

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Калининградский государственный технический университет»

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

**В.М. Смурьгин**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

Лабораторный практикум  
для курсантов и студентов младших курсов  
технических специальностей  
всех форм обучения

Калининград  
Издательство БГАРФ  
2018

УДК 53 (07)

**Смурыгин, В.М. Электричество и магнетизм: лабораторный практикум / В.М. Смурыгин. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2018. – 104 с.**

Лабораторный практикум по электричеству и магнетизму соответствует рабочей программе по общей физике для технических специальностей. Практикум содержит краткую теорию и методические указания по выполнению лабораторных работ в лаборатории «Электричество и магнетизм».

Лабораторный практикум предназначен для курсантов и студентов младших курсов технических специальностей всех форм обучения в БГАРФ.

Ил. 52, библиогр. – 3 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота.

**Рецензенты:** Корнев К.П., канд. физ.-мат. наук, доцент БФУ им. И. Канта;  
Синявский Н.Я., д-р физ.-мат. наук, профессор БГАРФ

БГАРФ

© БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	5
<b>Глава 1. Основные сведения по лабораторному практикуму</b> .....	5
1. Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ в лаборатории «Электричество и магнетизм» .....	5
2. Организация лабораторного практикума .....	6
3. Математическая обработка результатов измерений .....	8
3.1. Точность измерений и типы погрешностей .....	8
3.2. Порядок обработки результатов прямых измерений .....	9
3.3. Порядок обработки результатов косвенных измерений .....	10
3.4. Правила построения графиков и расчета ошибок .....	11
4. Некоторые сведения об электроизмерительных приборах .....	13
4.1. Классификация электроизмерительных приборов .....	13
4.2. Оформление шкал электроизмерительных приборов .....	14
4.3. Основные и вспомогательные электроизмерительные приборы .....	15
5. Оценка погрешностей электрических измерений .....	15
<b>Глава 2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по разделу «Электричество и магнетизм».</b>	16
<i>Лабораторная работа № 2-1. Исследование электростатических полей. Определение напряженности электростатического поля плоского конденсатора</i> .....	16
<i>Лабораторная работа № 2-2. Измерение ёмкости конденсатора по кривой разряда</i> .....	24
<i>Лабораторная работа № 2-3. Изучение законов постоянного тока</i> ....	31
<i>Лабораторная работа № 2-4. Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона</i> .....	38
<i>Лабораторная работа № 2-5. Изучение магнитного поля соленоида с помощью датчика Холла</i> .....	45
<i>Лабораторная работа № 2-6. Определение характеристик магнитного поля с помощью гальванометра</i> .....	52

<i>Лабораторная работа № 2-7. Изучение явления взаимной индукции</i> .....	59
<i>Лабораторная работа № 2-8. Исследование основных характеристик солнечной батареи</i> .....	66
<i>Лабораторная работа № 2-9. Исследование магнитных свойств ферромагнетиков, изучение гистерезиса ферромагнитных материалов</i> .....	73
<i>Лабораторная работа № 2-10. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли</i> .....	84
<i>Лабораторная работа № 2-11. Определение работы выхода электрона из металла</i> .....	90
<i>Лабораторная работа № 2-12. Исследование затухающих колебаний в колебательном контуре</i> .....	97
<b>Список использованной литературы</b> .....	104



## **ВВЕДЕНИЕ**

Лабораторный практикум по физике призван помочь курсантам и студентам технических специальностей глубже осознать основные физические закономерности в учении об электричестве и магнетизме и приобрести элементарные навыки экспериментирования; научить их обращаться с различными электронными и электроизмерительными приборами. В пособии приведены методические указания к выполнению лабораторных работ, предусмотренных в общем физическом практикуме кафедры физики и химии БГАРФ по разделу «Электричество и магнетизм». Лабораторные работы поставлены на оборудовании, разработанном ВСНПО «Союзвузприбор» и ФГУП РНПО «Росучприбор».

Практикум содержит краткую теорию, описание лабораторных установок и методику проведения измерений к 12 лабораторным работам. Для каждой лабораторной работы нумерация рисунков, таблиц и формул своя.

Лабораторный практикум по физике предназначен для курсантов и студентов младших курсов технических специальностей БГАРФ всех форм обучения.

## **ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ**

### **1. Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ в лаборатории «Электричество и магнетизм»**

При выполнении работ в лаборатории «Электричество и магнетизм» кафедры физики и химии курсанты и студенты обязаны соблюдать следующие правила техники безопасности:

1. К работе допускаются курсанты и студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и получившие у преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы.

2. Установку приборов на лабораторный стенд необходимо производить при выключенном напряжении, в чём надо убедиться по положению переключателей на источниках питания и отсутствии вилки в розетке.

3. Самостоятельно включать любые приборы под напряжением без проверки и разрешения преподавателя или заведующего лабораторией **категорически запрещается**.

4. При включении схемы необходимо убедиться в том, что никто из курсантов (студентов) группы не касается приборов, отдельных участков цепи.

5. Всякое переключение в цепи, замену приборов производить только при выключенном напряжении и в присутствии заведующего лабораторией или преподавателя.

6. При возникновении каких-либо неполадок в работе немедленно доложить преподавателю или заведующему лабораторией.

7. Без разрешения преподавателя или заведующего лабораторией запрещается вскрывать и переносить лабораторное оборудование.

8. Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо внимательно ознакомиться с разделом «Порядок выполнения работы», где указана последовательность включения приборов, условия их использования и получить допуск к выполнению работы.

9. После выполнения лабораторной работы выключение приборов проводить в обратной последовательности. Выключение проводить под наблюдением заведующего лабораторией.

10. Запрещается покидать рабочее место до полного выполнения лабораторной работы.

11. Курсанты и студенты, нарушившие правила техники безопасности, от выполнения лабораторных работ отстраняются до передачи ими правил техники безопасности.

## **2. Организация лабораторного практикума**

При подготовке к лабораторным занятиям и при выполнении лабораторных работ по электричеству и магнетизму курсантам и студентам рекомендуется пользоваться данным практикумом. Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, курсант (студент) во внеаудиторное время готовится к её выполнению, изучает теорию вопроса и заполняет бланк отчета по лабораторной работе (рис. 1). В бланк заносятся следующие пункты:

- название лабораторной работы;
- цель работы;
- схема лабораторной установки;
- таблицы для записи результатов измерений;
- рабочие формулы;
- формулы для расчета погрешностей.

БАЛТИЙСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
РЫБОПРОМЫСЛОВОГО ФЛОТА  
Кафедра физики и химии

ОТЧЕТ

по лабораторной работе № \_\_\_\_\_

Курсант (студент) \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_ Дата выполнения \_\_\_\_\_

Наименование работы: \_\_\_\_\_

Цель работы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

1. Схема установки

2. Таблицы результатов эксперимента

(оборотная сторона)

3. Рабочие формулы. Вычисления

4. Формулы для погрешностей и их расчет

5. Выводы по проделанной работе

Рис. 1. Бланк отчета по лабораторной работе



Лабораторная работа выполняется под руководством и при непосредственном участии преподавателя или заведующего лабораторией. Перед началом выполнения работы преподаватель проверяет готовность курсанта (студента) к занятиям. После ответа курсанта (студента) на контрольные вопросы преподаватель дает допуск к выполнению работы.

