сопротивлениях R_2 и R_3 если через цепь протекает ток $I = 3\text{ А}$. Сила тока через сопротивление R_1 равна $I_1 = 1\text{ А}$. Сопротивления $R_2 = 4\text{ Ом}$, $R_3 = 2\text{ Ом}$. ($R_1 = 6,8\text{ Ом}$, $I_2 = 1,7\text{ А}$, $I_3 = 3,3\text{ А}$).

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с. Глава 11 §98-101, глава 15, §124.
2. Черевко А.Г. Расчет неопределенности результатов измерений в физическом эксперименте [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Черевко ; Сиб.гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Новосибирск : СибГУТИ, 2008. - 72 с.

Лабораторная работа 3.2

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Исследовать электростатическое поле, созданное двумя электродами
2. Графически изобразить сечение эквипотенциальных поверхностей
3. Графически изобразить силовые линии данного поля
4. Оценить величину напряженности электростатического поля в разных точках

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Любое заряженное тело создает в пространстве вокруг себя электрическое поле и может взаимодействовать с внешним электромагнитным полем. Основное свойство электрического поля: оно действует на помещенные в него электрические заряды с силой, пропорциональной величине заряда и не зависящей от скорости движения заряда. Поле, создаваемое неподвижными зарядами, называется **электростатическим**. Знание характеристик электрического поля требуется при работе с линиями связи, антеннами, резонаторами, полупроводниковыми приборами и другими устройствами.

Величину взаимодействия между зарядами определяет Закон Кулона, являющийся основополагающим для всей науки об электричестве, который был установлен еще в 1780 г.:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}, \quad (3.2.1)$$

Здесь q_1 и q_2 - абсолютные величины взаимодействующих зарядов, r - расстояние между ними, ϵ - диэлектрическая проницаемость, характеризующая среду между зарядами, $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная.

Электростатическое поле в каждой точке пространства характеризуется двумя величинами: напряженностью и потенциалом. Силовая характеристика поля — напряженность — векторная величина, численно равна и совпадает с силой, действующей на единичный точечный положительный заряд, помещенный в данную точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (3.2.2)$$

Из определения напряженности следует, что сила, действующая со стороны электрического поля на точечный заряд, равна:

$$\vec{F} = q\vec{E}, \quad (3.3.3)$$

и сонаправлена с вектором напряженности в случае положительного заряда, и противоположно направлена с вектором напряженности в случае отрицательного заряда. Единица измерения напряженности электрического поля: $\frac{В}{м}$

Исходя из закона Кулона и определения (3.2.1), легко рассчитать величину напряженности электрического поля точечного заряда q_0 :

$$F = \frac{q_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} , \quad (3.2.4)$$

Электрическое поле характеризуется также потенциалом – энергетической величиной, численно равной работе по переносу единичного, положительного, точечного заряда q из данной точки поля в бесконечность:

$$\varphi = \frac{A_{\infty}}{q} , \quad (3.2.5)$$

Потенциал измеряется в Вольтах: $1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$. Потенциал точечного заряда q_0 равен:

$$\varphi = \frac{q_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} . \quad (3.2.6)$$

Отметим, что потенциал – скалярная величина, которая может принимать и отрицательные значения. Физический смысл имеет величина, называемая разностью потенциалов. Разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ связана с работой сил электрического поля по перемещению точечного заряда из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 следующим образом:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -q\Delta\varphi , \quad (3.2.7)$$

где $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$

Работа по перемещению заряда в электростатическом поле не зависит от траектории перемещения, а определяется лишь начальным и конечным положением заряда.

Электростатическое поле принято графически изображать в виде силовых линий и эквипотенциальных поверхностей. Силовые линии электрического поля – это линии, проведенные в пространстве таким образом (рис.3.2.1), чтобы касательная к ним совпадала с направлением вектора \vec{E} в данной точке.

Эквипотенциальные поверхности – поверхности, во всех точках которой потенциал имеет одно и то же значение. Эти поверхности целесообразно проводить так, чтобы разность потенциалов между соседними поверхностями была одинаковой. Тогда по густоте эквипотенциальных поверхностей можно наглядно судить о значении напряженности поля в разных точках. Величина напряженности больше там, где гуще эквипотенциальные поверхности.

В качестве примера на рис. 3.2.1 приведено двумерное отображение электростатического поля.

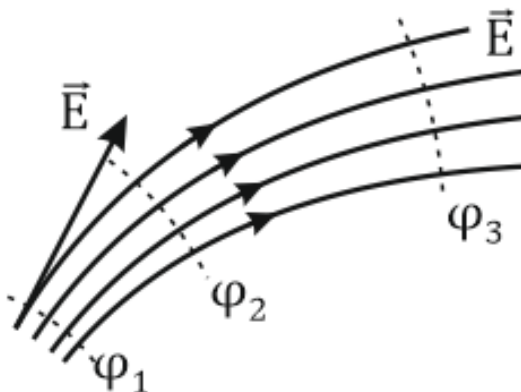


Рис. 3.2.1 – Силовые и эквипотенциальные линии

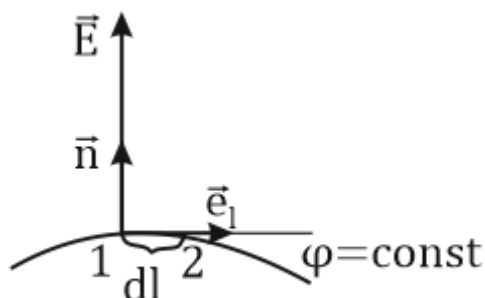


Рис. 3.2.2 – Перпендикулярность силовых линий эквипотенциальным поверхностям

Покажем, что в каждой точке вектор \vec{E} перпендикулярен эквипотенциальной поверхности и направлен в сторону уменьшения потенциала. Для этого рассчитаем работу по перемещению заряда q вдоль эквипотенциальной поверхности на расстояние dl (рис. 3.2.2). Такая работа равна нулю, поскольку определяется разностью потенциалов точек 1 и 2.

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = 0 ,$$

С другой стороны, работа записывается так:

$$dA = q \cdot E \cdot dl \cdot \cos(\vec{E}; \vec{dl}) , \quad (3.2.8)$$

Из формулы (3.2.8) следует, что косинус угла между векторами \vec{E} и \vec{dl} равен нулю и вектор \vec{E} перпендикулярен эквипотенциальной поверхности. За направление вектора \vec{dl} принято считать направление скорости перемещения положительного точечного заряда вдоль эквипотенциальной поверхности. Далее, переместим положительный заряд по нормали \vec{n} к эквипотенциальной поверхности в сторону уменьшения потенциала. В этом случае $d\varphi < 0$ и из формулы (3.2.8) следует, что $E_r > 0$. Значит, вектор \vec{E} направлен по нормали в сторону уменьшения потенциала.

Таким образом, свойства силовых линий следующие:

- 1) Начинаются на положительных зарядах, заканчиваются на отрицательных зарядах. В данной работе заряды располагаются на внешней поверхности металлических электродов.
- 2) Перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям, в том числе поверхностям электродов.
- 3) В тех областях поля, где силовые линии расположены ближе друг к другу, величина напряженности поля больше.
- 4) Направлены в сторону наиболее быстрого убывания потенциала.

Напряженность и потенциал — две характеристики электростатического поля. В общем случае для нахождения связи между ними рассчитаем работу при малом перемещении $d\vec{r}$ точечного заряда q в электрическом поле:

$$A = \vec{F} \cdot d\vec{r} ,$$

В соответствии с формулой (3.2.7) эта же работа равна:

$$dA = -q \cdot d\varphi , \quad (3.2.9)$$

Сопоставляя формулы (3.2.8) и (3.2.9) и учитывая выражение для силы (3.2.2), получим выражение для напряженности в трехмерном пространстве:

$$\vec{E} \cdot d\vec{r} = d\varphi , \quad (3.2.10)$$

Здесь

$$d\vec{r} = \vec{e}_x dx + \vec{e}_y dy + \vec{e}_z dz ,$$

где $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ — единичные векторы осей декартовых координат (орты). Тогда для случая одномерного пространства при перемещении заряда вдоль оси x на расстояние dx при фиксированных значениях координат y и z ($dy = dz = 0$) в соответствии с формулой (10) получим:

$$E_x dx = -d\varphi ,$$

Последнюю формулу перепишем так:

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} , \quad (3.2.11)$$

где частная производная находится путем дифференцирования потенциала по координате x при фиксированных значениях y и z .

По аналогии можно получить выражение для проекции вектора напряженности на другие оси координат:

$$E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} , E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} . \quad (3.2.12)$$

Из полученных проекций легко «сконструировать» вектор напряженности электрического поля, используя единичные векторы осей декартовых координат (орты):

$$\vec{E} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{e}_z \right) .$$

Выражение в скобках называется градиентом потенциала и сокращенно записывается так:

$$\vec{E} = -\nabla \varphi , \text{ или } \vec{E} = grad \varphi . \quad (3.2.13)$$

Градиент функции — это вектор, характеризующий скорость пространственного изменения функции и направленный в сторону максимального возрастания этой функции. Как видно из формулы (3.2.13), вектор напряженности электрического поля направлен в сторону, противоположную максимальному возрастанию потенциала, то есть, в сторону максимального убывания потенциала.

Отметим, что во многих практических задачах требуется определить значение напряженности электрического поля. Формула (3.2.13) упрощается, если электрическое поле однородно:

$$E_r = -\frac{\Delta \varphi}{\Delta r} = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{r_2 - r_1} . \quad (3.2.14)$$

Формулу (3.1.14) можно использовать и в случае неоднородного поля при малых расстояниях Δr и небольшом изменении потенциала $\Delta\varphi$. В этом случае поле считается практически однородным в малой области пространства. В формуле (3.2.14) Δr – кратчайшее расстояние между эквипотенциальными поверхностями с потенциалами φ_1 и φ_2 (рис.3.2.1).

Если заряженные тела погрузить в проводящую среду, то в ней потечет электрический ток. Чтобы ток не прекращался, требуется непрерывное возобновление исходных зарядов путем подключения тел к внешнему источнику. В каждой точке среды ток характеризуется плотностью тока \vec{j} - величиной тока, приходящейся на единицу площади, перпендикулярной направлению тока. Между плотностью тока и напряженностью электрического поля существует связь, называемая законом Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (3.2.15)$$

где σ – удельная электропроводность среды, величина, обратная удельному сопротивлению. При постоянном токе распределение заряда в пространстве не изменяется, и электрическое поле точно такое же, как и в электростатическом случае. Из уравнения (3.2.15) следует, что картина силовых линий электрического поля должна совпадать с картиной линий электрического тока. Эквипотенциальным линиям будут соответствовать линии, между точками которых отсутствует электрическое напряжение. Таким образом, измеряя напряжение между двумя точками проводящей среды, по которой течет электрический ток, можно определить положение эквипотенциальных линий.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис.3.2.3) представляет собой прямоугольную ванну с водой, в которую погружены два неподвижных электрода различной формы \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . Электроды присоединены к источнику постоянного низковольтного напряжения ИН. Также имеется подвижный электрод (зонд) 3, с помощью которого студент исследует распределение потенциала в ванночке между электродами. Вольтметр показывает напряжение между отрицательно заряженным электродом и точкой в ванне, в которую помещен зонд. Фотография установки приведена на рис. 3.2.4

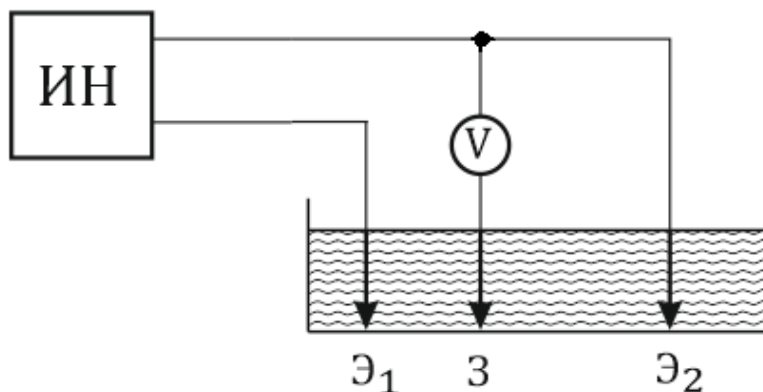


Рисунок 3.2.3 – Схема экспериментальной установки

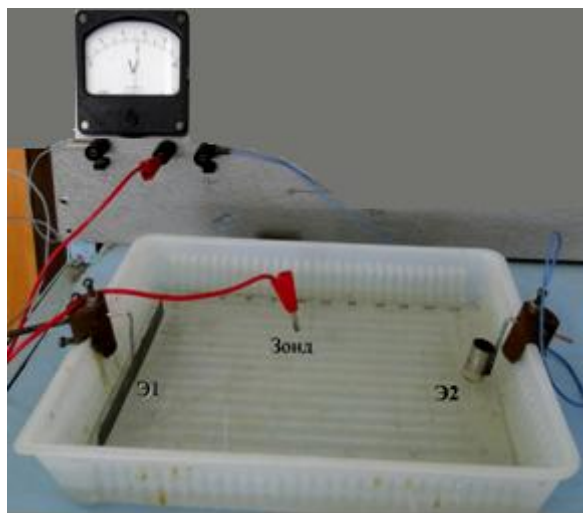


Рисунок 3.2.4 – Фотография установки

4. ЗАДАНИЕ

В работе требуется получить графическое изображение электростатического поля при двух различных вариантах расположения электродов. Для этого на миллиметровой бумаге начертите сечение ванны и нанесите на него координатную сетку, укажите расположение электродов. Размер ванночки, форму и размер электродов необходимо изображать в масштабе $1:1$.

4.1. Подключите установку с закрепленными, погруженными в воду электродами к источнику постоянного напряжения (левая часть стенда), согласно рис. 3.2.4.

4.2. Установите предел измерения вольтметра — 10 В . Подайте на электроды напряжение 10 В и переключите вольтметр на режим работы с зондом (нажать кнопку «зонд»).

4.3. Прижмите зонд к дну ванны — вольтметр должен показать напряжение между одним из электродов и данной точкой. Принимая потенциал этого электрода за нуль, с помощью вольтметра определите потенциал данной точки.

4.4. Перемещая зонд по дну ванны, найдите точку с потенциалом 2 В . Затем, перемещая зонд на небольшое, порядка 1 см , расстояние, найдите соседнюю точку с таким же потенциалом и так далее. Определенные таким образом точки перенесите на приготовленный лист, соедините точки линиями и подпишите значения потенциала. Аналогичные измерения проделайте для потенциалов $3, 4, 5, 6, 7$ и 8 В . Таким образом, Вы должны получить 7 эквипотенциальных линий. ***Эквипотенциальные линии должны начинаться и кончаться у краев ванны.***

Можно (при желании) координаты точек занести в Таблицу 3.2.1

Таблица 3.2.1 – Результаты эксперимента

Потенциал, В	Координаты точек													
	№1		№2		№3		№4		№5		№6		№7	
	X, см	Y, см	X, см	Y, см	X, см	Y, см	X, см	Y, см	X, см	Y, см	X, см	Y, см	X, см	Y, см
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														

4.5. В ванну положите замкнутый проводник в виде прямоугольника или круга и проведите измерения, указанные в пункте 4.4. Затем исследуйте поле снаружи и внутри замкнутого проводника. Результаты измерения изобразите на новом листе.

4.6. На листах с изображением эквипотенциальных линий нанесите силовые линии поля с учетом масштаба. При изображении силовых линий обязательно руководствуйтесь **свойствами силовых линий**. Линии должны быть ПЛАВНЫМИ, начинаться и заканчиваться на поверхности электродов, обязательно быть ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫМИ как поверхностям электродов, так и каждой эквипотенциальной линии. На каждом листе с изображением эквипотенциальных линий должно быть нанесено как минимум 5 силовых линий. Чертежи вставьте в отчет.

4.7. Оцените в нескольких точках, указанных преподавателем, с помощью формулы (3.2.14) величину напряженности электрического поля. Поскольку координатная ось ОХ расположена слева направо, то потенциалом φ_2 будет обладать эквипотенциальная линия, расположенная правее данной точки, а потенциалом φ_1 будет обладать линия, расположенная левее. Укажите полярность электродов, помня, что **потенциал отрицательно заряженного электрода принимается равным нулю**.

4.8. Сделайте выводы по результатам работы.

5. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Два чертежа с нанесенными эквипотенциальными и силовыми линиями.
2. Расчеты величин напряженности электрического поля в заданных точках.
3. Выводы из работы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определения электростатического поля и его характеристик (ответ сопроводите соответствующими формулами).

2. Изобразите силовые линии и эквипотенциальные линии поля **точечного** заряда.

3. Оцените величину силы, действующую на электрон, помещенный в некоторую точку **вашего исследуемого поля**. Укажите координаты точки и направление вектора силы.

4. Рассчитайте работу по перемещению электрона между двумя точками в исследуемом поле (Точки указать на чертеже с изображением эквипотенциальных линий и силовых линий).