После окончания эксперимента преподаватель проверяет полученные данные и утверждает их с указанием даты выполнения. Далее курсант (студент) самостоятельно обрабатывает экспериментальные данные, рассчитывает погрешности и оформляет отчет по лабораторной работе. На следующем занятии отчет представляется преподавателю для проверки и защиты. В случае успешной защиты данная работа считается зачтенной.

В каждом семестре курсанты (студенты) выполняют определенное число лабораторных работ в соответствии с графиком, который доводится до них в начале семестра.

### **3. Математическая обработка результатов измерений**

Основная задача физического эксперимента – измерение физических величин. Измерением называется совокупность действий, с помощью которых устанавливается во сколько раз измеряемая величина больше или меньше соответствующей величины, принятой за единицу измерения. Измерения бывают **прямыми и косвенными**. В прямых измерениях физическая величина измеряется непосредственно. При косвенных измерениях искомая величина не измеряется, а вычисляется по результатам прямых измерений других величин, связанных с искомой определенной математической зависимостью.

#### **3.1. Точность измерений и типы погрешностей**

Опыт показывает, что всякое измерение дает лишь приближенный результат и не может не содержать погрешностей.

Пусть проведено  $n$  измерений некоторой физической величины  $X$ , в результате которых получен ряд значений этой величины:  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Выполнив измерения, необходимо указать не только полученный результат, но и точность его измерения. Пусть  $\langle X \rangle$  – среднее арифметическое результатов  $n$  измерений. Принято указывать интервал значений измеряемой величины  $\langle X \rangle \pm \Delta X$ , в пределах которого с определенной вероятностью оказывается истинное значение измеряемой величины:  $\langle X \rangle + \Delta X$  – есть наибольшее вероятное значение из-



меряемой величины,  $\langle X \rangle - \Delta X$  – её наименьшее значение. Величина  $\Delta X$  называется абсолютной ошибкой измерения, интервал от  $\langle X \rangle - \Delta X$  до  $\langle X \rangle + \Delta X$  – доверительным интервалом. Вероятность того, что среднее значение  $\langle X \rangle$  отличается от истинного не более, чем на  $\Delta X$ , называется доверительной вероятностью  $\alpha$ .

Ошибки можно разделить на два типа: систематические и случайные. **Систематические** ошибки возникают в случаях: погрешности измерительной аппаратуры (отстающий секундомер, изогнутая стрелка измерительного прибора и т. д.); отличия условий эксперимента от предполагаемых теорией; несовершенства методики эксперимента; некоторых других. Систематическая ошибка, как правило, остается постоянной на протяжении всех измерений.

**Случайные** ошибки всегда присутствуют в эксперименте. Типичные источники случайных погрешностей: небольшие ошибки наблюдателя; помехи, воздействующие на аппаратуру; ряд других. Случайные погрешности нельзя исключить, но их влияние можно учесть с помощью многократных измерений с последующей математической обработкой результатов измерений.

### 3.2. Порядок обработки результатов прямых измерений

1. Произвести  $n$  измерений величины  $X_i$  ( $X_1; X_2; \dots X_n$ ).
2. Вычислить среднее арифметическое значение результатов отдельных измерений по формуле:

$$\langle X \rangle = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}. \quad (1)$$

3. Найти абсолютные ошибки отдельных измерений по формуле:

$$\Delta X_i = | \langle X \rangle - X_i |. \quad (2)$$

4. Вычислить среднее квадратичное отклонение среднего арифметического результата измерения по формуле:

$$\sigma_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (3)$$

5. По таблице найти коэффициент Стьюдента  $t_n, \alpha$ , где  $n$  – число проведенных измерений;  $\alpha$  – доверительная вероятность (задается преподавателем).

6. Вычислить абсолютную погрешность прямого измерения по формуле:

$$\Delta X = t_{n,\alpha} \cdot \sigma_{\langle X \rangle}. \quad (4)$$

**Таблица коэффициентов Стьюдента ( $t_{\alpha,n}$ )**

n – число измерений	α – доверительная вероятность			
	0,8	0,9	0,95	0,98
3	1,9	2,9	4,3	7,0
4	1,6	2,4	3,2	4,5
5	1,5	2,1	2,8	3,7
6	1,5	2,0	2,6	3,4
7	1,4	1,9	2,4	3,1
8	1,4	1,9	2,4	3,0
9	1,4	1,9	2,3	2,9
10	1,4	1,8	2,3	2,8

### 3.3. Порядок обработки результатов косвенных измерений

1. Вычислить искомую величину по расчетной формуле, подставив в неё средние значения измеренных величин:

$$\langle Y \rangle = \varphi(\langle x_1 \rangle, \langle x_2 \rangle, \dots, \langle x_n \rangle). \quad (5)$$

2. Вычислить абсолютные погрешности измерений ( $\Delta X_i$ ) всех величин, входящих в расчетную формулу, используя правила обработки результатов прямых измерений.

3. Вывести формулу для расчета относительной погрешности косвенного измерения при помощи следующих действий:

а) прологарифмировать расчетную формулу:  $Y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;

б) найти полный дифференциал от  $\ln Y$ :

$$d(\ln Y) = \frac{\partial(\ln Y)}{\partial X_1} dX_1 + \frac{\partial(\ln Y)}{\partial X_2} dX_2 + \dots + \frac{\partial(\ln Y)}{\partial X_n} dX_n; \quad (6)$$

в) заменить в формуле (6) знаки дифференциалов  $d X_i$  на  $\Delta X_i$  и знаки « - » перед  $\Delta X_i$  на «+»;

г) вычислить относительную погрешность  $\varepsilon$  косвенного измерения по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta Y}{\langle Y \rangle} = \sqrt{\left( \frac{\partial(\ln Y)}{\partial X_1} \Delta X_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial(\ln Y)}{\partial X_2} \Delta X_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial(\ln Y)}{\partial X_n} \Delta X_n \right)^2}. \quad (7)$$

4. Вычислить доверительный интервал общей погрешности результата измерения по формуле:  $\Delta Y = \varepsilon \cdot \langle Y \rangle$ .

5. Записать окончательный результат в виде:  $Y = \langle Y \rangle \pm \Delta Y$ .

### 3.4. Правила построения графиков и расчета ошибок

Для построения графиков используется прямоугольная система координат. Графики строятся на масштабной-координатной чертежной бумаге (миллиметровой бумаге), они имеют, в зависимости от назначения, различные размеры, обычно это размер тетрадной страницы. Как правило, в работах по «Электричеству и магнетизму» все функции, изображаемые графически, являются линейными:  $y = kx + b$ . Перед построением графика выбирается масштаб по осям координат так, чтобы угол наклона построенной прямой линии был близок к  $45^\circ$ , а линия занимала бы большую часть поля графика.

Если начальные значения  $x$  и  $y$  заметно отличаются от нуля, лучше начинать отсчет делений на соответствующей оси с некоторого значения, близкого к наименьшему значению переменной величины. После нанесения масштабных делений на осях, около них пишутся числа, соответствующие выбранному масштабу. У концов осей наносятся обозначения откладываемых физических величин, единицы измерений, при необходимости – множитель в виде степени (порядок масштаба).

После выбора начала отсчета и масштаба на графике наносятся экспериментальные точки, которые соединяются линией без изломов и перегибов. Линия должна проходить как можно ближе ко всем экспериментальным точкам и примерно одинаковое число точек находилось бы по обеим сторонам линии.

Если на графике строятся несколько линий, то каждой из них присваивается номер, а на свободном поле листа делаются разъясняющие записи по каждой линии. Обычно из графика определяется тангенс угла наклона линии к горизонтальной оси.

Если графически изображается линейная функция  $y = kx + b$ , а необходимо определить величину  $k$ , то ясно, что она определяется как тангенс угла наклона прямой, построенной в координатах:  $y = \varphi(x)$ .

Пример расчета погрешностей при исследовании функции:

$$y = kx + b. \quad (8)$$

Пусть мы провели три измерения величин  $y$  и  $x$ :  $(y_1, y_2, y_3; x_1, x_2, x_3)$ . По этим экспериментальным данным строим график (см. рис. 2 – точки 1, 2, 3).

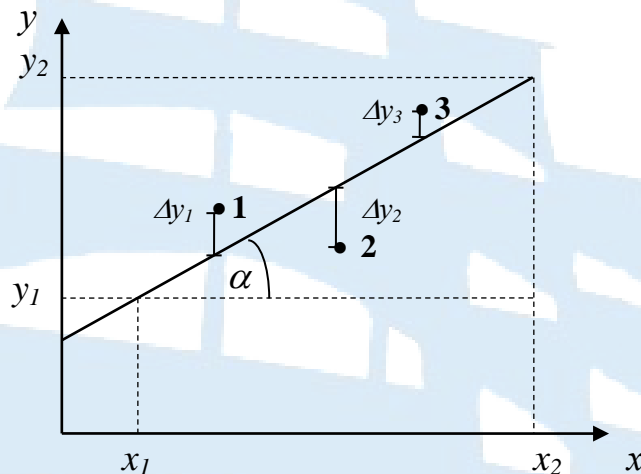


Рис. 2

Погрешность величины  $k$  находится следующим образом:

1. Находим  $k$  как тангенс угла наклона прямой  $y = kx + b$ :

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \quad (9)$$

Здесь  $y_2, y_1; x_2, x_1$  – координаты точек, взятых на возможно большем расстоянии друг от друга на построенной прямой (см. рис. 2).

2. Находим все отклонения  $\Delta y_i$  ( $\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3$ ) экспериментальных точек вдоль оси  $y$  от этой прямой (с учетом масштаба и размерностей, см. рис. 2).

3. Определяем среднеквадратичное отклонение по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n-1}}. \quad (10)$$

4. Находим погрешность измерения величины  $k$  по формуле:

$$\Delta k = \frac{2 \sigma t_{\alpha, n}}{x_2 - x_1}. \quad (11)$$

Здесь  $t_{\alpha, n}$  – коэффициент Стьюдента.




## 4. Некоторые сведения об электроизмерительных приборах

### 4.1. Классификация электроизмерительных приборов

Существует целый ряд классификаций электроизмерительных приборов по различным признакам. Наиболее существенными для лабораторной практики являются: классификация по принципу действия и классификация по степени точности.

**I. По принципу действия** электроизмерительные приборы делятся на следующие **основные** системы: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические. Обозначение систем электроизмерительных приборов показано в табл. 1.

Таблица 1

Система прибора	Условное обозначение
Магнитоэлектрическая	
Электромагнитная	
Электродинамическая	

1. Приборы магнитоэлектрической системы предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепях **постоянного** тока. Работа таких приборов основана на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и подвижной катушки, по которой протекает измеряемый ток. Угол поворота катушки пропорционален измеряемому току, что обеспечивает равномерность шкалы прибора.

2. Приборы электромагнитной системы предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепях **переменного и постоянного** токов. Принцип их действия основан на взаимодействии магнитного поля катушки, по которой протекает измеряемый ток, и подвижного железного сердечника. При протекании тока изменяется как магнитное поле катушки, так и намагничивание железного сердечника, поэтому угол поворота подвижной части пропорционален квадрату тока, т. е. шкала прибора – нелинейная.

3. Работа приборов электродинамической системы основана на взаимодействии катушек, по которым протекает постоянный или переменный ток. Одна из катушек подвижная, другая – неподвижная. Вращающий момент, действующий на подвижную часть прибора, пропорционален произведению силы токов, текущих по катушкам. Шкала прибора электродинамической системы неравномерная.


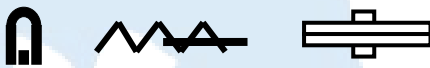











**II. По степени точности** приборы делятся на следующие классы: *0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0*. Показатель класса определяет наибольшую приведенную погрешность  $\epsilon_{II}$  измерения, выраженную **в процентах**. Приведенной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности  $\Delta A$  к предельному значению измеряемой величины  $A_{II}$ :  $\epsilon_{II} = \frac{\Delta A}{A_{II}}$ .

#### 4.2. Оформление шкал электроизмерительных приборов

На шкалах электроизмерительных приборов, как правило, приводится следующая информация: физическая величина, измеряемая прибором; класс точности; система прибора; величина напряжения, при котором испытывалась изоляция прибора; рабочее положение прибора (вертикальное или горизонтальное); обозначение рода тока; условное обозначение прибора; тип и год выпуска прибора, некоторые другие характеристики. В табл. 2 приведены некоторые условные обозначения, помещаемые на шкалах приборов.

Таблица 2

Техническая характеристика	Условные обозначения
Амперметр, вольтметр	A, V
Класс точности прибора (2,5)	 или 2,5
Система прибора	
Изоляция прибора испытана напряжением 2 кВ	 2 кV или 
Постоянный, переменный ток	 
Постоянный и переменный ток	
Вертикальная или горизонтальная установка прибора	  или  



### 4.3. Основные и вспомогательные электроизмерительные приборы

**Амперметрами** называют приборы, служащие для измерения силы тока в цепи. При измерениях амперметр включают в электрическую цепь последовательно, т. е. весь измеряемый ток проходит через него. Амперметры имеют малое сопротивление, чтобы не искажать величину тока в цепи.

**Вольтметрами** называют приборы, служащие для измерения напряжения. При измерениях вольтметр включают параллельно тому участку цепи, на концах которого хотят измерить разность потенциалов. Сопротивление вольтметра велико по сравнению с сопротивлением измеряемого участка цепи.