5. Сформулируйте теорему Гаусса для электростатического поля.

6. С помощью теоремы Гаусса и формулы (3.2.14) докажите, что потенциал внутри замкнутого проводника, помещенного в электрическое поле, постоянен.

7. Докажите, что силовые линии всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

7. ЗАДАЧИ

(нумерация задач: первая цифра- номер бригады, вторая цифра- номер задачи)

1.1. Два точечных заряда, находясь в воздухе ($\varepsilon_1 = 1$) на расстоянии $r_1 = 20$ см друг от друга, взаимодействуют с некоторой силой. На каком расстоянии r_2 нужно поместить эти заряды в масле ($\varepsilon_2 = 5$), чтобы получить ту же силу взаимодействия? (8,94 см).

1.2. Найти отношение силы электростатического отталкивания между двумя протонами к силе их гравитационного притяжения. Заряд протона равен по модулю и противоположен по знаку заряду электрона ($e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ К). Масса протона равна $1840 m_e$, ($m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг). Гравитационная постоянная

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}. (1,24 \cdot 10^{36}).$$

2.1. Найти напряженность E электрического поля в точке, лежащей посередине между точечными зарядами $q_1 = 8$ нКл и $q_2 = -6$ нКл. Расстояние между зарядами $r = 10$ см, $\varepsilon = 1$. ($50,4 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$).

2.2. Найти скорость электрона, прошедшего разность потенциалов 100 В. ($5,9 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$).

3.1. В центр квадрата, в каждой вершине которого находится заряд $q = 3$ нКл, помещен отрицательный заряд q_0 . Найти этот заряд, если на каждый заряд q действует результирующая сила $F = 0$. ($q_0 = -2,85$ нКл).

3.2. Найти силу F , действующую на заряд $q=2 \text{ нКл}$, если заряд помещен на расстоянии $r=2 \text{ см}$ от поверхности заряженного шара с радиусом $R=2 \text{ см}$ и поверхностной плотностью заряда $\sigma=20 \frac{\text{мкКл}}{\text{м}^2}$. Диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon = 6$, $\epsilon_0=8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$. (188 мкН).

4.1. Найти силу F , действующую на заряд $q=2 \text{ нКл}$, если заряд помещен на расстоянии $r=2 \text{ см}$ от заряженной нити с линейной плотностью заряда $\tau = 0,2 \frac{\text{мкКл}}{\text{м}}$. Диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon = 6$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$. (60 мкН).

4.2. Найти силу F , действующую на заряд $q=2 \text{ нКл}$, если заряд помещен на расстоянии $r=2 \text{ см}$ в поле заряженной плоскости с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 20 \frac{\text{мкКл}}{\text{м}^2}$. Диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon = 6$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$. (377 мкН).

5.1. На расстоянии 8 см друг от друга в воздухе находятся два заряда по 1 нКл. Определить напряженность и потенциал поля в точке, находящейся на расстоянии 5 см от зарядов. ($4,1 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$; 249 В).

5.2. На металлической сфере радиусом 15 см находится заряд $q=4 \text{ нКл}$. Определите напряженность E электростатического поля на расстоянии $r=10 \text{ см}$ от центра сферы и на поверхности сферы. (0 ; $1,6 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$).

6.1. Два заряда находятся в керосине ($\epsilon = 2$) на расстоянии 1 см друг от друга взаимодействуют с силой 2.7 Н. Величина одного заряда в три раза больше другого. Определить величину каждого заряда. ($4,2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$; $1,4 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$).

6.2. В вершинах квадрата со стороной 5 см находятся одинаковые положительные заряды $q=10 \text{ нКл}$. Определите напряженность электростатического поля: 1) в центре квадрата; 2) в середине одной из сторон квадрата. (0 ; $51,5 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$).

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с. Глава 11, §§77 -86.

2. Черевко А.Г. Расчет неопределенности результатов измерений в физическом эксперименте [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Черевко; Сиб.гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Новосибирск: СибГУТИ, 2008. - 72 с.

Лабораторная работа 3.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА ИЗ МЕТАЛЛА

1.ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Исследовать вольтамперные характеристики вакуумного диода.
2. Определить работу выхода электронов из материала катода вакуумного диода.

2.ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Термоэлектронной эмиссией называется испускание электронов нагретыми телами. Это явление широко применяется на практике, на нем основана работа радиоламп, электронно-лучевых трубок в телевизорах и осциллографах.

Рассмотрим испускание электронов нагретыми металлами. С современной точки зрения металл представляет собой расположенные в строгом порядке положительные ионы металла, образующие кристаллическую структуру. Элементарной ячейкой кристаллической решетки называется наименьшая упорядоченная совокупность атомов, сохраняющая свойства вещества в целом. Например, элементарной объемно-центрированной ячейкой железа является куб, в вершинах которого расположены ионы железа и еще один ион — в центре куба. Из таких элементарных ячеек и состоит кристалл железа.

В кристаллической структуре находятся свободные электроны или электроны проводимости. Они принадлежат не конкретным атомам, а всему кристаллу в целом и могут свободно перемещаться по кристаллу (рис.3.3.1). Наличием свободных электронов и обусловлена высокая электро- и теплопроводность металлов.

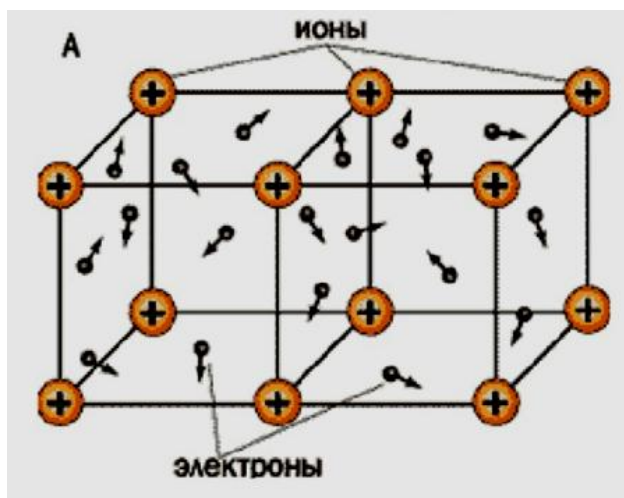


Рисунок 3.3.1 – Схематическое изображение строения металла ¹

¹ demo.multiurok.ru

В рамках квантовой механики электроны проводимости можно рассматривать как свободные. Однако при этом они характеризуются эффективной массой — величиной, учитывающей взаимодействие свободных электронов с потенциальными энергетическими полями кристаллической структуры. Эффективная масса может существенно отличаться от массы покоя электрона и является индивидуальной характеристикой кристалла.

В модели свободных электронов кристаллическая структура из положительных ионов создает электрическое поле с положительным потенциалом φ_k . Следовательно, потенциальная энергия свободного электрона в таком поле может быть рассчитана как:

$$W_n = -e \cdot \varphi_k$$

Считая, что при удалении электрона из металла потенциальная энергия их взаимодействия стремится к нулю, график потенциальной энергии свободных электронов можно представить так, как на Рис. 3.3.2.

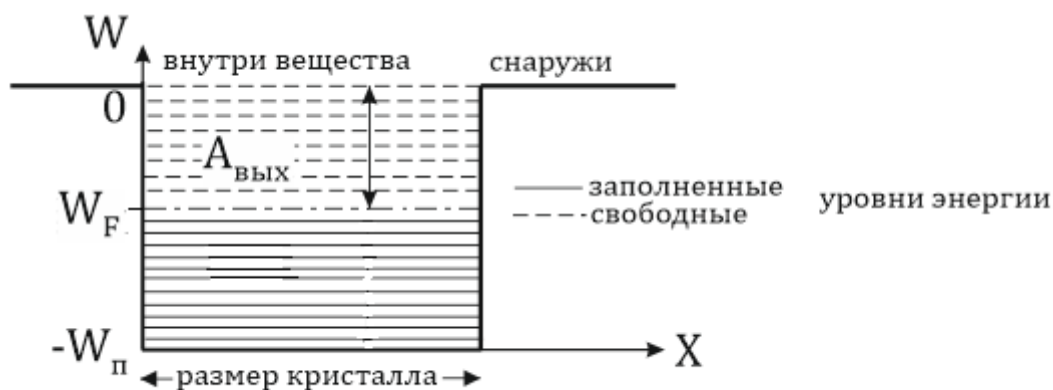


Рисунок 3.3.2 – Распределение свободных электронов по энергиям в одномерном энергетическом поле кристалла металла

Форма потенциальной энергии напоминает «потенциальную яму» для электронов. По ординате отложена энергия электронов, по абсциссе — координата для одномерного случая, ширина «ямы» соответствует линейному размеру кристалла.

В соответствии с квантовой механикой энергия электрона в кристалле может принимать лишь строго определенные значения. Поскольку значения энергии на графике принято откладывать по вертикальной оси, то эти значения называют энергетическими уровнями. Разрешенные значения энергии образуют систему дискретных уровней — зону. Отметим, что разность энергий соседних уровней очень мала ($\Delta W \sim 10^{-22} \text{ эВ}$).

Согласно принципу запрета Паули, каждый электрон имеет свою энергию. Поэтому суммарная энергия электронов соответствует тому, что энергетические уровни заполнены электронами снизу вверх до наибольшего значения W_F . W_F — энергия уровня Ферми, максимальная энергия свободного электрона в металле при температуре абсолютного нуля.

Из рис. 3.3.2 видно, что энергия электрона внутри металла меньше, чем энергия вне металла. Наименьшее значение энергии свободного электрона, удаленного из вещества, можно принять условно за нулевой энергетический уровень (отсутствует потенциальная энергия взаимодействия с кристаллической решеткой, и нет кинетической энергии движения электрона). Следовательно, для того, чтобы удалить электрон из металла надо затратить энергию A , называемую работой выхода. Работа выхода — минимальная энергия, необходимая для вырывания свободного электрона с поверхности вещества. Для металлов она соответствует нескольким электрон-вольтам. В системе СИ: $1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

При комнатной температуре энергия большинства электронов не превышает W_F . Она меньше величины потенциального барьера, равного разнице энергий вне металла и внутри него, и электроны не могут покинуть металл.

Однако, если электрону передать дополнительную кинетическую энергию, превышающую A , путем нагрева тела, возникает явление термоэлектронной эмиссии.

Явление термоэлектронной эмиссии можно изучить на примере работы радиолампы – диода. Простейший диод представляет собой вакуумированный стеклянный баллон с впаянными электродами. Катодом может служить спираль накала, расположенная по оси цилиндра-анода (рис. 3.3.3).

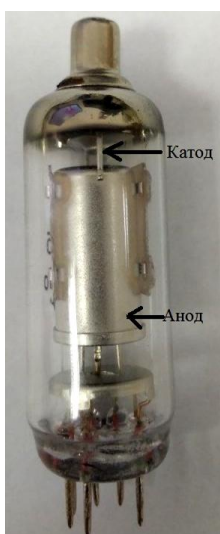


Рисунок 3.3.3 – Внешний вид диода

Типичная схема включения диода приведена на рис. 3.3.4, где изображено две цепи: цепь накала катода и цепь анодного напряжения.

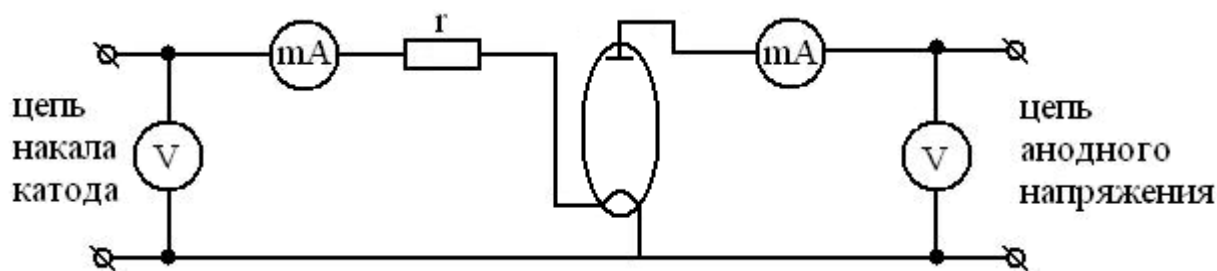


Рисунок 3.3.4 – Схема экспериментальной установки

При прохождении тока нить накала разогревается и за счет термоэлектронной эмиссии вокруг нее возникает электронное облако. Но эмитированные электроны не могут удалиться, поскольку на них действует кулоновская сила притяжения со стороны оказывающейся положительно заряженной нити. Устанавливается динамическое равновесие между эмитированными и вернувшимися электронами. Однако наиболее «энергичные» электроны, обладающие наибольшим значением скорости, а значит, и кинетической энергии, могут преодолеть поле притяжения катода и долететь до анода. Таким образом, даже при отсутствии напряжения между анодом и катодом возникает слабый анодный ток I_0 (рис. 3.3.5).

Обратимся к анализу ВАХ. Для прекращения слабого анодного тока в отсутствие электрического поля ($U_a=0$), на анод нужно подать отрицательное запирающее напряжение U_3 (рис. 3.3.5). При подаче на анод положительного, по отношению к катоду, потенциала возникает ускоряющее электрическое поле. В этом поле эмитированные электроны начинают двигаться от катода к аноду, анодный ток усиливается. Сила анодного тока зависит от материала катода, его температуры и величины электрического поля. Зависимость анодного тока от приложенного анодного напряжения при фиксированной температуре катода называется вольтамперной характеристикой (ВАХ). Типичные ВАХ при различных температурах катода приведены на рис. 3.3.5. При повышении температуры катода, вылетающие из него электроны, имеют более высокую кинетическую энергию. Следовательно, для прекращения тока на анод нужно подать запирающее напряжение большей величины.

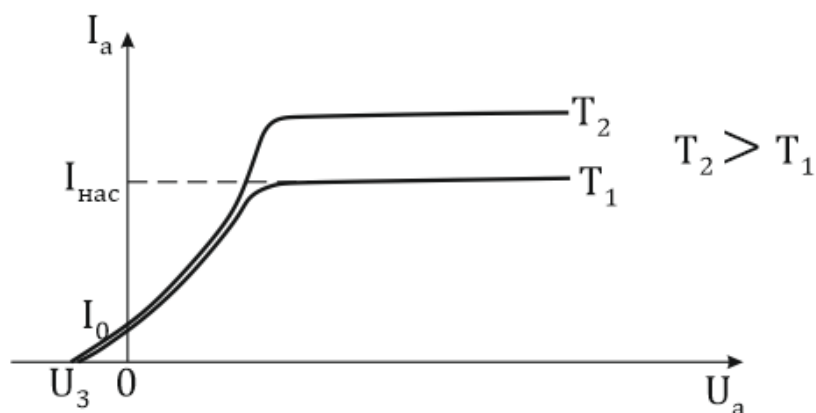


Рисунок 3.3.5 – ВАХ вакуумного диода при различных температурах катода

При неизменной температуре катода с увеличением анодного напряжения анодный ток увеличивается за счет все большего количества электронов, оттягиваемых электрическим полем от катода. Отметим, что ВАХ нелинейна, то есть, не подчиняется закону Ома, что обусловлено неравномерным пространственным зарядом между электродами.

В рабочем режиме лампы, далеко от насыщения, ВАХ подчиняется закону Богуславского-Лэнгмюра или закону «трех вторых»:

$$I_a = C \cdot U_a^{\frac{3}{2}},$$

где C — константа, зависящая от формы и расположения электродов. Закон применим для области средних напряжений — от нескольких Вольт до напряжений, при которых начинается переход в режим насыщения тока эмиссии. Закон не применим к области отрицательных и малых положительных напряжений, к области перехода в режим насыщения и к самому режиму насыщения.

С дальнейшим увеличением U_a все эмитированные электроны долетают до анода и анодный ток перестает изменяться, говорят, что происходит «насыщение одной характеристики при изменении другой». Ток насыщения зависит от количества электронов, испускаемых катодом в единицу времени, которое определяется температурой катода. Эта зависимость описывается формулой Ричардсона-Дэшмана:

$$I_{\text{нас}} = B \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{A}{kT}\right). \quad (3.3.1)$$

Здесь B — постоянная, зависящая от типа катода и его площади, T — абсолютная температура катода, \exp — экспонента, показательная функция числа 2,72, являющегося основанием натуральных логарифмов, k — постоянная Больцмана, A — работа выхода электрона из катода. С помощью формулы (3.3.1), зная температуру катода и анализируя ВАХ, можно определить работу выхода электрона A .

Для определения температуры катода нити накала воспользуемся зависимостью сопротивления металла от температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot t), \quad (3.3.2)$$

где α — температурный коэффициент сопротивления металла, t — температура в градусах Цельсия, R — сопротивление нити накала при температуре t , R_0 — сопротивление при нуле градусов Цельсия.