**Гальванометрами** называют приборы, служащие для измерения малых токов, напряжений или количества электричества (*мкА, мкВ, мкКл* соответственно). По принципу действия и устройству они мало чем отличаются от приборов магнитоэлектрической системы.

К вспомогательным приборам относятся **реостаты, потенциометры, магазины сопротивлений и другие**. Реостаты служат для изменения силы тока в цепи, потенциометры – для получения определенной разности потенциалов. Реостаты и потенциометры по своему устройству представляют собой практически одинаковые приборы. В зависимости от включения в цепь, данные приборы могут выполнять функции реостата или потенциометра.

Магазином сопротивлений называют прибор эталонных сопротивлений, представляющих собой катушки сопротивлений. Сопротивление каждой катушки известно. Комбинируя включение катушек с известным сопротивлением в цепь, можно задавать сопротивление цепи.

В настоящее время широко применяются **цифровые** электроизмерительные приборы и мультиметры.

## 5. Оценка погрешностей электрических измерений

Абсолютная погрешность измерений, производимых электроизмерительными приборами, оценивается исходя из класса точности приборов. Пусть  $A_{пред}$  – предельное значение измеряемой величины (максимально возможное показание прибора), а  $\epsilon_n$  – класс точности (наибольшая приведенная погрешность), тогда абсолютная погрешность прибора  $\Delta A$  будет равна:

$$\Delta A = A_{пред} \cdot \epsilon_n . \quad (12)$$

Из (12) следует, что абсолютная погрешность прибора одинакова для любых показаний прибора. Относительная погрешность измерений  $\varepsilon$  находится из формулы:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_{изм}}, \quad (13)$$

где  $A_{изм}$  – значение измеряемой величины.

Из (13) видно, что относительная погрешность тем больше, чем меньше измеряемая величина. При измерениях следует пользоваться такими приборами, чтобы предполагаемое значение измеряемой величины составляло 60-90 % от величины, на которую рассчитана вся шкала прибора.

На практике часто применяются многопредельные приборы. При работе с такими приборами его включают в цепь на тот предел измерений, который достаточно близок к предполагаемому значению измеряемой величины.

## ГЛАВА 2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ»

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-1

#### Исследование электростатических полей. Определение напряженности электростатического поля плоского конденсатора

**Цель работы:** изучение электростатического поля заряженных тел различной конфигурации методом моделирования, определение напряженности электростатического поля в центре плоского конденсатора.

#### Введение

Электростатическое поле характеризуется **вектором напряженности  $\vec{E}$** , который определяется как отношение силы  $\vec{F}$ , действующей на помещенный в некоторую точку поля положительный точечный заряд  $q$ , к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1)$$

Основной задачей электростатики является расчет электрических полей (определение  $\vec{E}$ ), создаваемых различными распределениями электрических зарядов. Принципиально эта задача для **точечных** зарядов решается следующим образом. Запишем закон Кулона для точечных зарядов  $Q$  и  $q$ , находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^3} \vec{r}, \quad (2)$$

здесь  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

Используя формулы (1) и (2), найдем напряженность поля точечного заряда:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^3} \vec{r}, \quad (3)$$

где  $Q$  – величина заряда, создающего поле;  $\vec{r}$  – радиус-вектор, проведенный от заряда  $Q$  в рассматриваемую точку поля. Поле точечного заряда является сферически симметричным.

Если заряд распределен в некотором объеме или на поверхности, то расчет полей производят, пользуясь принципом суперпозиции:

$\sum_i \vec{E}_i = \vec{E}$ . Вся область, несущая заряд, разбивается на малые участки, и результирующее поле находят, как суперпозицию (векторную сумму) полей, создаваемых этим участком, считая его заряд точечным.

Часто требуется знать электростатическое поле в пространстве, заключенном между электродами сложной формы. Такие поля приходится исследовать экспериментально. При экспериментальном исследовании удобно пользоваться вместо напряженности другой характеристикой электростатического поля – **потенциалом  $\varphi$** . Потенциал определяется как отношение потенциальной энергии  $W$ , которой обладает положительный точечный заряд  $q$ , помещенный в некоторую точку поля, к величине этого заряда:

$$\varphi = \frac{W}{q}. \quad (4)$$

Потенциал является скалярной величиной.

Электростатическое поле изображается графически с помощью силовых линий и эквипотенциальных поверхностей. **Силовая линия** – линия, касательная к которой в каждой точке поля совпадает с направлением вектора напряженности  $\vec{E}$  в этой точке. **Эквипотенциальная поверхность** – поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал. Силовые линии **нормальны** к эквипотенциальным

поверхностям. Последнее позволяет построить картину силовых линий поля, если найдено положение поверхностей равного потенциала.

В качестве примера на рис. 1 показаны силовые (сплошные) и эквипотенциальные (пунктирные) линии электростатического поля, созданного заряженной плоскостью и точечным зарядом.

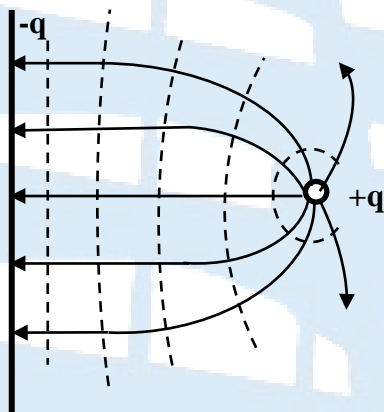


Рис. 1. Картина эквипотенциальных и силовых линий

Между потенциалом и напряженностью поля имеется следующая связь:

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right) = -\text{grad } \varphi. \quad (5)$$

Для оси  $x$ :

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \quad (6)$$

то есть проекция  $E_x$  вектора напряженности на ось  $x$  равна взятой с обратным знаком производной от потенциала по этому направлению (аналогично для осей  $y$  и  $z$ ). Из (5), зная распределение потенциала в пространстве, можно найти распределение напряженности.

Для измерения потенциалов точек поля в него вводят металлические электроды – зонды. Однако при зондировании на электродах индуцируются заряды, что приводит к сильному искажению исследуемого поля. Кроме того, электростатические приборы обладают низкой чувствительностью и точностью.

Трудности электростатических измерений привели к разработке особого метода изучения электростатических полей: путем воспроизведения их структуры (моделирования) в слабо проводящей среде, по которой пропускается постоянный электрический ток. Иными словами, изучение электростатического поля заменяют изучением его модели – стационарного электрического поля тока.

Тождественность таких полей очевидна. Запишем закон Ома для участка цепи в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (7)$$

здесь  $\vec{j}$  – плотность тока,  $\sigma$  – удельная электропроводность среды.

С учетом (6) имеем:

$$\vec{j} = -\sigma \operatorname{grad} \varphi. \quad (8)$$

Поэтому для изучения электростатического поля можно использовать поле тока в слабо проводящей среде (электропроводная бумага, раствор электролита и др.). При моделировании силовым линиям электростатического поля будут соответствовать линии тока, а поверхностям равного потенциала – поверхности равного напряжения.

Эксперимент значительно упростится, если проводить исследование плоского стационарного поля тока. Именно такое поле моделируется в данной работе.

### **Описание лабораторной установки и метода измерений**

В работе используются следующие приборы и оборудование:

- блок моделирования полей;
- три сменных токопроводящих листа с различной конфигурацией электродов, имеющих координатную сетку;
- блок генераторов напряжений с наборным полем (БГННП);
- мультиметр МУ60 (включенный в режим измерения напряжения);
- координатные сетки для графического изображения полей.

Внешний вид лабораторной установки и электрическая схема для изучения электростатического поля представлены на рис. 2 и 2, а. На токопроводящий лист нанесен слой слабо проводящего материала с впаянными электродами ( $A$  и  $B$ ), которые присоединяются к источнику постоянного тока с напряжением 15 В. В измерительную часть схемы входят зонд  $Z$  и мультиметр.

БГАРФ



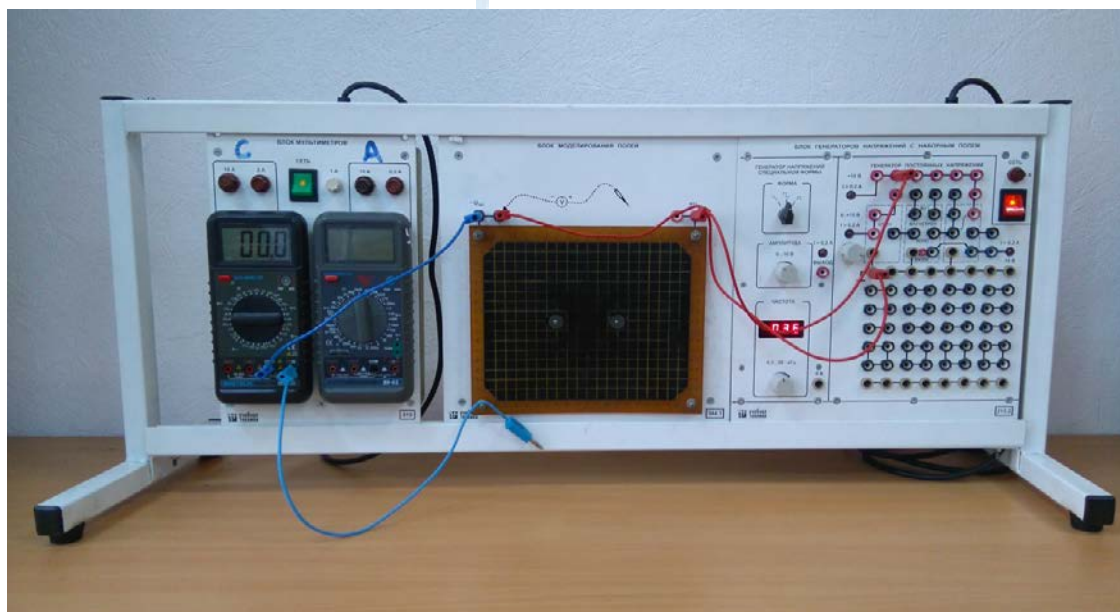


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

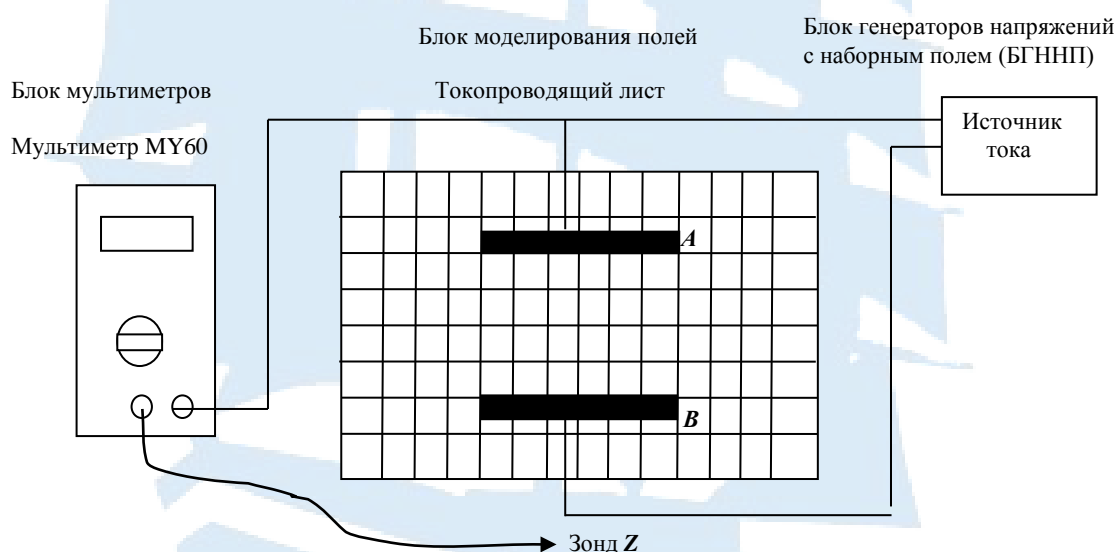


Рис. 2, а. Электрическая схема

Принцип работы измерительной части следующий. Перемещением зонда  $Z$  по токопроводящему листу задаются различные значения потенциала относительно электродов, которые измеряются мультиметром. Геометрическое место точек, для которых в цепи зонда потенциал одинаков, образует эквипотенциальную поверхность в исследуемом поле.



## Порядок выполнения работы

1. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.
2. Проверить правильность сборки электрической цепи согласно рис. 2, а, включив в неё токопроводящий лист с плоскими электродами, (модель плоского конденсатора), представить схему на проверку преподавателю.
3. Подготовить координатную сетку, на которой в масштабе изображен токопроводящий лист с **плоскими** электродами (рис. 3).