Из формулы (3.3.2) можно получить абсолютную температуру T катода в шкале Кельвина, $T = t + 273$:

$$T = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right) + 273. \quad (3.3.3)$$

Сопротивление нити накала можно измерить, например, с помощью амперметра и вольтметра, включенных в цепь накала катода. По закону Ома для однородного участка цепи:

$$R = \frac{U_{\text{накала}}}{I_{\text{накала}}} - r. \quad (3.3.4)$$

Работу выхода электронов из материала катода будем определять, исходя из формулы Ричардсона-Дэшмана (3.3.1). Чтобы определить работу выхода, в данной формуле нужно знать температуру T , силу тока насыщения $I_{\text{нас}}$ и постоянную B . Постоянная B , зависящая от типа катода и его площади, в данной работе неизвестна. Чтобы избавиться от этой неизвестной постоянной, произведем измерения тока насыщения дважды и возьмем отношение этих токов.

Предположим, что мы измерили ток насыщения $I_{1\text{нас}}$ при температуре катода T_1 и ток насыщения $I_{2\text{нас}}$ при температуре T_2 . В соответствии с формулой (3.3.1) запишем отношение этих токов насыщения:

$$\left(\frac{I_1}{I_2}\right)_{\text{нас}} = \frac{T_1^2 \exp\left(-\frac{A}{kT_1}\right)}{T_2^2 \exp\left(-\frac{A}{kT_2}\right)}.$$

Логарифмируя это выражение, легко получить формулу для расчета работы выхода:

$$A = k \cdot \frac{\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)_{\text{нас}} - 2\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}. \quad (3.3.5)$$

Отметим, что в наших экспериментах температуры T_1 и T_2 — близки (разность температур не превышает нескольких %), поэтому в формуле (3.3.5) в первом приближении можно пренебречь вторым слагаемым. Для того, чтобы получить величину A в электрон-вольтах, формулу (3.3.5) нужно разделить на заряд электрона. С учетом этих замечаний выражение для работы выхода принимает вид:

$$A = \frac{k}{e} \cdot \frac{\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)_{\text{нас}}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}, \text{ (эВ)} \quad (3.3.6)$$

Обратим внимание, что токи насыщения можно измерять в любых одинаковых единицах, т.к. в формуле (3.3.6) стоит логарифм отношения токов.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка представляет собой радиолампу-диод прямого накала и источники напряжения с электроизмерительными приборами, смонтированными на электрическом стенде. Лампа подключается к стенду согласно схеме (рис. 3.3.4). Анодная цепь подключается к регулируемому источнику высокого постоянного напряжения в правой части стенда. Цепь

накала подключается к низковольтному регулируемому источнику напряжения. Рабочее напряжение накала катода не должно превышать $1 \div 2 \text{ В}$, поэтому последовательно с катодом включено добавочное сопротивление r . Сопротивление включено для ограничения напряжения, подаваемого на нить накала лампы. Величина r составляет около 39 Ом (уточнять у преподавателя).

Примечание: в случае, если используется модернизированная лабораторная установка с цифровым вольтметром цепи накала, то $r = 0$ Ом.

В случае использования модернизированной установки формулы (3.3.7) и (3.3.8) не применяются! Можно определить значение сопротивления R иначе. Поскольку сопротивление катода R и сопротивление добавочное r включены последовательно, то напряжение, измеряемое вольтметром в цепи накала, является суммой напряжений на катоде и добавочном сопротивлении. То есть, напряжение катода составляет некоторую долю от напряжения, измеряемого вольтметром цепи накала. В данном случае можно принять, что

$$U_{\text{катода}} = \frac{U_{\text{накала}}}{7,7}, \quad (3.3.7)$$

а сопротивление катода определяется из закона Ома как:

$$R = \frac{U_{\text{катода}}}{I_{\text{накала}}}, \quad (3.3.8)$$

4. ЗАДАНИЕ

Выпишите отдельно рабочие формулы

Сводная таблица 3.3.

№ формулы	Формула	Величины, входящие в формулы
3.3.6	$A = \frac{k}{e} \cdot \frac{\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)_{\text{нас}}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}, \text{ (эВ)}$	A – работа выхода электрона из металла T_1, T_2 – температура катода для двух ВАХ $I_{1\text{нас}}, I_{2\text{нас}}$ – токи насыщения для двух ВАХ k – постоянная Больцмана e – заряд электрона
3.3.3	$T = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right) + 273,$	T – температура накала катода α – температурный коэффициент сопротивления материала катода R – сопротивление катода R_0 – сопротивление катода при комнатной температуре
3.3.7	$U_{\text{катода}} = \frac{U_{\text{накала}}}{7,7}$ Только для аналоговых приборов!	$U_{\text{катода}}$ – падение напряжения на катоде $U_{\text{накала}}$ – падение напряжения в цепи накала (с учетом добавочного сопротивления)
3.3.8	$R = \frac{U_{\text{катода}}}{I_{\text{накала}}},$	R – сопротивление катода $I_{\text{накала}}$ – сила тока, протекающего через катод

Заготовьте таблицу измерений 3.3.1 (не менее, чем на 10 значений).

Таблица 3.3.1 – ВАХ вакуумного диода при различных напряжениях накала

Эксперимент 1			Эксперимент 2		
Напряжение накала $U_{\text{накала 1}} =$, В			Напряжение накала $U_{\text{накала 2}} =$, В		
Ток накала $I_{\text{накала 1}} =$, мА			Ток накала $I_{\text{накала 2}} =$, мА		
№ п/п	Анодное напряжение U_a , В	Анодный ток I_a , мА	№ п/п	Анодное напряжение U_a , В	Анодный ток I_a , мА
1			1		
2			2		
3			3		
4			4		
5			5		
6			6		
7			7		
8			8		
9			9		
10			10		

4.1. Определите значения напряжения накала и силы тока накала, запишите их в таблицу для Эксперимента 1.

4.2. Определите пределы измерения вольтметра анодной цепи и миллиамперметра анодной цепи (учитывайте множители!). Снимите ВАХ диода, данные занесите в таблицу. Задавайте напряжение анода через каждые 2 деления на вольтметре, значения в Вольтах запишите в Таблицу 3.3.1 (эксперимент № 1, столбик 1). При каждом значении напряжения измеряйте силу тока анода. Результат записывайте в Таблицу 3.3.1 (эксперимент № 1, столбик 2).

4.3. Подключите второе значение напряжения накала. Определите значения напряжения накала и силы тока накала, запишите их в Таблицу 3.3.1 для Эксперимента 2.

4.4. Повторите действия п. 4.2 для новых значений напряжения и силы тока накала. Данные з запишите в Таблицу 3.3.1 (эксперимент № 2, столбик 3). При каждом значении напряжения измеряйте силу тока анода. Результат записывайте в Таблицу 3.3.1 (эксперимент № 2, столбик 4).

4.5. С помощью закона Ома определите сопротивление катода при различных температурах по формуле (3.3.8). Данные занесите в Таблицу 3.3.2

Таблица 3.3.2. – Результаты расчетов

$R_1, \text{ Ом}$	
$R_2, \text{ Ом}$	
$T_1, \text{ К}$	
$T_2, \text{ К}$	
$I_{\text{нас1}}, \text{ мА}$	
$I_{\text{нас2}}, \text{ мА}$	

4.6. Рассчитайте температуры катода T_1 и T_2 по формуле (3.3.3). В нашей работе $R_0=3 \text{ Ом}$, для вольфрама² $\alpha=5,1 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

4.7. С помощью формулы (3.3.6) рассчитайте работу выхода электрона из материала катода.

4.8. Сравните полученное значение с табличными значениями работы выхода, приведенными в [Приложении 3](#). Обратите внимание, что в данной работе катод может быть изготовлен из вольфрама или из вольфрама с напылением тория или цезия.

4.9. Оцените погрешности полученной величины A .

а) Абсолютную погрешность: $\Delta A = |\bar{A} - A|$.

б) Относительную погрешность: $\delta A = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%$.

4.10. Сделайте вывод из проведенной работы.

5. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Таблица ВАХ.
2. График вольтамперной характеристики диода $I = f(U)$ при разных напряжениях накала.
3. Расчеты сопротивлений катода и его температур (в Кельвинах).
4. Расчет работы выхода электронов из материала катода.
5. Результаты вычисления погрешностей.
6. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расскажите о модели свободных электронов в металле.
2. Объясните энергетическую диаграмму на рис. 3.3.1.
3. Дайте определение работы выхода электрона. От каких факторов она зависит?
4. Проанализируйте ВАХ диода в основных точках зависимости (при анодном напряжении, равном нулю, равном U_z , при токе насыщения)
5. Укажите основное свойство вакуумного диода. В каких практических целях используется диод?

² Физические величины: Справочник/Под ред. И.С. Григорьева, Е.З Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с. – с. 438

6. Приведите вывод расчетной формулы (3.3.6).
7. Объясните зависимость сопротивления металла от температуры.

7. ЗАДАЧИ

(нумерация задач: первая цифра – номер бригады, вторая цифра- номер задачи)

1.1. Вычислить ток насыщения для вакуумного диода с вольфрамовым катодом при температуре катода $T = 1000\text{K}$. Работа выхода электронов из вольфрама равна $A=4,5\text{ эВ}$, константа диода составляет $B=60\frac{\text{А}}{\text{см}^2\text{К}^2}$. ($1,6\cdot 10^{-11}\text{ А}$).

1.2. Вычислить отношение величин токов насыщения при увеличении температуры вольфрамового катода с 1800 К до 1900 К . Работа выхода электронов из вольфрама равна $A=4,5\text{ эВ}$, постоянная Больцмана составляет $k=1,38\cdot 10^{-23}\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$, $1\text{ эВ}=1,6\cdot 10^{-19}\text{ Дж}$. (5,1).

2.1. Какой наименьшей скоростью v должен обладать электрон для того, чтобы ионизировать атом водорода? Потенциал ионизации атома водорода составляет $U=13,5\text{ В}$. ($2,2\cdot 10^6\text{ м/с}$).

2.2. При какой температуре T атомы ртути имеют кинетическую энергию поступательного движения, достаточную для ионизации? Потенциал ионизации атома ртути составляет $U=10,4\text{ В}$ ($W_{\text{кин}}=\frac{3}{2}kT$, $k=1,38\cdot 10^{-23}\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$). (8036К).

3.1. Потенциал ионизации атома гелия составляет $U=24,5\text{ В}$. Найти работу ионизации A . ($39,2\cdot 10^{-19}\text{ Дж}$).

3.2. При повышении температуры с 300К сопротивление медного проводника возросло в два раза. До какой температуры был нагрет проводник? Термический коэффициент сопротивления меди $\alpha=4,2\cdot 10^{-3}\text{ К}^{-1}$. (838К).

4.1. Во сколько раз изменится ток насыщения вольфрамового катода при повышении температуры катода от 2400К на 100К ? (2,6).

4.2. Какой наименьшей скоростью должны обладать свободные электроны в цезии и платине для выхода их из металлов? Работы выхода для цезия и платины равны $1,9\text{ эВ}$ и $5,3\text{ эВ}$ соответственно. ($8,3\cdot 10^5\frac{\text{м}}{\text{с}}$; $1,4\cdot 10^6\frac{\text{м}}{\text{с}}$).

5.1. Во сколько раз ток насыщения катода из торированного вольфрама при температуре 1800К больше тока насыщения вольфрамового катода при той же температуре? Эмиссионная постоянная для чистого вольфрама $B_{\text{в}}=0,6\cdot 10^6\frac{\text{А}}{\text{м}^2\text{К}^2}$, для торированного вольфрама $B_{\text{тв}}=0,3\cdot 10^7\frac{\text{А}}{\text{м}^2\text{К}^2}$. Работы выхода для чистого вольфрама и для торированного вольфрама равны $4,5\text{ эВ}$ и $2,63\text{ эВ}$ соответственно. ($8,2\cdot 10^6$).

5.2. Вычислить, насколько изменится отношение величин тока насыщения при увеличении температуры вольфрамового катода с 1900К до 2000К . (Работа выхода электронов из вольфрама равна $A=4,5\text{ эВ}$, постоянная Больцмана составляет $k=1,38\cdot 10^{-23}\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$, $1\text{ эВ}=1,6\cdot 10^{-19}\text{ Дж}$). (4,4).

6.1. Вычислить плотность тока насыщения для вакуумного диода с вольфрамовым катодом при температуре катода $T = 2000\text{ К}$. Работа выхода

электронов из вольфрама равна $A = 4,5эВ$, константа диода составляет $B=60\frac{A}{cm^2K^2}$. (12,2 A/cm²).

6.2. Вольфрамовая нить электрической лампочки при 20°C имеет сопротивление 35,8 Ом. Какова будет температура нити лампочки, если по нити течет ток 0,6 А при включении в цепь 115 В? Температурный коэффициент сопротивления вольфрама $\alpha = 4,6 \cdot 10^{-3} K^{-1}$. (2524K).

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с. Глава 13 §§13,14.
2. Черевко А.Г. Расчет неопределенности результатов измерений в физическом эксперименте [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Черевко; Сиб.гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Новосибирск: СибГУТИ, 2008. - 72 с.

Лабораторная работа 4.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с законами движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.
2. Определить удельный заряд электрона с помощью цилиндрического магнетрона.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Магнетроном называется электровакуумное устройство, в котором движение электронов происходит во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях. Одно из применений магнетрона в том, что он является источником электромагнитного излучения СВЧ диапазона: $f \sim (10^9 \div 10^{12})$, Гц. Магнетрон является основным элементом СВЧ печей (микроволновых печей), магнетроны широко используют в современных радиолокационных станциях.

В нашей работе магнетрон имеет самую простую конструкцию и представляет собой радиолампу-диод прямого накала, электродами которой являются коаксиальные цилиндры. Катодом является спираль по оси радиолампы, а анодом - цилиндр вокруг катода, с максимальной эффективностью собирающий эмитированные с катода электроны (рис. 4.1.1). Радиолампа помещена во внешнее аксиальное магнитное поле, создаваемое соленоидом с током (Образец такого устройства приведен на рис. 4.1.2).

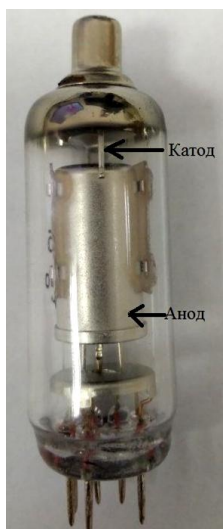


Рисунок 4.1.1 – Фотография вакуумного диода



Рисунок 4.1.2 – Внешний вид магнетрона

Схематическое изображение устройства магнетрона (продольное сечение) представлено на рис. 4.1.3. При этом силовые линии электрического поля имеют радиальное направление, а линии индукции магнитного поля совпадают с осью электродов. На рис. 4.1.4 показано поперечное сечение радиолампы с указанием направлений векторов магнитной индукции \vec{B} и напряженности электрического поля \vec{E} . При нагревании катода лампы с его поверхности начинают вылетать электроны. Это явление называется термоэлектронной эмиссией. Эмитированные электроны движутся к аноду во взаимно-перпендикулярных электрическом и магнитном полях (рис. 4.1.4). Электрическое поле создается между катодом и анодом магнетрона источником анодного напряжения, а магнитное поле – соленоидом (цилиндрической катушкой) с током, внутри которого и находится вакуумный диод. Таким образом, электроны могут двигаться внутри цилиндрического объема, ограниченного анодом электронной лампы.

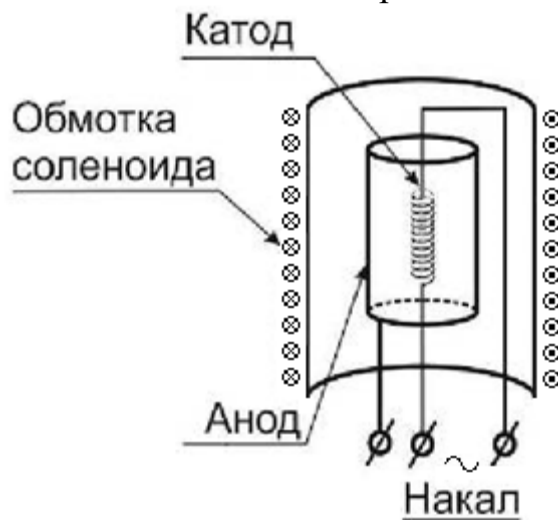


Рисунок 4.1.3 – Продольное сечение магнетрона

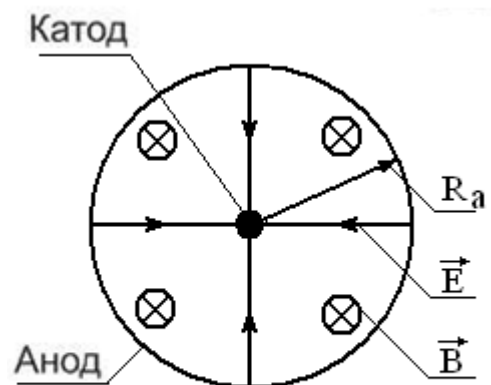


Рисунок 4.1.4 – Поперечное сечение магнетрона

По второму закону Ньютона движение электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях может быть описано:

$$m\vec{a} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}]. \quad (4.1.1)$$

В нашем случае m — масса электрона, $q = -e$, где e — абсолютная величина заряда электрона, v — скорость электрона. В правой части уравнения (4.1.1) записана сила, состоящая из двух слагаемых: силы Кулона, действующей со стороны электрического поля и направленной вдоль силовых линий, и магнитной силы Лоренца, действующей со стороны магнитного поля на движущийся заряд и направленной перпендикулярно траектории движения электрона. Направление силы Лоренца определяется по правилу «левой руки» для положительного заряда.

Траектория движения заряженной частицы в электромагнитном поле существенно зависит от величины удельного заряда — отношения заряда

частицы к её массе $\frac{e}{m}$. Вид траектории может быть получен из решения уравнения (4.1.1), но даже в случае цилиндрической симметрии это уравнение не имеет решения в аналитическом виде.

Рассмотрим на качественном уровне движение электрона в цилиндрическом магнетроне. Для упрощения предположим, что электроны вылетают из катода с нулевой начальной скоростью, движение происходит в плоскости, перпендикулярной оси электродов, т. е. в плоскости рис.4.1.2, и что радиус катода существенно меньше радиуса анода.

При протекании тока в цепи накала в результате термоэлектронной эмиссии вокруг катода в лампе образуются свободные электроны. В электрическом поле, обусловленном анодным напряжением U_a , эти электроны двигаются от катода к аноду, что может быть зафиксировано по анодному току лампы. Постоянный ток в обмотке соленоида создает магнитное поле, искривляющее траекторию движения электронов.

Выясним характер движения электронов в электрическом и магнитном полях. В электрическом поле на электрон действует сила Кулона $\vec{F} = -e\vec{E}$, вынуждающая его двигаться с ускорением в направлении, противоположном вектору \vec{E} . Эта сила совершает работу, которая идет на изменение кинетической энергии электрона. Скорость электронов вблизи анода может быть найдена с помощью закона сохранения энергии:

$$A_{эл} = W_k \quad \text{или} \quad e \cdot U_a = \frac{mv^2}{2}. \quad (4.1.2)$$

В магнитном поле сила Лоренца действует лишь на движущийся электрон: $\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}]$, где $q = -e$, и направлена перпендикулярно скорости электрона и вектору магнитной индукции. Эта сила не совершает механической работы над электроном, а только изменяет направление вектора скорости и вынуждает электрон двигаться с центростремительным ускорением по окружности (в общем случае, по спирали). Применяя второй закон Ньютона для случая $\vec{v} \perp \vec{B}$:

$$ma_n = m \frac{v^2}{R} = e \cdot v \cdot B. \quad (4.1.3)$$

Легко получить выражение для радиуса окружности:

$$R = \frac{mv}{eB}. \quad (4.1.4)$$

В магнетроне электрон движется в скрещенных электрическом и магнитном полях. В отсутствии магнитного поля траектории движения приведены на рис.4.1.5а и представляют собой радиальные прямые, направленные от катода к аноду. При наложении «слабого» магнитного поля траектории электронов искривляются, становясь дугами окружности, но, тем не менее, все электроны долетают до анода (рис. 4.1.5б). Увеличивая индукцию магнитного поля, можно получить ситуацию, когда электрон, двигаясь по криволинейной траектории, едва не коснется анода и возвратится на катод (рис. 4.1.5в). Криволинейная траектория в этом случае представляет собой окружность, радиус которой для электрона вблизи анода примерно равен

половине радиуса анода двухэлектродной лампы ($R = \frac{R_a}{2}$). Используя формулу (4.1.4) можно переписать выражение для радиуса траектории электрона в этом случае:

$$\frac{R_a}{2} = \frac{mv}{eB}. \quad (4.1.5)$$

Анодный ток при этом прекращается. Величину магнитной индукции, при которой траектории движения электронов превращаются в окружности, назовем критической.

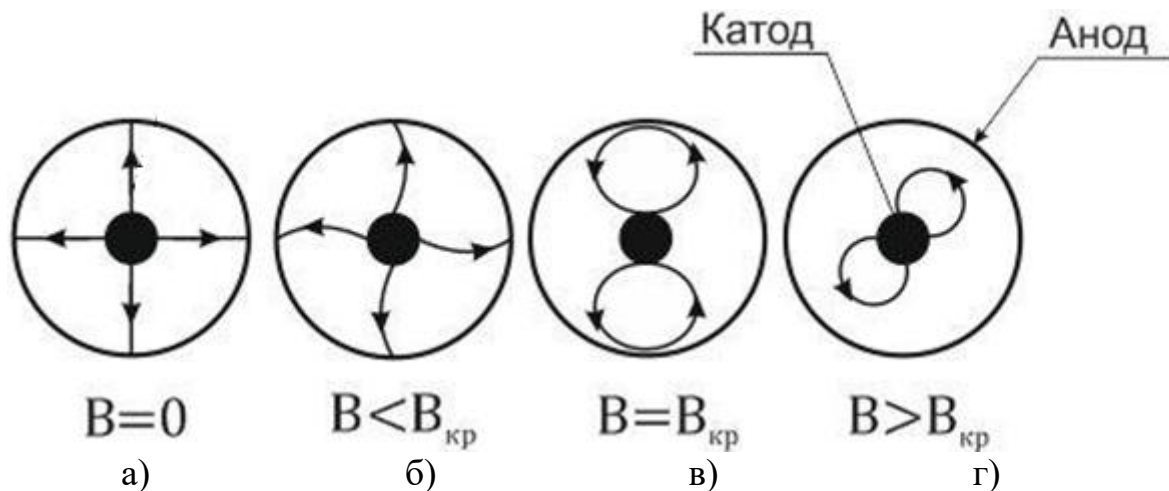


Рисунок 4.1.5 – Траектории движения электрона в магнетроне

Таким образом, если известна индукция критического магнитного поля при определенном анодном напряжении, то из формул (4.1.2) и (4.1.5) можно рассчитать удельный заряд электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{R_a^2 \cdot B_{кр}^2}. \quad (4.1.6)$$

При дальнейшем увеличении магнитного поля электроны, двигаясь по криволинейным замкнутым траекториям, удаляются от катода на меньшие расстояния и никогда не долетают до анода (рис. 4.1.5г). В этом случае, когда радиус траектории электрона меньше половины радиуса анода $R_3 \leq \frac{R_a}{2}$, в лампе наблюдается наиболее сильный спад анодного тока. Это значение анодного тока назовем критическим значением анодного тока.

Для определения удельного заряда электрона по формуле (4.1.6) нужно, фиксируя величину анодного напряжения, найти значение индукции критического магнитного поля, при котором происходит наибольшее изменение анодного тока, названное нами $I_{кр}$. Индукция магнитного поля связана с критической силой тока в соленоиде соотношением:

$$B_{кр} = \mu_0 \cdot I_{кр} \frac{N}{l}, \quad (4.1.7)$$

где N – число витков, l – длина соленоида. Мы воспользовались выражением для индукции «длинного» соленоида, когда длина соленоида

много больше его диаметра. В результате расчетная формула для удельного заряда электрона принимает вид:

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_a \cdot l^2}{R_a^2 \cdot \mu_0^2 \cdot I_{кр}^2 \cdot N^2} \quad (4.1.8)$$

Теоретическая зависимость анодного тока от силы тока в соленоиде для идеального магнетрона приведена на рис. 4.1.6 (штриховая линия). Здесь же сплошной линией изображена реальная зависимость. Пологий спад анодного тока обусловлен следующими причинами: неоднородностью магнитного поля вблизи краев соленоида, некоаксиальностью электродов, падением напряжения вдоль катода, разбросом по скоростям эмитированных электронов и т.д. Разумно предположить, что критическое значение тока (точка перегиба графика) соответствует максимальной скорости изменения анодного тока.

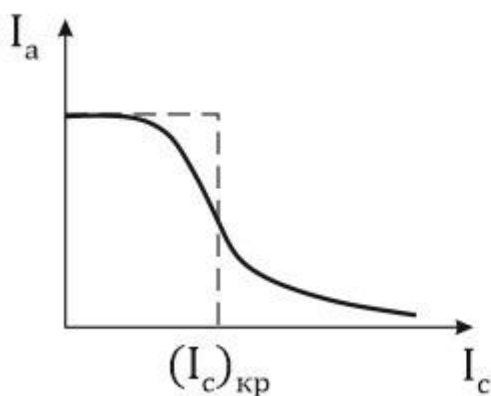


Рисунок 4.1.6 – Зависимость анодного тока от тока соленоида

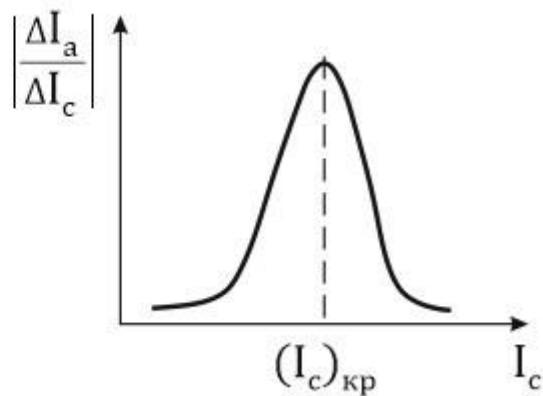


Рисунок 4.1.7 – График производной анодного тока по току соленоида

Для нахождения этой величины нужно построить график производной от анодного тока по току в соленоиде. При графическом дифференцировании удобно разбить ось тока соленоида на равные части и в середине каждого интервала отложить по вертикали значение $\left| \frac{\Delta I_a}{\Delta I_c} \right|$ (рис. 4.1.7). Максимум построенной функции соответствует критической силе тока в соленоиде.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из магнетрона, представляющего собой соленоид с помещенной внутри радиолампой, электроизмерительных приборов и источников напряжения, смонтированных внутри электрического стенда. Конструктивно анод лампы имеет форму цилиндра, вдоль оси которого расположена нить накала, являющаяся катодом.

Магнетрон подключается к электрическому стенду согласно схеме (рис. 4.1.8). Соленоид подключается к источнику постоянного напряжения в левой части стенда, где с помощью амперметра фиксируется ток соленоида. Накал

лампы в данной работе фиксирован, чем поддерживается постоянная температура катода. Источник напряжения и приборы, регистрирующие параметры анодной цепи, находятся в правой части стенда.

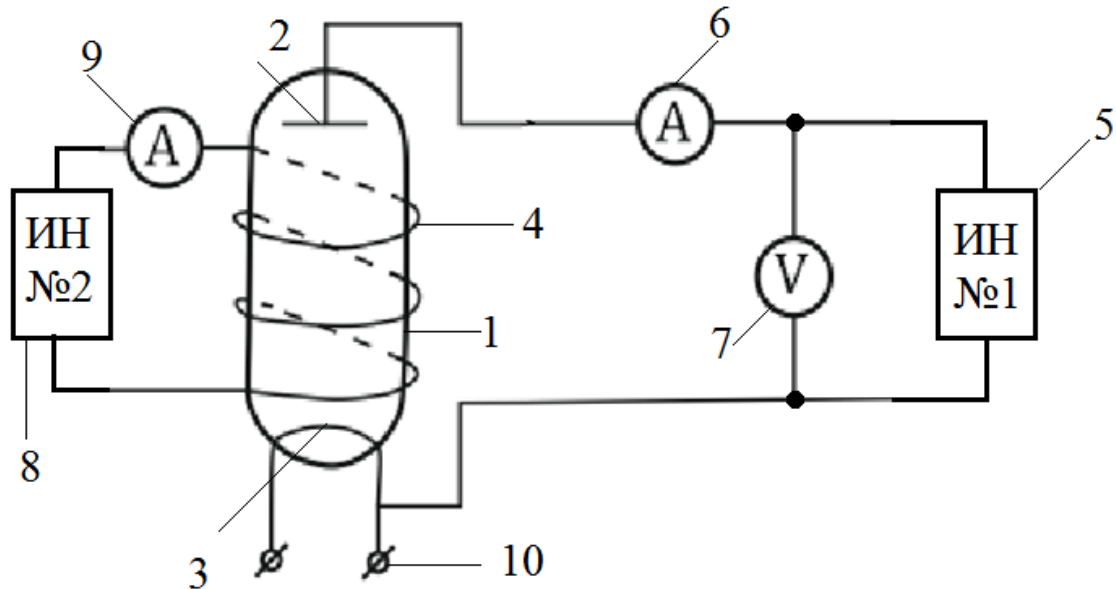


Рисунок 4.1.8 – Схема лабораторной установки

1. Магнетрон.
2. Анод.
3. Катод.
4. Соленоид.
5. Источник напряжения в цепи анода.
6. Миллиамперметр, измеряющий силу анодного тока.
7. Вольтметр, измеряющий анодное напряжение.
8. Источник напряжения в цепи соленоида.
9. Миллиамперметр, измеряющий силу тока соленоида.
10. Клеммы подключения к источнику питания катода.

4. ЗАДАНИЕ

4.1. Подготовьте таблицу измерений (*минимум на 11 значений*):

Таблица 4.1.1. – Зависимость анодного тока диода от тока соленоида

№	I_c, mA	I_a, mA	$\Delta I_a, \text{mA}$	$\Delta I_a / \Delta I_c, \cdot 10^{-4}$
1				
2				
3				
...				
11				

4.2. Отдельно запишите исходные данные.

Исходные данные

Длина соленоида $l = 0,1 \text{ м}$

Число витков соленоида $N = 1500$

Радиус анода $Ra = 0,005 \text{ м} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$

Анодное напряжение $Ua =$, B (Задается преподавателем!)

4.3. Подайте анодное напряжение $U_a \sim 15 \div 25 \text{ В}$, чтобы анодный ток был равен $I_a \leq 2 \text{ мА}$. Запишите его величину. Через одинаковые интервалы увеличивая силу тока в соленоиде, снимите зависимость анодного тока от тока соленоида, данные занесите в таблицу 4.1.1. Первое значение силы тока соленоида: 0 мА.

4.4. Постройте по данным таблицы зависимости анодного тока от тока соленоида, как на рис. 4.1.6.

4.5. Рассчитайте разность между соседними значениями силы тока анода. Запишите данные в третий столбик таблицы, начиная со второй строчки.

4.6. Каждое значение приращения тока анода (третий столбик) разделите на приращение тока соленоида (разницу между соседними значениями тока соленоида). Полученные значения производной запишите в четвертый столбик.

4.7. Постройте график производной от анодного тока по току в соленоиде, аналогичный рис. 4.1.7 (значения четвертого столбика от значений первого столбика). По максимуму зависимости определите критическое значение тока соленоида. Не забудьте перевести это значение в Амперы!

4.8. Рассчитайте по формуле (4.1.8) экспериментальное значение величины удельного заряда электрона.

4.9. Определите теоретическое значение удельного заряда электрона. Значения массы электрона и величины его заряда возьмите в справочных таблицах.

4.10. Определите относительную погрешность измерений по формуле:

$$\delta \left(\frac{e}{m} \right) = \frac{\left| \left(\frac{e}{m} \right)_{\text{теор}} - \left(\frac{e}{m} \right)_{\text{эксп}} \right|}{\left(\frac{e}{m} \right)_{\text{теор}}} \cdot 100 \%$$

4.11. Сделайте вывод из работы

5. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Одна таблица.
2. Два графика.
3. Значение критического тока соленоида.
4. Результаты расчетов удельного заряда электрона.

5. Результаты вычисления погрешностей.
6. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите действие электрических сил на электрон в магнетроне.
2. Опишите действие магнитных сил на электроны в магнетроне.
3. Изобразите направление электрического и магнитного полей в магнетроне в случае движения электронов по траекториям, изображенным на рис.4.1.5.
4. Запишите второй закон Ньютона для электрона в магнетроне. Укажите направление действующих на электрон сил.
5. Выведите формулу (4.1.8) для определения удельного заряда электрона.
6. Определите величину критической индукции магнитного поля в средней части магнетрона.
7. Приведите примеры практических устройств, использующих явление движения заряженных частиц в электромагнитном поле.
8. (*Задание повышенного уровня сложности*). Полагая катод заряженной нитью диаметром 1 мм, оцените величину напряженности электрического поля вблизи анода (Используйте данные в лабораторной работе радиус анода, анодное напряжение).

7. ЗАДАЧИ

(нумерация задач: первая цифра- номер бригады, вторая цифра- номер задачи)

1.1. Электрон, пойдя ускоряющую разность потенциалов 88 кВ , влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно его линиям индукции. Индукция поля равна $0,01 \text{ Тл}$. Определить радиус траектории электрона. ($0,1 \text{ м}$).

1.2. Найти радиус траектории протона в магнитном поле с индукцией $0,5 \text{ Тл}$, если он движется перпендикулярно вектору индукции и обладает кинетической энергией 3 МэВ . ($0,5 \text{ м}$).