### Координатная сетка для оформления отчета по моделированию электростатического поля

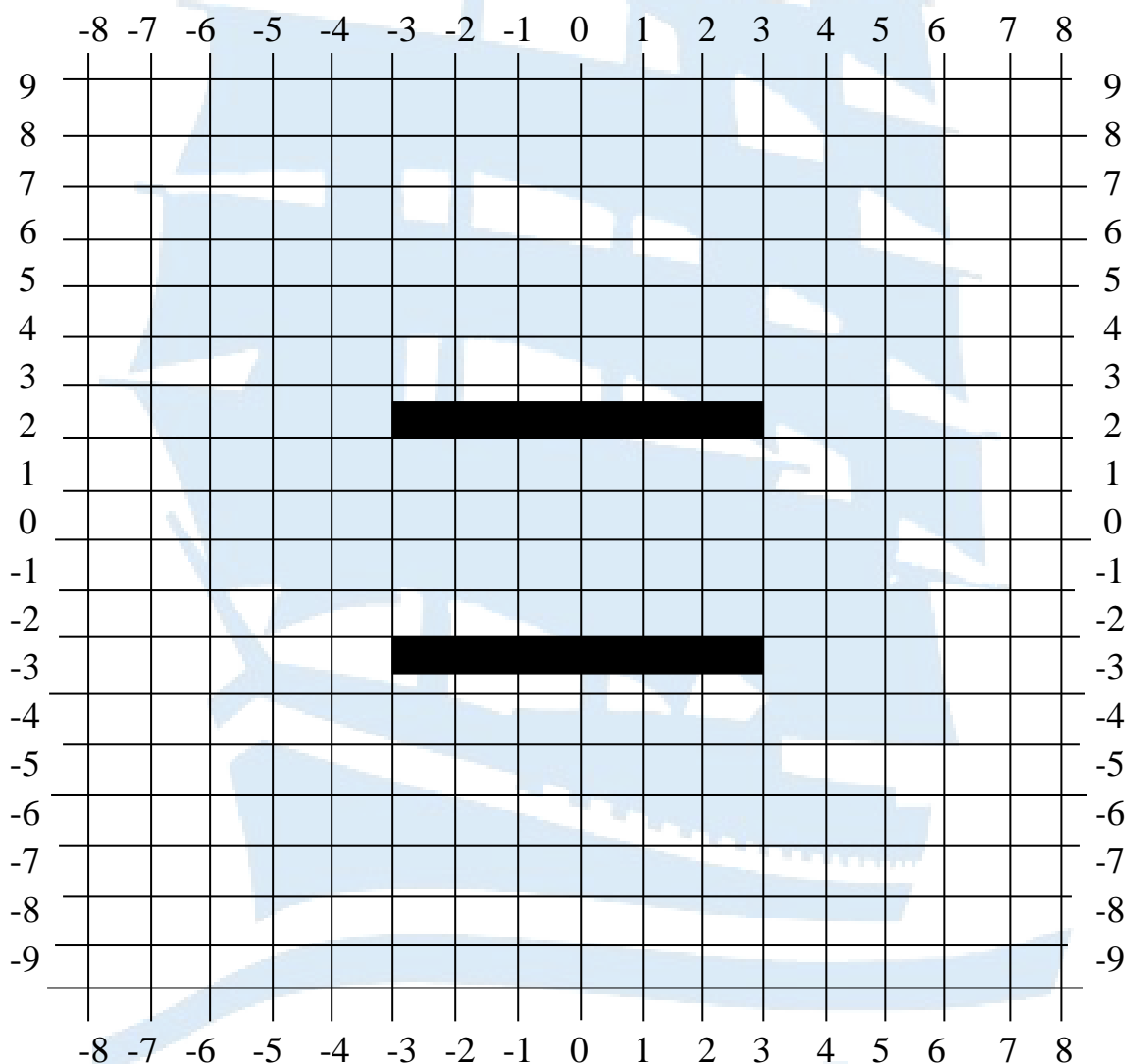


Рис. 3

4. Получить у преподавателя значения потенциалов, для которых будут определяться эквипотенциальные линии, записать их в таблицу.

5. Включить БГННП и мультиметр МУ60 в режиме вольтметра.

6. Найти при помощи зонда **совокупность** точек на токопроводящем листе (не менее 9), для которых потенциал одинаков (показания вольтметра) и равен меньшему из указанных преподавателем. Первую точку удобнее всего отыскивать на прямой, соединяющей геометрические центры электродов, наблюдая при этом за показаниями вольтметра. Одновременно отмечать карандашом на координатной сетке, на которой изображен токопроводящий лист с плоскими электродами, положение найденных точек, соединить их линией, указать ее потенциал.

**Не прикасаться зондом к электродам.**

7. Выполняя операции, перечисленные в пункте 4, найти семейство эквипотенциальных линий в межэлектродном пространстве для различных потенциалов, указанных преподавателем, изобразить их на координатной сетке, указать для каждой линии её потенциал. Показания вольтметра для каждого измерения занести в таблицу.

8. Убрать токопроводящий лист с плоскими электродами и подключить вместо него лист с другой конфигурацией электродов (по заданию преподавателя).

9. Исследовать картину эквипотенциальных линий для данной конфигурации электродов при различных напряжениях, изобразить эту картину на координатной сетке.

### **Обработка результатов измерений**

1. Определить по картине эквипотенциальных линий, какой из электродов является положительным, а какой отрицательным. Здесь надо учесть, что линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных электродах и направлены в сторону убывания потенциала. Отметить заряд электрода на координатной сетке.

2. На координатной сетке с плоскими электродами провести прямую линию, соединяющую геометрические центры электродов. Определить для каждой из эквипотенциальных линий поля плоского конденсатора расстояние  $r_i$  от отрицательного электрода до точек пересечения эквипотенциальных линий с проведенной прямой. Полученные значения  $r_i$ , соответствующие потенциалу  $\varphi_i$ , занести в табл. 1.

3. По известным значениям  $\varphi_i$  и  $r_i$  построить график функции  $\varphi(r)$ . Из этого графика определить напряженность электрического поля  $E$  как тангенс угла наклона прямой, (см. формулу 5). Результат записать в таблицу.

Таблица 1

№ п/п	$\varphi_i, В$	$r_i, м$	$E_{граф}, В/м$	$\Delta E, В/м$	$\varepsilon, \%$
1					
2					
3					
4					

4. Пользуясь полученными картинками эквипотенциальных линий для двух видов электродов, на координатной сетке построить семейство силовых линий каждого поля. При построении силовых линий учесть, что они **нормальны** к эквипотенциальным поверхностям.

5. Определить абсолютную погрешность измерения напряженности  $\Delta E$  графическим методом, а затем относительную погрешность  $\varepsilon$ . Полученные значения занести в табл. 1.

### Контрольные вопросы для допуска к работе

1. Какой метод исследования электростатических полей используется в работе?
2. Как в работе отыскиваются эквипотенциальные линии?
3. Как по картине распределения эквипотенциальных линий изобразить картину силовых линий?
4. Как в работе определяется направление силовых линий?
5. При каких значениях напряжения отыскиваются эквипотенциальные линии?
6. Как в работе определяется, какой из электродов является положительным, а какой отрицательным?

### Контрольные вопросы для сдачи работы

1. Какое поле называется электростатическим? Каковы его основные характеристики?
2. Записать закон Кулона в скалярной и векторной формах.
3. Дать определение напряженности электростатического поля. Каковы единицы измерения напряженности?
4. Дать определение потенциала электростатического поля. Каковы единицы измерения потенциала?
5. Получите формулы для напряженности и потенциала поля точечного заряда.

6. Вывести формулу связи между напряженностью и потенциалом. Каков физический смысл знака (-) в этой формуле?

7. Доказать, что силовые линии ортогональны эквипотенциальным поверхностям.

8. Что называется потоком вектора напряженности электростатического поля, какова единица его измерения?