2.1. Электрон, ускоренный разностью потенциалов $U=500 \text{ В}$, движется параллельно прямолинейному длинному проводу на расстоянии 1 см от него. Какая сила действует на электрон, если по проводнику пустить ток 5 А ? ($2,1 \cdot 10^{-16} \text{ Н}$).

2.2. Поток α - частиц (ядер атома гелия), ускоренных разностью потенциалов $U=1 \text{ МВ}$, влетает в однородное магнитное поле напряженностью $H = 1,2 \frac{\text{кА}}{\text{м}}$. Скорость каждой частицы направлена перпендикулярно к направлению магнитного поля. Найти силу F , действующую на каждую частицу. ($Q_\alpha = +2e, M_\alpha = 4m_{\text{протона}}$). ($4,7 \cdot 10^{-15} \text{ Н}$)

3.1. Электрон влетает в однородное магнитное поле, направление которого перпендикулярно к направлению его движения. Скорость электрона $v = 4 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Индукция магнитного поля $B = 1 \text{ мТл}$. Найти тангенциальное a_t и нормальное a_n ускорения электрона в магнитном поле. ($a_t = 0, a_n = 7 \cdot 10^{15} \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$)

3.2. Найти кинетическую энергию W (в электрон-вольтах) протона, движущегося по дуге окружности радиусом 60 см в магнитном поле с индукцией $B = 1 \text{ Тл}$. ($17,5 \cdot 10^6 \text{ эВ}$)

4.1. Протон и электрон, двигаясь с одинаковой скоростью, влетают в однородное магнитное поле. Во сколько раз радиус кривизны R_1 траектории протона больше радиуса кривизны R_2 траектории электрона? (*в 1840 раз*)

4.2. Протон и электрон, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле. Во сколько раз радиус кривизны $R_{\text{пр}}$ траектории протона больше радиуса кривизны $R_{\text{эл}}$ траектории электрона? (*в 42,9 раз*).

5.1. Заряженная частица движется в магнитном поле по окружности со скоростью $v = 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Индукция магнитного поля $B = 0,3 \text{ Тл}$. Радиус окружности $R = 4 \text{ см}$. Найти заряд q частицы, если известно, что ее кинетическая энергия $W = 12 \text{ кэВ}$. ($3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$).

5.2. На фотографии, полученной в камере Вильсона, траектория электрона в однородном магнитном поле представляет собой дугу радиусом $R = 10 \text{ см}$. Индукция магнитного поля $B = 10 \text{ мТл}$. Найти энергию электрона W (в электрон-Вольтах). ($88 \cdot 10^3 \text{ эВ}$).

6.1. Электрон движется на расстоянии 5 см параллельно прямолинейному длинному проводнику с кинетической энергией 1 кэВ . Какая сила действует на электрон, если по проводнику идет ток 1 А ? ($1,2 \cdot 10^{-17} \text{ Н}$).

6.2. В магнитном поле напряженностью $10^5 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ движется протон. Траектория движения протона - окружность радиусом 2 см . Найти кинетическую энергию протона. (300 эВ).

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с. Глава 14 § 115.
2. Черевко А.Г. Расчет неопределенности результатов измерений в физическом эксперименте [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Черевко; Сиб.гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Новосибирск: СибГУТИ, 2008. - 72 с.

Лабораторная работа 5.1

ИЗУЧЕНИЕ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОНТУРЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с физическими процессами, протекающими в электрическом контуре.
2. Исследовать влияние величин емкости и индуктивности на период колебаний в контуре с малым сопротивлением.
3. Установить характер зависимости логарифмического декремента затухания колебаний от сопротивления контура.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Исследуемый контур состоит из конденсатора емкостью C , катушки с индуктивностью L и резистора, имеющего сопротивление R . Схема соединения элементов электрической цепи приведена на рисунке 5.1.1.

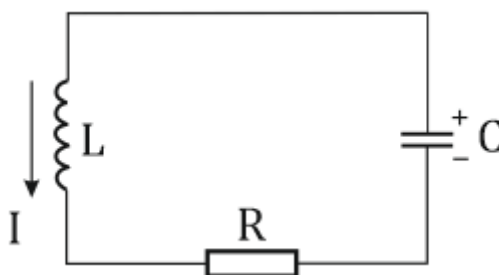


Рисунок 5.1.1 – Схема реального колебательного контура

Простой контур, который здесь рассматривается, является электрической цепью со сосредоточенными параметрами. Это означает, что емкость C сосредоточена в одном месте (конденсаторе), а индуктивность L и сопротивление R – в других местах контура (в катушке и в резисторе). Электрическими колебаниями в таком случае выступают повторяющиеся изменения электрических величин, характеризующих процессы в элементах контура. В конденсаторе, например, изменяются со временем следующие величины: заряд q и напряжение между обкладками U_c а также характеристики электрического поля конденсатора.

Электрические колебания (процессы) происходят во всех элементах цепи согласованно. А именно так, что мгновенные значения силы тока I одни и те же в любом месте контура.

Подобное имеет место в цепи постоянного (стационарного) тока.

Поэтому электрические процессы в колебательном контуре называются квазистационарными («квази» – приставка, означающая «якобы, как будто»). Квазистационарные процессы также подчиняются закону Ома, что и постоянный ток.

Для математического описания электрических процессов в контуре применим 2 правило Кирхгофа: «Сумма падений напряжения в контуре равна сумме действующих в нем ЭДС». В колебательном контуре имеются два падения напряжения: на конденсаторе U_c , равное $\frac{q}{C}$, и на сопротивлении, равное IR . При изменении силы тока в контуре в катушке индуктивности возникает ЭДС самоиндукции.

$$IR + U_c = -L \frac{dI}{dt} \quad (5.1.1)$$

Сила тока по определению связана с зарядом конденсатора соотношением:

$$I = \frac{dq}{dt} \text{ или } I = q' - \text{так обозначается производная по времени.}$$

Подставив выражения для тока I и напряжения U_c в формулу (5.1.1), получим дифференциальное уравнение в виде:

$$L \frac{dI}{dt} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0 \text{ или } Lq'' + Rq' + \frac{q}{C} = 0$$

Разделим уравнение на коэффициент при старшей производной (индуктивность катушки) и введем обозначения:

$$2\beta = \frac{R}{L} \text{ и } \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

После введения обозначений дифференциальное уравнение затухающих колебаний в контуре принимает вид:

$$q'' + 2\beta q' + \omega_0^2 q = 0. \quad (5.1.2)$$

Функция

$$q = q_0 e^{-\beta \cdot t} \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (5.1.3)$$

является решением дифференциального уравнения (5.1.2) и называется уравнением затухающих колебаний заряда конденсатора.

Циклическая частота затухающих колебаний

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2 \text{ или } \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (5.1.4)$$

Амплитуда заряда на конденсаторе убывает со временем по экспоненциальному закону:

$$q_m = q_0 e^{-\beta \cdot t} \quad (5.1.5)$$

Быстрота убывания определяется величиной β , которую называют коэффициентом затухания.

$$\beta = \frac{R}{2L}. \quad (5.1.6)$$

Так как ω есть действительное число и ω^2 не может быть отрицательным, то затухающие колебания имеют место только при условии (см. формулу 5.1.4):

$$\beta^2 < \omega_0^2, \text{ или } \frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}, \text{ или } R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (5.1.7)$$

Наконец, постоянные величины q_0 и φ_0 определяются начальными условиями. Если, например, вначале при разомкнутом контуре конденсатор заряжен (q_0 - величины заряда), а потом соединен с катушкой и резистором, то начальная фаза колебаний равна нулю, то есть $\varphi_0=0$. На рисунке 5.1.2 показаны графики затухающих колебаний в одном электрическом контуре при двух значениях коэффициента затухания. Причем, $\beta_2 > \beta_1$, а величины q_0 и φ_0 одинаковы. Пунктиром изображена зависимость амплитуды заряда q_m от времени. Эта зависимость называется экспоненциальной.

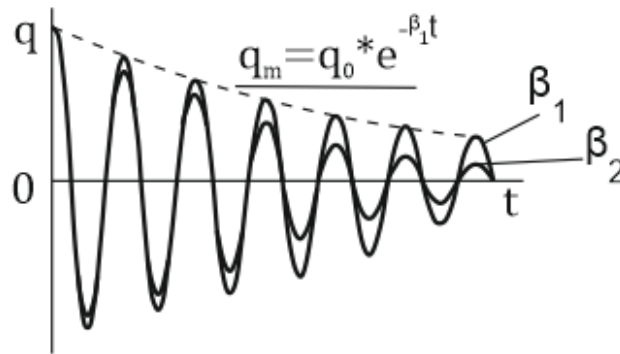


Рисунок 5.1.2 – Графики затухающих колебаний заряда с разными коэффициентами затуханий

Теперь обратим внимание на такие особенности колебательного процесса с затуханием, которые на рисунке заметить нельзя. Для этого найдем уравнение колебаний тока в контуре, приняв уравнение колебаний заряда в виде $q_0 e^{-\beta t} \cos \omega t$. Так как $I = q'$, то после дифференцирования получим:

$$I = -q_0 e^{-\beta \cdot t} [\omega \sin \omega t + \beta \cos \omega t].$$

Записав слагаемое $\omega \sin \omega t$ как $-\omega \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$ и складывая оба слагаемых выражения в скобках с помощью векторной диаграммы, получим уравнение колебаний тока в виде:

$$I = q_0 \omega_0 e^{-\beta \cdot t} \cos(\omega t + \psi), \quad (5.1.8)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \beta^2}$ (см. соотношение 5.1.4), а $\psi = \arctg\left(-\frac{\omega}{\beta}\right)$ есть сдвиг фаз между колебаниями заряда и тока.

Полученный результат приводит к следующим заключениям:

1. Амплитуда тока в начальный момент времени $I_0 = \omega_0 q_0$ не зависит от характеристик затухания.
2. В контурах с малым сопротивлением R и достаточно большой частотой ω реализуется неравенство: $\beta \ll \omega$. Это случай слабого затухания,

величина сдвига фаз Ψ стремится к $(-\frac{\pi}{2})$. Затухание влияет на частоту ω только во втором порядке.

В результате при СЛАБОМ ЗАТУХАНИИ уравнения колебаний заряда и тока можно приближенно записать так:

$$q = q_0 e^{-\beta \cdot t} \cos \omega_0 t, \quad I = -I_0 e^{-\beta \cdot t} \sin \omega_0 t. \quad (5.1.9)$$

Отметим, что период колебаний $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ определяется в этом случае известной формулой Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (5.1.10)$$

Из формулы (5.1.10) следует, что зависимость периода колебаний от \sqrt{LC} при слабом затухании является линейной. Установление этой зависимости является одной из целей данной работы

Точное же значение периода затухающих колебаний (в соответствии с формулой (5.1.4)) равно

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \quad (5.1.11)$$

Вернемся еще раз к экспоненциальной зависимости $q_m = q_0 e^{-\beta t}$, изображенной на рис. 5.1.2, чтобы рассказать о других важных характеристиках затухающих колебаний и дать им физическое объяснение.

Непрерывное рассеяние энергии на сопротивлении приводит к тому, что наибольший заряд конденсатора уменьшается с каждым периодом колебаний, именно:

$$q_m(0) > q_m(T) > q_m(2T) > \dots q_m(NT) > \dots,$$

где N - число колебаний. Эти амплитуды колебаний образуют убывающую геометрическую прогрессию. А это означает, что отношение величины каждого максимума $q_m(t)$ к последующему $q_m(t+T)$ одинаково. Безразмерная величина, равная натуральному логарифму отношения амплитудных значений, отстоящих по времени на период колебания, называется логарифмическим декрементом затухания:

$$\delta = \ln \frac{q_m(t)}{q_m(t+T)}. \quad (5.1.12)$$

С логарифмическим декрементом затухания связана (обратно пропорциональной зависимостью) еще одна характеристика затухающих колебаний - добротность Q . (Не путать с зарядом q !). В случае слабого затухания добротность определяется следующим образом:

$$Q = \frac{\pi}{\delta}, \quad (5.1.13)$$

то есть, чем меньше затухание, тем больше добротность.

Для того, чтобы выявить смысл характеристик затухания, введем понятие времени релаксации τ . Это такой промежуток времени, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в e раз ($e \approx 2,72$ - основание натуральных логарифмов).

Заменив t на τ в выражении $q_m = q_0 e^{-\beta \cdot t}$, получим $e^{-1} = e^{-\beta \cdot \tau}$, откуда:

$$\beta = \frac{1}{\tau}. \quad (5.1.14)$$

То есть коэффициент затухания β - это величина, обратная времени релаксации τ .

Связь коэффициента затухания и логарифмического декремента получают из формулы определения последнего (5.1.12):

$$\delta = \ln e^{\beta T} \Rightarrow \delta = \beta T, \quad (5.1.15)$$

где T - период колебаний.

В случае слабого затухания можно выразить логарифмический декремент затухания через параметры контура

$$\delta = R \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (5.1.16)$$

Исходя из формулы (5.1.16), зависимость логарифмического коэффициента затухания от сопротивления контура является линейной. Проверка данной зависимости составляет одну из целей работы.

В качестве меры затухания можно использовать также число N_e - число колебаний, совершающихся в контуре за время, равное времени релаксации τ . При малом затухании время τ больше периода колебаний. Так как $\beta = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{N_e T}$, то

$$\delta = \frac{1}{N_e} \quad (5.1.17)$$

$$Q = \pi N_e. \quad (5.1.18)$$

Таким образом, логарифмический декремент затухания есть величина, обратная числу колебаний, по истечении которых амплитуда уменьшается в e раз. Добротность же прямо пропорциональна числу N_e .

Исходя из формул (5.1.16) и (5.1.18), можно получить формулу зависимости добротности от параметров контура при слабом затухании:

$$Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (5.1.19)$$

Полная картина поведения электрического контура не ограничивается только затухающими колебаниями. В контуре с сильным затуханием (большим сопротивлением R) колебаний заряда нет, есть только монотонное убывание с

течением времени. Не будем рассматривать соответствующие решения дифференциального уравнения (5.1.2). Заметим только, что специальный случай «критического затухания» имеет место при сопротивлении R , равном

$R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ в котором величину $R_{кр}$ называют критическим сопротивлением контура.

Эта последняя формула подтверждает общую особенность, выражающуюся в том, что все рассмотренные выше характеристики процессов в колебательном контуре имеют связи с численными значениями параметров контура R , L и C . Исследования, проводимые в этой работе, имеют целью проверить некоторые из них.

3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Электрическая цепь собрана по схеме, изображенной на рис. 5.1.1. Колебания возбуждаются в контуре благодаря зарядке конденсатора от источника однополупериодного переменного тока с частотой 50 Гц. Затухающие колебания напряжения U_c на конденсаторе подаются на клеммы вертикального усиления осциллографа (рис. 5.1.3). При этом частоту развертки электрического сигнала осциллографом устанавливают примерно такой же, что и частота зарядки C .

В качестве элементов колебательного контура используются наборы конденсаторов, катушек индуктивности и сопротивлений (резисторов). Присоединение каждого элемента набора производится с помощью кнопочного выключателя. Для включения элементов R , L , C в цепь контура нужно нажать соответствующие кнопки и зафиксировать их в «утопленном состоянии».

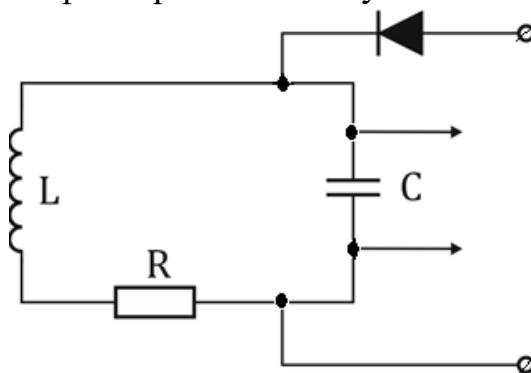


Рисунок 5.1.3 – Электрическая схема установки

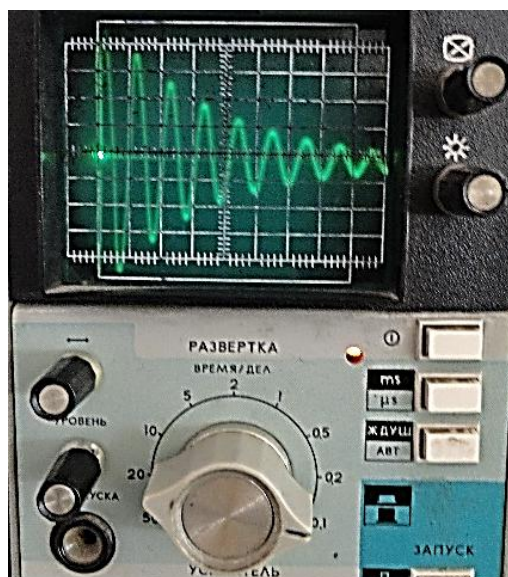


Рисунок 5.1.4 – Затухающие колебания на экране осциллографа

Значения сопротивления R , емкости C и индуктивности L для каждого положения кнопочных выключателей составляют отдельную таблицу. Таблица выдается на рабочее место при выполнении работы. Основные измерения проводятся с помощью осциллографа. Осциллограмма напряжения U_c выглядит так, как показано на рис. 5.1.4, то есть подобна графику колебаний заряда на конденсаторе на рис. 5.1.2 ($U_c = \frac{q}{C}$). По горизонтальной оси отложено время t , по вертикальной оси отложено напряжение на конденсаторе U_c . Время по горизонтальной оси можно рассчитать. Для этого поверх экрана нанесена прямоугольная сетка, калиброванная в единицах времени (мс или мкс). Назовем временную длительность одного квадрата сетки по горизонтали ценой деления развертки и обозначим ее γ . Для более точного измерения каждое деление «разделено» на доли по 0,2 (это указано на сетке). Тогда время t , в течение которого происходят N колебаний, будет равно $t = n \cdot \gamma$, где n – число квадратов сетки, в пределах которых укладываются эти N колебаний. На рис. 5.1.4 видно, что для $N=6$, то есть для шести периодов T , число n равно 6,7. Величину γ отсчитывают непосредственно на панели осциллографа. Отсчёт числа полных колебаний удобно проводить по амплитудным (максимальным) значениям напряжений. Начало отсчёта «0». На рис. 5.1.4 переключатель развертки по горизонтали указывает 0,1. Справа от переключателя нажата кнопка **ms**, значит, цена деления γ равна 0,1 мс. Отсчитываем шесть полных колебаний ($N=6$). На экране осциллографа время шести колебаний соответствует $n=6,7$ делениям. Тогда $t = n \cdot \gamma = 0,67$ мс. Время одного колебания, то есть период колебания $T = \frac{t}{N} = \frac{0,67}{6} = 0,116$ мс.

Важным параметром затухающих колебаний является время релаксации τ . За это время амплитуда колебания уменьшается в « e » раз ($e=2,72$ – основание натурального логарифма). Амплитуду напряжения можно измерять в делениях

(одно деление – это сторона квадрата сетки на экране осциллографа по вертикали). Цена деления в данном случае для наших рассмотрений не важна. Важно, чтобы формат изображения был удобен для рассмотрений. На рис. 5.1.4 амплитуда напряжения $U_{m0} = 4$ деления. Амплитуда через время релаксации ($\frac{4}{2,72} = 1,48$) $U_{m\tau} = 1,48$ деления. Осциллограмма показывает, что уменьшение амплитуды в «е» раз произошло за время $\tau = \gamma \cdot n = 0,1 \cdot 4,4 = 0,44$ мс.

Измерения в данной лабораторной работе производятся также на осциллографе «АТАКОМ ADS-2061М»

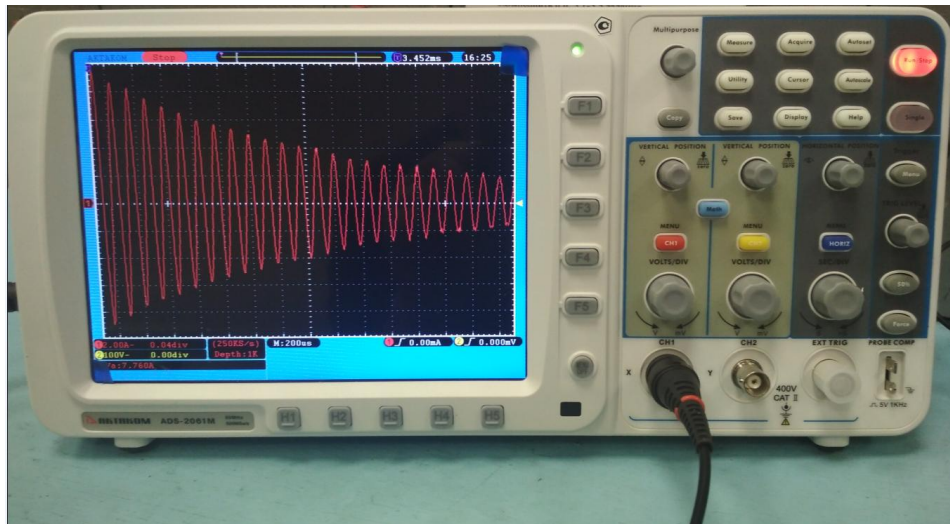


Рисунок 5.1.5 – Осциллограф

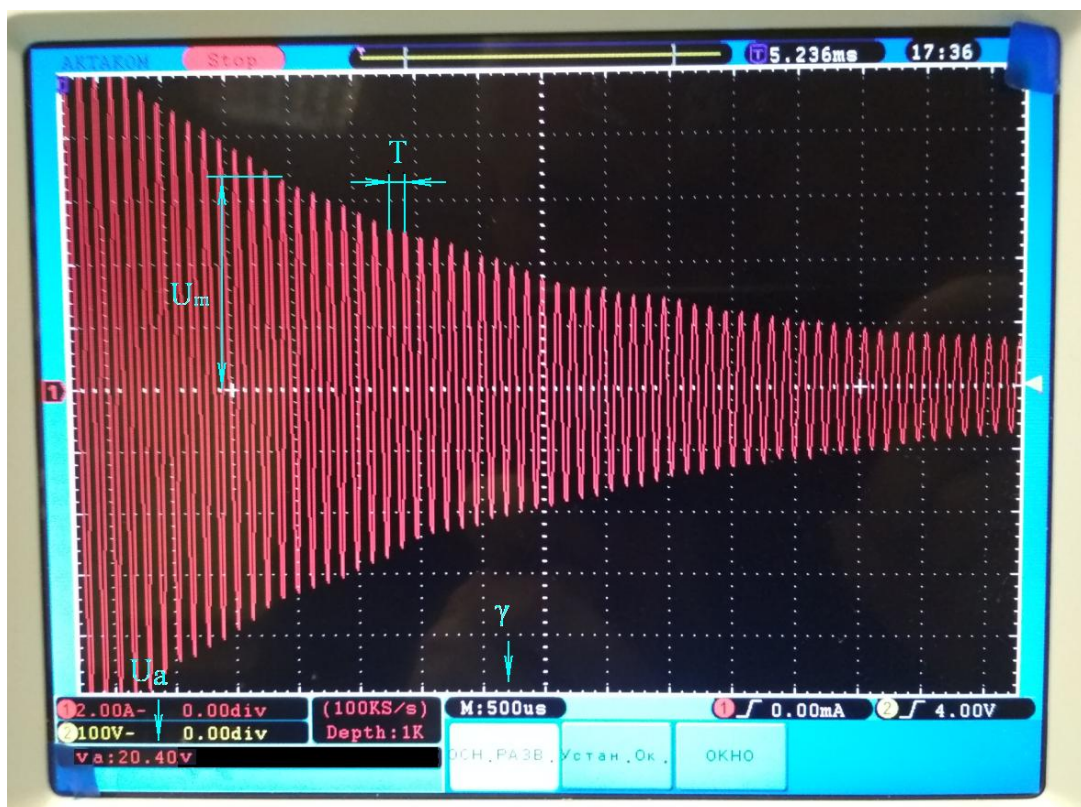


Рисунок 5.1.6 – Экран осциллографа

Рассмотрим экран осциллографа поподробнее (рис. 5.1.6). Цена деления временной развертки, отображается на экране осциллографа, в данном случае $\gamma = 500 \mu s$, (500 мкс). Цена деления амплитудной развертки $U_a = 20.4 V$, (20.4 В). T - период колебаний, U_m - амплитуда произвольного колебания.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Выпишите отдельно рабочие формулы

Сводная таблица 5.1.

№ формулы	Формула	Величины, входящие в формулы
	$t = n \cdot \gamma$	t – время колебаний, определенное по осциллографу n – число делений γ – цена деления осциллографа
	$T_{\text{экс}} = \frac{t}{N}$	$T_{\text{экс}}$ – период колебаний, определенный экспериментально t – время N колебаний, определенное по осциллографу N – заданное число колебаний
	$\tau = \gamma \cdot n$ $R_0 = \frac{2L}{\tau}$	τ – время релаксации, за которое амплитуда уменьшается в e раз R_0 – сопротивление проводов катушки индуктивности L – индуктивность катушки
	$T = 2\pi\sqrt{LC}$	T – теоретическое значение периода колебаний в контуре с малым затуханием C – емкость конденсатора L – индуктивность катушки
	$\delta_{\text{экс}} = \frac{1}{N} \ln\left(\frac{U_{m0}}{U_{mN}}\right)$	$\delta_{\text{экс}}$ – экспериментальное значение логарифмического декремента затухания N – число колебаний U_{m0} – начальная амплитуда колебаний U_{mN} – амплитуда N -того колебания
5.1.16	$\delta_{\text{теор}} = R_{\text{полное}} \pi \sqrt{\frac{C}{L}}$	$\delta_{\text{теор}}$ – теоретическое значение логарифмического декремента затухания $R_{\text{полное}}$ – полное сопротивление контура
	$R_{\text{полное}} = R_0 + R$	$R_{\text{полное}}$ – полное сопротивление контура R_0 – сопротивление проводов катушки индуктивности

		R – сопротивление магазина резисторов
5.1.13	$Q = \frac{\pi}{\delta},$	Q – добротность контура δ – значение логарифмического декремента затухания

4.1. Задание 1. Определить сопротивление R_0 проводов катушки индуктивности.

4.1.1. Включить источники напряжения и осциллограф.

4.1.2. Ввести в цепь контура конденсатор с наименьшей электроемкостью C , катушку индуктивности с индуктивностью в пределах $L = (50 \div 150) \text{ мГн}$. Набор сопротивлений оставить выключенным. При этом цепь контура будет замкнутой, а сопротивление равно R_0 провода катушки включенной катушки индуктивности. Записать значения электроемкости и индуктивности в системе СИ.

4.1.3. Получить на экране осциллографа такую осциллограмму, в которой можно выделить две амплитуды колебаний U_m , отличающиеся (по вертикальным делениям сетки) в 2,7 раза (число $e \approx 2,7$). Затем отсчитывают интервал времени $\Delta t = \tau$, разделяющий эти две амплитуды. В горизонтальных делениях сетки интервал равен $\Delta t = \gamma \cdot n$ (γ – цена деления, n – число делений). А по смыслу затухания колебаний – это время релаксации τ . Итак, $\tau = \gamma n$.

4.1.4. Используя обратную зависимость времени релаксации и коэффициента затухания: $\beta = \frac{1}{\tau}$ и обозначение $2\beta = \frac{R}{L}$ в уравнении (5.1.2.), получим формулу для расчета сопротивления R_0 : $R_0 = 2 \frac{L}{\tau}$. Вычисления выполнить в системе единиц СИ.

4.2. Задание 2. Исследовать зависимость периода затухающих колебаний от электроемкости и индуктивности колебательного контура.

Выполнение этого задания связано с отсчетом по осциллограмме некоторого количества N циклов (или периодов) колебаний и количества клеток n временной развертки в которые укладываются эти колебания.

4.2.1. Подготовить таблицу измерений (Таблица 5.1.1). Записать в таблицу значения параметров контура L , C , а также N . Число колебаний N задает преподаватель. Если преподаватель не задает значение, то, по умолчанию, $N = 5$.

4.2.2. Определить γ и n , записать в таблицу

4.2.3. Вычислить экспериментальный период колебаний по формуле

$$T_{\text{эксп}} = \frac{t}{N} = \frac{n\gamma}{N}$$

4.2.4. Рассчитать значения \sqrt{LC} , учитывая единицы измерения величин в системе СИ.

4.2.5. По формуле Томсона рассчитать теоретическое значение периода колебаний: $T_{\text{теор}} = 2\pi\sqrt{LC}$

4.2.6. При сопротивлении R_0 затухание колебаний мало. Поэтому для проверки зависимости периода T от параметров контура следует построить график $T_{\text{эксп}}$ как функцию от \sqrt{LC}

4.2.7. Построить график зависимости для теоретического значения периода $T_{\text{теор}}$ от \sqrt{LC} на этих же осях, что и экспериментальный график. Сравнить графики

Таблица 5.1.1. – Зависимость периода колебаний от \sqrt{LC}

№ n/n	C, нФ	L, мГн	N	n	γ , мкс/дел	t, мкс	$T_{\text{эксп}}$, мкс	\sqrt{LC} , мкс	$T_{\text{теор}}$, мкс
1									
2									
3									
4									
5									
6									

4.3. Задание 3. Исследовать зависимость логарифмического декремента затухания от сопротивления контура.

4.3.1. Подготовить таблицу измерений (Таблица 5.1.2) . перед таблицей записать значения емкости и индуктивности контура. Эти значения НЕ МЕНЯЮТСЯ в течение эксперимента.

4.3.2. Рассчитать и записать в таблицу для каждого опыта полное сопротивление контура.

4.3.3. Выбрать две далекие друг от друга амплитуды колебаний U_{m0} и U_{mN} . Отсчитать число циклов колебаний N между ними. Используя деления вертикальной оси сетки, измерить величины амплитуд U_{m0} и U_{mN} . Записать значения в таблицу. Если преподаватель не скажет иначе, то по умолчанию для первых четырех опытов брать $N = 5$, для последнего опыта $N = 3$.

4.3.4. Вычислить для всех значений $R_{\text{полное}}$ логарифмический декремент затухания по формуле $\delta_{\text{эксп}} = \frac{1}{N} \ln\left(\frac{U_{m0}}{U_{mN}}\right)$.

4.3.5. Построить график зависимости $\delta_{\text{эксп}}$ от сопротивления $R_{\text{полное}}$.

- 4.3.6. По формуле (5.1.16) определить $\delta_{теор}$ теоретические значения логарифмического декремента затухания.
- 4.3.7. Построить график $\delta_{теор}$ от сопротивления $R_{полное}$ для теоретических значений логарифмического декремента затухания на одном листе с экспериментальным графиком. Сравнить графики.
- 4.3.8. Определить экспериментальные и теоретические значения добротности по формуле (5.1.13), подставляя соответствующие значения логарифмического декремента затухания. Сравнить их между собой.

Таблица 5.1.2 – Исследование логарифмического декремента затухания и добротности от сопротивления контура

$N \text{ } n/n$	$R_{полн},$ Ом	N	$U_{m0},$ дел	$U_{mN},$ дел	$\delta_{эксп}$	$\delta_{теор}$	$Q_{эксп}$	$Q_{теор}$
1								
2								
3								
4								
5								

4.4. Сделать вывод из работы

5. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Две таблицы.
2. Два графика.
3. Результаты определения сопротивления проводов катушки.
4. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. За какое время изменения тока в катушке индуктивности передается к сопротивлению контура, если длина соединительного провода равно $0,1 \text{ м}$? Оценить при этом наибольшую возможную частоту колебаний в электрическом контуре.
2. Какие физические законы описывают процессы, протекающие в колебательном контуре?
3. В чем состоит отличие дифференциального уравнения свободных колебаний в реальном (с учетом сопротивления) электрическом контуре от такого же в идеальном контуре?
4. От чего зависит быстрота уменьшения амплитуды напряжения на сопротивлении R контура? Изобразить закономерность графически.

5. Какой промежуток времени колебаний называется временем релаксации? Зависит ли время релаксации от сопротивления контура?

6. Какая закономерность затухающих колебаний выражается с помощью логарифмического декремента затухания? Каков физический смысл этой величины δ ?

7. Какова зависимость добротности электрического контура Q от параметров R, L, C ?

8. Какие формулы подтверждают зависимость: а) T от \sqrt{LC} , б) δ от R ? Согласуются ли они с графиками, полученными опытным путем? (подумать над этим пунктом)

7. ЗАДАЧИ

(нумерация задач: первая цифра- номер бригады, вторая цифра- номер задачи)

1.1. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 444 нФ и катушки с индуктивностью 4 мГн . На какую длину волны настроен контур? (2511 м).

1.2. Напряжение на обкладках конденсатора в колебательном контуре меняется по закону $U = 10 \cos(10^4 t) \text{ (В)}$. Емкость конденсатора 10 мкФ . Найти индуктивность контура и закон изменения силы тока в нем. (10^{-3} Гн ; $-\sin 10^4 t \text{ (А)}$).

2.1. На какой диапазон длин волн можно настроить колебательный контур, если его индуктивность 4 мГн , а емкость может меняться от 34 нФ до 266 нФ ? (от 695 м до 1943 м).

2.2. Сила тока в колебательном контуре изменяется по закону $I = 0,1 \sin 10^3 t \text{ (А)}$. Индуктивность контура $0,01 \text{ Гн}$. Найти закон изменения напряжения на конденсаторе и его емкость. ($-\cos 10^3 t \text{ (В)}$; 10^{-4} Ф).

3.1. Конденсатору емкостью 4 мкФ сообщают заряд 10 мкКл , после чего он замыкается на катушку с индуктивностью 10 мГн . Чему равна максимальная сила тока в катушке? (50 мА).

3.2. Найти отношения энергии магнитного поля колебательного контура к энергии его электрического поля для момента времени $\frac{T}{8}$. (1).