9. Сформулировать и доказать теорему Остроградского-Гаусса для электростатического поля.

10. Применить теорему Остроградского-Гаусса для расчета электростатического поля заряженного плоского конденсатора.

11. Как изменится величина напряженности и потенциала электростатического поля плоского конденсатора при увеличении расстояния между электродами, если конденсатор:

- 1) отключен от источника напряжения;
- 2) не отключается от источника напряжения.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-2

### Измерение ёмкости конденсатора по кривой разряда

**Цель работы:** опытным путем определить ёмкость конденсатора и величину разрядного сопротивления.

#### Введение

Рассмотрим заряженный уединенный проводник. Его потенциал  $\varphi$  прямо пропорционален заряду проводника  $Q$ . Величина:

$$C = \frac{Q}{\varphi} \quad (1)$$

есть **электроёмкость** уединенного проводника, она определяется зарядом, который надо сообщить проводнику, чтобы изменить его потенциал на единицу. Электроёмкость (в вакууме) зависит от геометрической формы и размеров проводника. Единица измерения электроёмкости – фарад.

Устройства, обладающие способностью накапливать значительные по величине заряды при малых относительно других тел потенциалах, т. е. обладать большой ёмкостью, называются **конденсаторами**. Конденсатор состоит из двух проводников (обкладок), разделенных диэлектриком.

На ёмкость конденсатора не должны оказывать влияние окружающие тела, поэтому проводникам придают такую форму, чтобы поле, создаваемое зарядами, было сосредоточено между обкладками конденсатора. Этому условию удовлетворяют **плоские, цилиндри-**

**ческие, сферические конденсаторы.** Плоские конденсаторы имеют обкладки в виде двух плоских пластин, цилиндрические – два коаксиальных цилиндра, сферические – две концентрические сферы.

Под ёмкостью конденсатора понимается физическая величина, равная отношению заряда  $Q$ , накопленного на конденсаторе, к разности потенциалов  $(\varphi_1 - \varphi_2) = U_c$  между его обкладками:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U_c}. \quad (2)$$

Для расчета ёмкости конденсатора необходимо:

а) определить, пользуясь теоремой Остроградского-Гаусса, напряженность поля  $E$  между обкладками конденсатора;

б) определить разность потенциалов между его обкладками по формуле:  $\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr$ ;

в) воспользоваться формулой (2) для нахождения ёмкости.

При наличии диэлектрика ёмкость плоского конденсатора определяется по формуле:  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$ , здесь  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $S$  – площадь обкладок,  $d$  – расстояние между обкладками.

Формула для определения ёмкости цилиндрического конденсатора:  $S = \frac{2\pi \epsilon \epsilon_0 L}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$ , здесь  $L$  – длина обкладок,  $r_2$  и  $r_1$  – радиусы коаксиальных цилиндров.

Формула для определения ёмкости сферического конденсатора:

$$C = 4\pi \epsilon \epsilon_0 \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}, \text{ здесь } r_2 \text{ и } r_1 \text{ – радиусы концентрических сфер.}$$

Включим конденсатор  $C$  в цепь постоянного тока (см. рис. 1). Когда ключ  $K$  находится в положении 1, то происходит зарядка конденсатора.

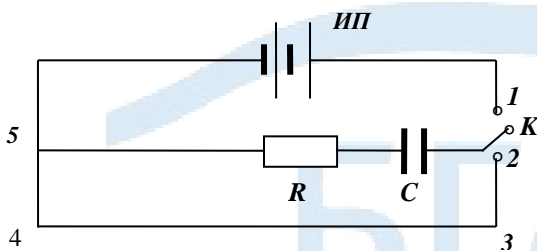


Рис. 1

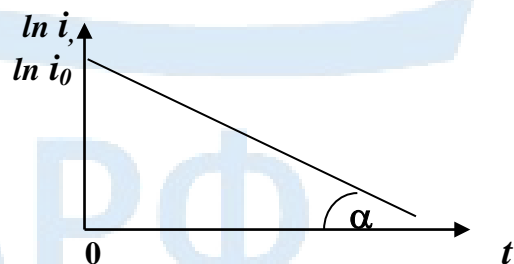


Рис. 2



При замыкании заряженного конденсатора на сопротивление  $R$  (ключ  $K$  переводится в положение 2), конденсатор начнет разряжаться. Установим, по какому закону происходит уменьшение величины напряжения в цепи при разрядке конденсатора.

Рассмотрим замкнутый контур 2-3-4-5-2 (рис. 1). Составим уравнение по второму правилу Кирхгофа:

$$r i + U_C = 0, \quad (3)$$

здесь  $r$  – величина разрядного сопротивления,  $i$  – мгновенное значение тока,  $U_C$  – падение напряжения на конденсаторе  $C$ .

С учетом (1) имеем:  $q = C U_C$ . Поскольку  $i = \frac{dq}{dt}$ , после подстановки получим:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(C U_C)}{dt} = C \frac{dU_C}{dt}. \quad (4)$$

Подставим (4) в (3), после преобразований имеем:

$$\frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{rC} U_C = 0. \quad (5)$$

Решая уравнение (5), получим:

$$U_C = U_0 e^{-\frac{t}{rC}}, \quad (6)$$

здесь  $U_0$  – напряжение на обкладках конденсатора в начальный момент времени. Для силы тока, соответственно, имеем выражение:

$$i = i_0 e^{-\frac{t}{rC}}, \quad (7)$$

здесь  $i_0$  – величина начального тока в момент времени  $t = 0$ .

Из (7) видно, что сила тока при разряде конденсатора убывает по экспоненте. Быстрота уменьшения разрядного тока зависит от величины  $\tau$ , которая называется **постоянной времени разряда** конденсатора (**временем релаксации**), она определяется по формуле:

$$\tau = r C. \quad (8)$$

Время релаксации – это время, за которое разрядный ток уменьшается в  $e$  раз относительно первоначального значения ( $e = 2,71$  – основание натурального логарифма).



Прологарифмируем формулу (7):

$$\ln i = \ln i_0 - \frac{t}{rC}, \quad (9)$$

т. е. имеем линейную зависимость  $\ln i$  от  $t$ . График функции (9) показан на рис. 2.

### Описание лабораторной установки и метода измерений

В работе используются следующие приборы и оборудование: источник постоянного тока **ИП**, вольтметр **V**, переключатель **П**, магазин сопротивлений **R**, микроамперметр  $\mu\text{A}$ , конденсатор **C**.

Внешний вид лабораторной установки и электрическая схема показаны на рис. 3 и 3, а.