4.1. Изобразить схему колебательного контура с двумя параллельно соединенными конденсаторами. Емкость одинакова. Как изменится частота колебаний, если один конденсатор отсоединить? (увеличится).

4.2. Колебательный контур состоит из катушки индуктивности 25 мГн , конденсатора емкостью 10 мкФ и резистора сопротивлением 1 Ом . Определить период колебаний контура и логарифмический декремент затухания. ($3,14 \text{ мс}$; $6,3 \cdot 10^{-2}$).

5.1. Логарифмический декремент затухания электрического контура $\delta = 0,2$. Во сколько раз уменьшится амплитуда колебаний за время одного колебания заряда? ($1,22$).

5.2. В электрическом контуре с малым сопротивлением число колебаний за время релаксации равно $N_e = 12,5$. Найти величину коэффициента затухания β , если частота колебаний равна $\omega = 10^4 \text{ Гц}$ ($127,3 \text{ с}^{-1}$).

6.1. Измеренные с помощью осциллограммы период колебаний и время релаксации соответственно равны: $T = 5 \times 10^{-5} \text{ с}$ и $\tau = 1,25 \text{ мс}$. На сколько процентов убывает амплитуда энергии за период колебания? (8%).

6.2. Изобразить схему колебательного контура с двумя последовательно соединенными катушками индуктивности. Сопротивления R_{np} и индуктивности у них одинаковы. Резисторов в цепи контура нет. Во сколько раз изменится добротность контура, если одну катушку отсоединить? ($2^{-\frac{1}{2}}$).

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 560с. Глава 18 §140 – 146.

2. Черевко А.Г. Расчет неопределенности результатов измерений в физическом эксперименте [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Черевко ; Сиб.гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Новосибирск : СибГУТИ, 2008. - 72 с.

Лабораторная работа 5.2 ИЗУЧЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СТРУНЫ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение колебаний в системах с распределёнными параметрами на примере поперечных стоячих волн в упругой горизонтальной струне.
2. Определение линейной плотности струны.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Объектом исследования в данной работе является однородная струна металлический провод, закрепленная на концах. Струна натянута и сохраняет свое натяжение. Сила натяжения равна F_H . Когда на малом участке струны ΔL создается поперечное смещение ξ (кси), изменяющиеся со временем по закону синуса, то деформация передается от участка ΔL к другим участкам струны. В результате возникают две волны, распространяющиеся в противоположных направлениях. После отражения от закрепленных концов струны волны будут двигаться навстречу друг другу. Наступает суперпозиция двух бегущих поперечных волн, в результате чего на струне устанавливается стоячая волна. Именно этот колебательный процесс наблюдают в работе при выполнении измерений.

Бегущие волны

Обратимся к математическому описанию волнового процесса. Будем предполагать, что бегущие поперечные волны являются синусоидальными и описываются следующими уравнениями:

- 1) прямая волна (распространяется в положительном направлении оси X)

$$\xi_1 = A \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right) ; \quad (5.2.1)$$

- 2) обратная волна (распространяется в направлении, противоположном направлению оси X)

$$\xi_2 = A \cos\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{\lambda} x + \varphi\right); \quad (5.2.2)$$

A - амплитудное значение смещения ξ (амплитуда волны), $\omega = \frac{2\pi}{T}$ - круговая частота, λ - длина волны, $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число, φ – разность фаз колебаний для прямой и обратной волны.

Скорость распространения синусоидальных волн v_0 связана с другими характеристиками такими соотношениями:

$$v_0 = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \nu ; \quad (5.2.3)$$

Величина v_0 в струне определяется не частотой или длиной волны, а параметрами упругой среды (см. приложение 2 к данной работе). Зависимость имеет следующий вид:

$$v_0 = \sqrt{\frac{F_H}{\rho}}; \quad (5.2.4)$$

В этой формуле F_H - сила натяжения струны, ρ - линейная плотность струны (масса на единицу длины).

Стоячие волны

Струна, закрепленная на обоих концах, ограничивает распространение бегущих волн. В точках закрепления струны $x = 0$ и $x = L$ волны отражаются, имея в этих точках смещение ξ равное нулю. А в точках, лежащих в интервале $0 < x < L$, смещение равно алгебраической сумме смещений, создаваемых прямой и обратной волной, то есть $\xi = \xi_1 + \xi_2$;

Используя уравнения (5.2.1) и (5.2.2), после элементарных преобразований имеем:

$$\xi = 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\varphi}{2}\right); \quad (5.2.5)$$

Уравнение (5.2.5) должно удовлетворять так называемым краевым условиям. Рассмотрим вначале условие, согласно которому смещение равно нулю при $x = 0$ для любого момента времени:

$$\xi(0, t) = 2A \cos\frac{\varphi}{2} \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\varphi}{2}\right) = 0; \quad (5.2.6)$$

Из этого заключаем, что $\cos\frac{\varphi}{2} = 0$, следовательно, $\frac{\varphi}{2} = \frac{\pi}{2}$. Подставив значение $\frac{\varphi}{2}$ в уравнение (5.2.5) и заменив функции косинуса на функции синуса (из элементарной тригонометрии), получим уравнение стоячей волны в виде:

$$\xi(x, t) = 2A \sin\frac{2\pi}{\lambda}x \sin\omega \cdot t; \quad (5.2.7)$$

Из уравнения (5.2.7) следует, что в каждой точке струны происходят колебания одной и той же частоты (той же, что и бегущей волны), но различной амплитуды. Амплитуда стоячей волны B определяется как модуль сомножителей $2A$ и $\sin\frac{2\pi}{\lambda}x$, не зависящих от времени, именно:

$$B = \left| 2A \sin\frac{2\pi}{\lambda}x \right|; \quad (5.2.8)$$

Отличие поперечной бегущей волны и поперечной стоячей волны иллюстрируется двумя моментальными снимками каждой волны на рисунке 5.2.1.

Интервал времени Δt между снимками гораздо меньше периода колебаний T . Ближайшее расстояние между двумя точками среды обозначено λ . Это и есть длина бегущей волны.

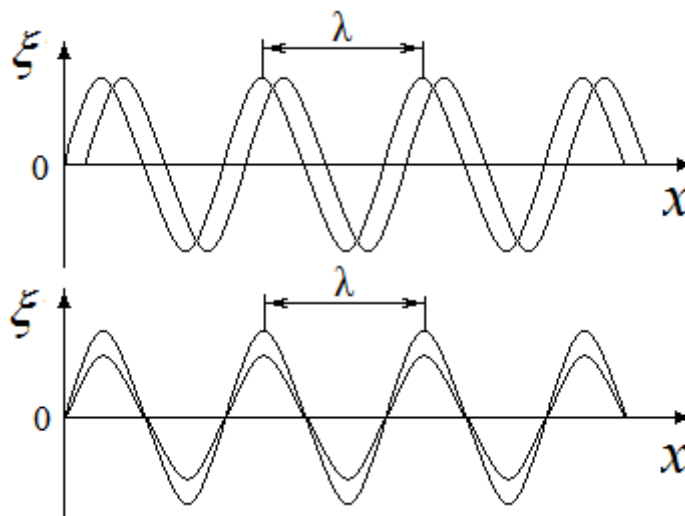


Рисунок 5.2.1 Поперечные бегущая и стоячая волны

Уравнение (5.2.7) получено в результате применения только одного краевого условия для закрепленной струны, именно $\xi(0, t) = 0$. Теперь используем второе условие: при $x = L$ уравнение (5.2.7) должно обращаться в нуль. Следовательно, имеем:

$$\xi(L, t) = \left| 2A \sin \frac{2\pi}{\lambda} L \right| \sin \omega \cdot t = 0 ;$$

Равенство нулю для любого момента времени, возможно, при $\left| \sin \frac{2\pi}{\lambda} L \right| = 0 ;$

Отсюда получим:

$$\frac{2\pi L}{\lambda_n} = n\pi \quad \text{или} \quad L = n \frac{\lambda_n}{2}, \quad \text{где } n = 1, 2, 3 \dots \quad (5.2.9)$$

Этот результат говорит о том, что стоячие волны устанавливаются на данной струне при суперпозиции только таких бегущих волн, длина волны которых удовлетворяет условию (5.2.9). Иначе говоря, на длине струны должно укладываться целое число полуволин $\frac{\lambda_n}{2}$;

Последовательность возможных значений длин волн выглядит так:

$$\lambda_1 = 2L, \lambda_2 = \frac{2L}{2}, \lambda_3 = \frac{2L}{3}, \dots, \lambda_n = \frac{2L}{n} ;$$

Каждой длине волны λ_n соответствует своя частота ν_n (см. (5.2.3)). Так как $\nu_n = \frac{v_0}{\lambda_n}$, то гармоническая последовательность частот колебаний имеет вид:

$$\nu_n = \frac{v_0}{L}, \nu_2 = 2\nu_1, \nu_3 = 3\nu_1, \dots, \nu_n = n\nu_1 ;$$

Эту совокупность частот называют спектром собственных частот колебаний однородной закрепленной струны. Любая частота спектра вычисляется по формуле:

$$\nu_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F_H}{\rho}} ; \quad (5.2.10)$$

Частоты спектра получили в теории звуковых колебаний особые названия: ν_1 - основной тон $n = 1$ колебаний, ν_2 - 1-й обертон $n = 2$, ν_3 - 2-й обертон $n = 3$, ν_4 - 3-й обертон $n = 4$ и так далее. Имеется и другое название: частоты ν_2, ν_3, ν_4 и так далее называются второй, третьей, четвертой... гармониками основной частоты ν_1 . Стоячие волны на струне называются модами, где n - номер моды.

Следовательно, исходя из формулы (5.2.10), можно выразить линейную плотность струны.

$$\rho = \frac{n^2 \cdot F_H}{4L^2 \cdot \nu_n^2} ; \quad (5.2.11)$$

СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ – это особый случай интерференции, возникающий при наложении двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами.

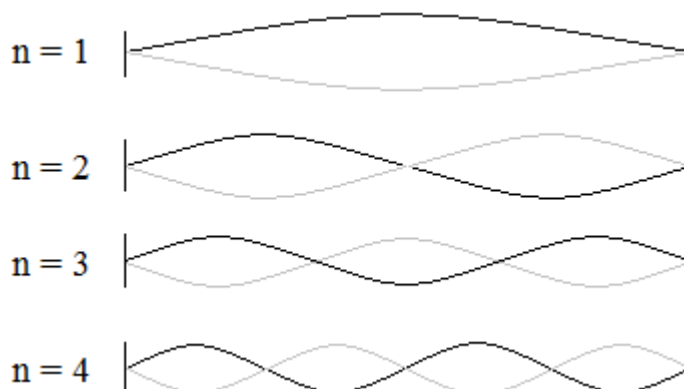


Рисунок 5.2.2 Спектр собственных колебаний струны

3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В качестве струны (С) обычно используется провод с изолирующим покрытием. На рисунке 5.2.3 один конец струны закреплен держателем, другой конец присоединен к динамометру (Д), который измеряет силу натяжения F_H струны. Натяжение струны можно изменять, перемещая подвижную часть держателя с помощью специального винта. Концы струны продолжены монтажным проводом, который подключает струну к клеммам генератора (ЗГ). Между держателем и динамометром располагается подвижный, постоянный магнит (М).

Поперечная сила, возбуждающая волны в струне, создается благодаря магнитному полю. Источником поля является U-образный постоянный магнит,

который располагается таким образом, чтобы участок струны свободно проходил между полюсами магнита.

Когда по струне течет ток I , то на участок струны длиной Δl действует сила Ампера $F = IB\Delta l$, где B – вектор магнитной индукции поля магнита. В данной работе сила тока имеет небольшое значение, длина Δl гораздо меньше длины всей струны, поэтому сила F вызывает очень малое смещение.

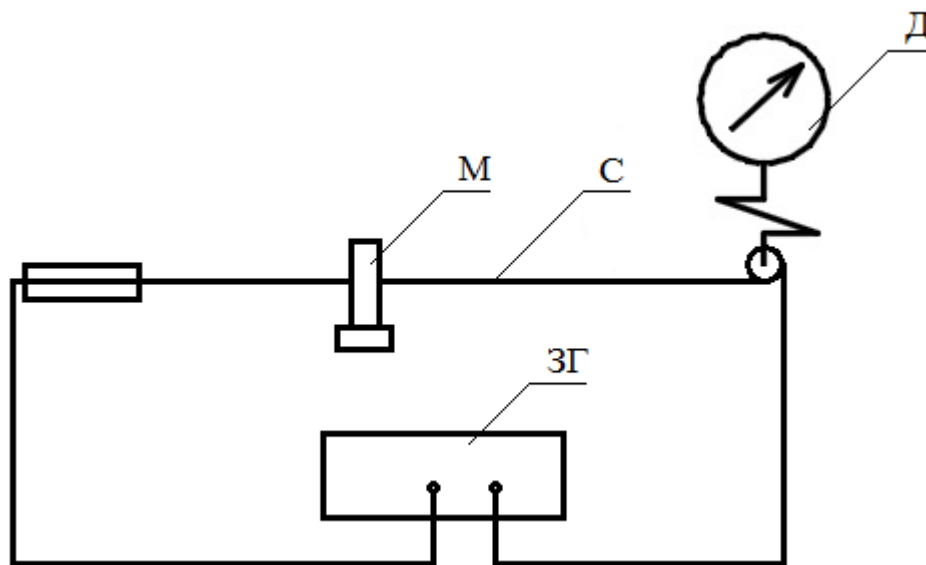


Рисунок 5.2.3 Схема лабораторной установки.

Только когда частота переменного тока близка к частоте собственных колебаний ν_n струны, тогда та же самая сила F вызывает резкое увеличение амплитуды вынужденных колебаний. Наступает резонанс и колебания струны легко увидеть и услышать. Для получения устойчивых колебаний следует: во-первых переместить магнит в пучность стоячей волны, во-вторых, подобрать такую частоту генератора, при которой амплитуда колебаний в пучности становится наибольшей.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

4.1. Ознакомится с органами управления генератора ЗГ. Установить рекомендуемую преподавателем силу натяжения F_n струны. Измерить длину закрепленной части струны и установить постоянный магнит по середине. Записать данные в таблицу.

4.2. Включить тумблер «сеть» генератора. Вывести плавный регулятор выходного напряжения на максимум. Установить частоту электрического напряжения верньерным устройством на минимально возможное значение частоты.

4.3. Плавным увеличением поворота верньерного устройства, увеличить частоту колебаний, добиться резкого увеличения амплитуды колебаний соответствующих основному тону $n = 1$ см. рисунок 5.2.2. Записать данные в таблицу.

4.4. Повторить измерения собственных частот колебаний струны с тем же напряжением для 1-го, 2-го, 3-го, обертонов. При этом магнит помещают каждый раз на место предполагаемой пучности. Данные занести в таблицу.

4.5. Построить график зависимости собственной частоты колебаний струны ν_n от номера моды n .

4.6. По данным измерений используя формулу 5.2.10 определить значение линейной плотности струны.

4.7. Рассчитать погрешность измерений линейной плотности струны:

Относительная погрешность

$$\delta\rho = \sqrt{(\delta F_H)^2 + (2\delta L)^2 + (2\delta\nu)^2}, \quad (5.2.12)$$

где относительная погрешность силы натяжения струны $\delta F_H = \frac{\Delta F_H}{F_H}$,

относительная погрешность измерения длины струны $\delta L = \frac{\Delta L}{L}$ и

относительная погрешность измерения частоты колебаний $\delta\nu = \frac{\Delta\nu}{\nu}$.

Абсолютные погрешности измерений силы натяжения нити ΔF_H , длины струны ΔL и частоты $\Delta\nu$ принимаются равными половине цены деления измерительного прибора.

Абсолютная погрешность линейной плотности струны

$$\Delta\rho = \delta\rho \cdot \langle \rho \rangle. \quad (5.2.13)$$

4.8. Запишите окончательный результат в виде

$$\rho = \langle \rho \rangle \pm \Delta\rho, \quad \delta\rho = \dots \% \quad (5.2.14)$$

Таблица 5.2.1 Определение линейной плотности струны

Частоты спектра колебаний	Сила натяжения F_H , Н	Длина струны L , м	Частота колебаний ν , Гц	Линейная плотность ρ , кг/м	Среднее значение линейной плотности $\langle \rho \rangle$, кг/м
основной тон $n = 1$					
первый обертон $n = 2$					
второй обертон $n = 3$					
третий обертон $n = 4$					

5. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Одна таблица.
2. Один график.
3. Расчеты линейной плотности струны.
4. Расчеты погрешности измерений линейной плотности струны.
5. Выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое волна?
2. Какая волна называется продольной? Какая волна называется поперечной?
3. Что такое волновой фронт и волновая поверхность?
4. Что называется длиной волны, волновым числом?
5. Какая волна является: а) бегущей; б) стоячей; в) плоской; г) сферической? Чем стоячая волна отличается от бегущей?
6. При каких условиях возникают стоячие волны?
7. Запишите уравнение стоячей волны.
8. Запишите волновое уравнение.
9. Что такое пучность и узел стоячей волны? Чему равно расстояние между двумя ближайшими пучностями стоячей волны?
10. Запишите формулы определения координат пучностей и узлов стоячей волны.
11. Объясните механизм образования стоячих волн при отражении бегущей волны от границы раздела двух сред различной плотности.
12. От чего зависит скорость распространения упругой волны в струне?
13. Что такое основная частота струны? Что такое гармоники основной частоты?
14. Запишите соотношение между частотой и силой натяжения струны для собственных колебаний струны

7. ЗАДАЧИ

(нумерация задач: первая цифра - номер бригады, вторая цифра - номер задачи)

1.1 На рисунке 5.2.4 показано положение точек струны в момент наибольшего смещения, $\xi = 5$ мм. Спустя время равное $\Delta t = 0,01$ с, смещение точек струны изменяет знак на противоположный. Чему равна максимальная скорость колебаний точек струны?

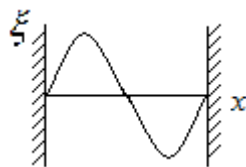


Рисунок 5.2.4

1.2 Амплитуда стоячей волны в пучности равна $\xi = 5$ мм. В каких точках рисунка 5.2.4 относительная деформация струны имеет наибольшее значение? Найти эту величину, если длина струны $L=0,94$ м.

2.1 Какой должна быть сила натяжения закрепленной на концах стальной струны, длиной 63,5 см, чтобы частота колебаний была в основном тоне (ми - первой октавы 329,63 Гц)? Диаметр поперечного сечения струны равен 0,23 мм, плотность стали $7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

2.2 Используя найденную в лабораторной работе наименьшую частоту собственных колебаний, вычислить длину математического маятника, массой 10 г. имеющего такую же собственную частоту.

3.1 При каком обертоме частота соответствующих колебаний струны длиной 1 м, численно равна фазовой скорости бегущей в этой струне волны?

3.2 Какой должна быть сила натяжения закрепленной на концах стальной струны, длиной 63,5 см, чтобы частота колебаний была в основном тоне (си - малой октавы 246,94 Гц)? Диаметр поперечного сечения струны равен 0,28 мм, плотность стали $7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

4.1 Вычислить величину поперечной силы упругости в пучности стоячей волны. Если она действует на малый участок струны $\Delta \ell = 1$ мм. Необходимые данные взять из лабораторной работы.

4.2 На рисунке показано положение точек струны в момент наибольшего смещения, ξ – взять из лабораторной работы, для основного тона. Спустя время равное $\Delta t = 0,015$ с, смещение точек струны изменяет знак на противоположный. Чему равна максимальная скорость колебаний точек струны?

5.1 Зависимость смещения точек колеблющейся струны от координаты x в некоторый фиксированный момент времени имеет вид $\xi = 10^{-2} \sin 2\pi x$ и соответствует на рисунке 5.2.4. Найти длину струны.

5.2 Волновое уравнение, соответствующее стоячей волне на струне, имеет вид: $\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 60 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$. Чему равен период колебаний во втором обертоме, если длина струны 0,6 м.

6.1 Длина закрепленной на концах струны равна 0,9 м, фазовая скорость 58 м/с. Вычислить первые три частоты спектра собственных колебаний.

6.2 При каком обертоме частота соответствующих колебаний струны длиной 1 м, в два раза больше фазовой скорости бегущей в этой струне волны?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2001, гл.19, §157.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000, гл.29, §29.6

Приложение 1
Образец оформления титульного листа

**Министерство цифрового развития, связи и массовых
коммуникаций Российской Федерации**
СибГУТИ

Кафедра физики
Лабораторная работа 1.1

**ПРОВЕРКА ОСНОВНОГО ЗАКОНА ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО
ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА**

Выполнил студент:

группы:

Проверил преподаватель:

Измерения сняты _____
Дата, подпись преподавателя

Отчет принят _____
Дата, подпись преподавателя

Работа зачтена _____
Оценка, дата, подпись преподавателя

Новосибирск 2024 г.

Приложение 2

Приближенные значения некоторых фундаментальных физических постоянных

Величина	Обозначение	Значение
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ А/м}^2; \text{Гн/м}$
Электрическая постоянная	ε_0	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Элементарный заряд	e	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя: электрона протона нейтрона	m_e m_p m_n	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ $1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Удельный заряд электрона	e/m_e	$1,759 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Больцмана	k	$1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Гравитационная постоянная	G	$6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н м}^2/\text{кг}^2$

Приложение 3

Значения работы выхода электронов из некоторых материалов³

Металл	Работа выхода, эВ	Металл	Работа выхода, эВ
Цезий	1,81	Калий	2,22
Натрий	2,35	Вольфрам	4,54
Вольфрам + Цезий	1,62	Вольфрам + торий	3,0
Алюминий	4,25	Никель	4,50
Платина	5,32	Цинк	3,74

³ Физические величины: Справочник/Под ред. И.С. Григорьева, Е.З Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с. – с.568

Приложение 4

Обработка погрешностей

Правила записи результата

1. Погрешность округляют до двух значащих цифр, если первая единица. Во всех остальных случаях округляют до одной значащей цифры.
2. Измеренное значение заканчивается цифрой того десятичного разряда, который использован в погрешности. Например: $l = 1,500 \pm 0,003 \text{ м}$

1. Погрешности прямых измерений

Прямые измерения – измерения, произведенные непосредственно приборами

В основе теории определения случайных погрешностей прямых измерений лежат положения, разработанные Гауссом.

- 1) Погрешности равной абсолютной величины и противоположных значений равновероятны
- 2) Чем больше абсолютная величина погрешности, тем она менее вероятна.

Пусть n – число произведенных измерений некоторой величины A . При этом получен некоторый ряд значений этой величины $A_1, A_2, A_3, \dots A_n$. Найдем среднее арифметическое значение величины A :

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (\text{П.1})$$

Найдем абсолютную погрешность каждого измерения, которая определяется как отклонение каждой измеряемой величины от истинного значения. Поскольку истинное значение неизвестно, то за величину, близкую к истинной, принимается среднее арифметическое значение (П.1):

$$\begin{aligned} \Delta A_1 &= |A_1 - \bar{A}| \\ \Delta A_2 &= |A_2 - \bar{A}| \\ \Delta A_n &= |A_n - \bar{A}| \end{aligned} \quad (\text{П.2})$$

При достаточно большом числе измерений границы погрешностей симметричны. Их можно оценить с помощью среднего квадратичного отклонения результата измерения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta A_i)^2} \quad (\text{П.3})$$

Или стандартного отклонения (оценка среднеквадратического отклонения случайной величины относительно её математического ожидания):

$$S(A) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta A_i)^2}{n(n-1)}} \quad (\text{П.4})$$

При этом предполагается, что измерения производятся приборами, собственная погрешность которых значительно меньше погрешностей отдельных измерений ΔA_i . Следует отметить, что в измерительных приборах, если нет указаний на класс точности, за абсолютную погрешность можно принимать половину цены деления шкалы.

Числовое значение результата измерений должно оканчиваться цифрой того же порядка, что и значение погрешности $S(A)$.

2. Погрешности косвенных измерений

Зачастую приходится определять физические величины из так называемых косвенных измерений, т.е., подстановкой непосредственно измеряемых величины в расчетные формулы.

$$A = f(B, C, D \dots)$$

$$A_{\text{наил}} = f(B_{\text{наил}}, C_{\text{наил}}, D_{\text{наил}} \dots)$$

где B, C, D – непосредственно измеряемые величины, от которых зависит величина A . $B_{\text{наил}}, C_{\text{наил}}, D_{\text{наил}}$ – наилучшие значения этих величин.

Величина абсолютной погрешности величины A определяется формулой:

$$\sigma_A = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial B}\right)^2 \sigma_B^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C}\right)^2 \sigma_C^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial D}\right)^2 \sigma_D^2 + \dots} \quad (\text{П.5})$$

Окончательный результат записывают в виде:

$$A = A_{\text{наил}} \pm \sigma_A \quad (\text{П.6})$$

В применении к лабораторной работе 3.1 относительная погрешность в определении сопротивления может быть рассчитана следующим образом:

$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2} \quad (\text{П.7})$$

В применении к лабораторной работе 1.1. нужно вычислить погрешность в определении момента инерции крестовины, который получается в результате косвенных измерений. В формулу (1.1.12) для расчета момента инерции I_0 входят моменты сил натяжения и трения, и угловое ускорение. Все эти величины также получаются при косвенных измерениях.

Относительная погрешность измерения углового ускорения в соответствии с формулой (1.1.11):

$$\delta\beta = \sqrt{(\delta a)^2 + (\delta r)^2}, \quad (\text{П.8})$$

где относительная погрешность линейного ускорения найдена выше, а относительная погрешность радиуса шкива $\delta r = \frac{\Delta r}{r}$. Если преподаватель не задал иначе, то по умолчанию абсолютная погрешность измерений радиуса Δr

$= 0,05 \text{ мм}$ (половина цены деления штангенциркуля, которым измерен радиус шкива).

Относительная погрешность измерения ускорения в соответствии с формулой (1.1.10):

$$\delta a = \sqrt{(\delta h)^2 + (2\delta t)^2}, \quad (\text{П9})$$

где $\delta h = \frac{\Delta h}{h}$, а $\delta t = \frac{\Delta t}{t}$ – относительные погрешности определения высоты и времени. Если преподаватель не задан иначе, то по умолчанию абсолютная погрешность измерения высоты $\Delta h = 0,005 \text{ м}$ (половине цены деления измерительной линейки), а абсолютная погрешность измерения времени $\Delta t = 0,15 \text{ с}$ (среднее время зрительно-моторной реакции человека).

Относительная погрешность момента силы натяжения нити

$$\delta M_{\text{нат}} = \sqrt{(\delta r)^2 + (\delta m_n)^2 + (\delta(g - a))^2}. \quad (\text{П10})$$

Для определения относительной погрешности массы подвеса $\delta m_n = \frac{\Delta m_n}{m_n}$ по умолчанию абсолютная погрешность измерения массы принимается равной 1 г , т.е., $\Delta m_n = 0,001 \text{ кг}$. Относительная погрешность $\delta(g - a) = \frac{\Delta a}{g - a}$. Абсолютная погрешность измерения линейного ускорения $\Delta a = \delta a \cdot a$

Величина относительной погрешности момента силы трения равна относительной погрешности момента силы натяжения нити. Соответственно, абсолютная погрешность числителя в формуле (1.1.12):

$$\Delta(M_{\text{нат}} - M_{\text{тр}}) = \sqrt{(\Delta M_{\text{нат}})^2 + (\Delta M_{\text{тр}})^2} = \sqrt{2 \cdot (\Delta M_{\text{нат}})^2} = (\Delta M_{\text{нат}}) \cdot \sqrt{2} \quad (\text{П11})$$

Абсолютную погрешность момента силы натяжения найдем по формуле:

$$\Delta M_{\text{нат}} = \delta M_{\text{нат}} \cdot M_{\text{нат}}. \quad (\text{П12})$$

Относительная погрешность результирующего момента силы в формуле (1.1.12):

$$\delta(M_{\text{нат}} - M_{\text{тр}}) = \frac{(\Delta M_{\text{нат}}) \cdot \sqrt{2}}{M_{\text{нат}} - M_{\text{тр}}} \quad (\text{П13})$$

Таким образом, окончательная формула для определения относительной погрешности момента инерции крестовины будет:

$$\delta I_0 = \sqrt{(\delta(M_{\text{нат}} - M_{\text{тр}}))^2 + (\delta\beta)^2} \quad (\text{П14})$$

Абсолютная погрешность момента инерции крестовины равна произведению относительной погрешности измерения момента инерции на

среднее значение момента инерции крестовины, полученное в Таблице 1 лабораторной работы:

$$\Delta I_0 = \delta I_0 \cdot \langle I_0 \rangle, \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \quad (\text{П15})$$

Если значение относительной погрешности δI_0 умножить на 100, то единицы измерения относительной погрешности – проценты.

Окончательный результат записывается в виде

$$I_0 = \langle I_0 \rangle \pm \Delta I_0, \text{ кг}\cdot\text{м}^2; \quad \delta I_0 = \dots \% \quad (\text{П16})$$

Если известно табличное значение измеряемой величины

Если в лабораторной работе производится измерение величины, значение которой имеется в справочных таблицах, то табличное значение можно принять за истинное значение. Тогда можно оценить правильность произведенных измерений и расчетов по определению абсолютной и относительной погрешностей

$$\Delta A = |\bar{A} - A_{\text{изм}}| \quad (\text{П.17})$$

$$\delta A = \frac{\Delta A}{\bar{A}} \cdot 100\% \quad (\text{П.18})$$

Приложение 5

Правила построения графиков⁴

1. Графики должны быть построены карандашом с использованием чертежных инструментов, размер графика не может быть меньше 12 см х 12 см. Графики выполняются на масштабной-координатной бумаге («миллиметровка»). Графики строят в прямоугольной системе координат, где по горизонтальной оси (оси абсцисс) откладывают аргумент, независимую физическую величину, а по вертикальной оси (оси ординат) – функцию, зависимую физическую величину.
2. График строят на основании таблицы экспериментальных данных, откуда легко установить интервалы, в которых изменяются аргумент и функция. Их наименьшее и наибольшее значения задают значения масштабов, откладываемых вдоль осей. Не следует стремиться поместить на осях точку (0,0), используемую как начало отсчета на математических графиках. Для экспериментальных графиков масштабы по обеим осям выбирают независимо друг от друга.
3. Масштабная шкала должна легко читаться, а для этого необходимо выбрать удобную для восприятия цену деления шкалы: одной клетке должно соответствовать кратное 10 количество единиц откладываемой физической величины: 10^n , $2 \cdot 10^n$ или $5 \cdot 10^n$, где n – любое целое число, положительное или

⁴ <https://studfiles.net/preview/1828566/page:4/>

отрицательное. Так, числа 2; 0,5; 100; 0,02 – подходят, а числа 3; 7; 0,15 – не подходят для этой цели.

4. Против каждой оси указывают название или символ откладываемой по оси величины, а через запятую – единицы ее измерения, причем все единицы измерения приводят в русском написании в системе СИ. Числовой масштаб выбирают в виде равноотстоящих по значению «круглых чисел», например: 2; 4; 6; 8 ... или 1,82; 1,84; 1,86 Масштабные риски проставляют по осям на одинаковом расстоянии друг от друга, чтобы они выходили на поле графика. По оси абсцисс цифры числового масштаба пишут под рисками, по оси ординат – слева от рисок.

5. Экспериментальные точки аккуратно наносят на поле графика карандашом. Их всегда проставляют так, чтобы они были отчетливо различимы. Если в одних осях строят различные зависимости, полученные, например, при измененных условиях эксперимента или на разных этапах работы, то точки таких зависимостей должны отличаться друг от друга. Их следует отмечать разными значками (квадратами, кружками, крестиками и т.п.) или наносить карандашами разного цвета.

6. Через экспериментальные точки проводят плавную кривую так, чтобы точки в среднем были одинаково расположены по обе стороны от проведенной кривой (линию проводят карандашом). Если известно математическое описание наблюдаемой зависимости, то теоретическая кривая проводится точно так же. Нет смысла стремиться провести кривую через каждую экспериментальную точку – ведь кривая является только интерпретацией результатов измерений, известных из эксперимента с погрешностью.

7. Правильно построенная кривая должна заполнять все поле графика, что будет свидетельством правильного выбора масштабов по каждой из осей. Если же значительная часть поля оказывается незаполненной, то необходимо заново выбрать масштабы и перестроить зависимость. Пример графика приведен на рисунке П.1

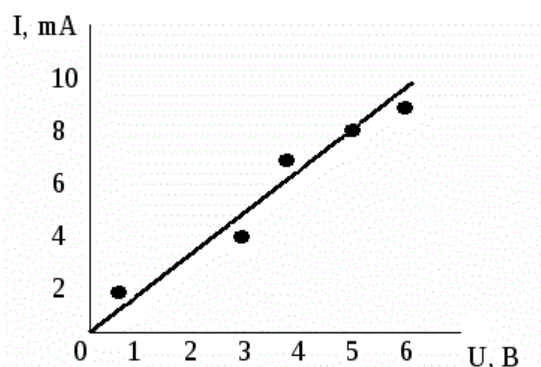


Рисунок.П.1 – Пример построения графика

Учебное издание

Грищенко Ирина Валентиновна
Иванова Алевтина Георгиевна
Лубский Виталий Владимирович
Машанов Владимир Иванович

МЕХАНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, МАГНЕТИЗМ, КОЛЕБАНИЯ.

Учебное пособие по физике

Редактор
Корректор

Подписано в печать.
Формат бумаги $62 \times 84/16$, отпечатано на ризографе, шрифт № 10,
п. л. – 6,0, заказ № , тираж – 10.

Отдел рекламы и PR СибГУТИ
630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, офис 107, тел. (383) 269-83-18