Рис. 3. Внешний вид лабораторной установки

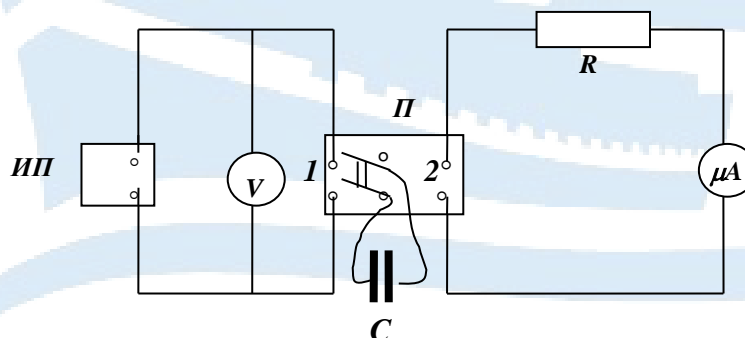


Рис. 3, а. Электрическая схема

Конденсатор **C**, ёмкость которого требуется найти, заряжается от источника постоянного тока **ИП** (переключатель **П** находится в положе-

нии 1, см. рис. 3, а). Вольтметр  $V$  служит для измерения напряжения на обкладках конденсатора.

После зарядки конденсатора в течение ( $5 \div 10$ ) с переключатель  $\Pi$  переводится в положение 2, при этом начинается разрядка конденсатора через сопротивление  $R$ , сила тока при этом уменьшается. Величина сопротивления устанавливается (в пределах от  $10$  до  $50$  кОм) магазином сопротивлений. Одновременно с переключением конденсатора включается секундомер и через каждые  $5$  с в диапазоне от  $5$  до  $50$  с фиксируются показания микроамперметра  $\mu A$ .

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.
2. Проверить правильность сборки электрической цепи согласно рис. 3, а и представить её на проверку преподавателю или заведующему лабораторией.
3. Включить источник постоянного тока и микроамперметр.
4. Замкнуть конденсатор на источник питания, измерить напряжение  $U_C$  в цепи, в дальнейшем его не менять. Величину напряжения  $U_C$  занести в табл. 1.
5. Установить на магазине сопротивлений величину  $R$  по заданию преподавателя (в пределах от  $10$  до  $50$  кОм), записать его значение в табл. 1.

Таблица 1 (2)

$N_{\text{пн}}$	$U_C, \text{ В}$	$R, \text{ кОм}$	$t, \text{ с}$	$i_1, \text{ мкА}$	$i_2, \text{ мкА}$	$i_3, \text{ мкА}$	$\langle i \rangle, \text{ мкА}$	$\ln \langle i \rangle$	$C, \text{ Ф}$	$r, \text{ кОм}$
1			5							
2			10							
3			15							
4			20							
5			25							
6			30							
7			35							
8			40							
9			45							
10			50							

6. Переключателем  $\Pi$  замкнуть конденсатор на сопротивление  $R$  и одновременно включить секундомер.

7. Снимать через каждые  $5\text{ с}$  (начиная с  $5\text{ с}$  и до  $50\text{ с}$ ) значения разрядного тока, величину тока записывать в табл. 1. С одним разрядным сопротивлением опыт проводят 3 раза.

8. Установить при помощи магазина сопротивлений другую величину  $R$  (по заданию преподавателя). Повторить пункты 4–7 с этим разрядным сопротивлением. Все результаты занести в табл. 2 (она подобна табл. 1).

### Обработка результатов измерений

1. По значениям тока  $i_1, i_2, i_3$  (в микроамперах) найти среднее значение величины тока  $\langle i \rangle$  для каждого времени и по усредненным значениям определить  $\ln \langle i \rangle$ . Записать полученные значения в табл. 1.

2. Построить график зависимости  $\ln \langle i \rangle = f(t)$  (см. рис. 2).

3. Продлив линию графика до пересечения с осью  $\ln \langle i \rangle$ , определить  $\ln i_0$ , затем, по известному логарифму, найти величину начального тока  $i_0$ . Поскольку значение тока получено в микроамперах, его нужно перевести в амперы.

4. Зная  $U_C$ , по формуле  $r = \frac{U_C}{i_0}$  определить величину разрядного сопротивления  $r$  и занести полученное значение в табл. 1.

5. Из графика найти тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\ln i_0 - \ln i}{t}. \quad (10)$$

6. Из формулы (9) следует:

$$C = \frac{t}{r (\ln i_0 - \ln i)}. \quad (11)$$

С учетом (10) получим формулу для нахождения емкости конденсатора  $C$ :

$$C = \frac{I}{r \operatorname{tg} \alpha}. \quad (12)$$

7. По формуле (12) найти значение  $C$  и занести его в табл. 1.

8. Построить график функции:  $I = f(t)$ .

9. Пункты 1–8 повторить для второго разрядного сопротивления. Все полученные данные записать в табл. 2.

10. Определить время релаксации при разрядке конденсатора двумя способами: а) используя формулу (8); б) график функции  $I = f(t)$ .

11. Определить погрешность при расчете емкости конденсатора как погрешность косвенного измерения по формуле:

$$\frac{\Delta C}{C} = \sqrt{\left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^2}. \quad (13)$$

Здесь  $\Delta r$  определяется как погрешность электрических измерений (класс точности моста сопротивлений равен 0,2); погрешность  $\Delta \operatorname{tg} \alpha$  определяется графическим методом.

### Контрольные вопросы для допуска к работе

1. Нарисовать электрические схемы зарядки конденсатора и его разрядки через сопротивление.
2. Какова причина разрядки конденсатора?
3. Будут ли отличаться величина сопротивления на магазине и величина разрядного сопротивления?
4. Как устанавливается величина сопротивления на магазине сопротивлений?
5. Как в работе определяется  $i_0$  – величина начального тока в момент времени  $t = 0$ ?
6. Объяснить устройство конденсатора, от каких величин зависит его ёмкость?
7. Как зависит величина разрядного тока от времени разрядки конденсатора?

### Контрольные вопросы для сдачи работы

1. Что называют электроёмкостью уединенного проводника? Каковы единицы измерения электроёмкости?
2. Записать формулы ёмкости уединенного проводника и взаимной электроёмкости.
3. Вывести формулы ёмкости плоского, цилиндрического, сферического конденсаторов.
4. От чего зависит ёмкость конденсатора?
5. Вывести формулы для определения ёмкости батареи, составленной из нескольких конденсаторов при их параллельном и последовательном соединении.
6. Каков физический смысл времени релаксации?
7. Вывести единицу измерения постоянной времени разряда.
8. Определить постоянную времени разряда конденсатора для каждого из разрядных сопротивлений.

9. Составить и решить дифференциальное уравнение для режима разрядки конденсатора через сопротивление (для заряда).

10. Доказать, что количество теплоты, выделившееся при разрядке конденсатора, равно энергии заряженного конденсатора в начальный момент времени.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-3 Изучение законов постоянного тока

**Цель работы:** изучить основные законы постоянного тока и правила Кирхгофа; произвести расчет разветвленной электрической цепи по заданному значению ЭДС и измеренным значениям силы тока и сопротивления.

### Введение

**Электрическим током** называется упорядоченное движение заряженных частиц. Так, электрический ток проводимости в металлах обусловлен направленным движением свободных электронов – электронов проводимости. За направление электрического тока принимают направление движения положительных зарядов. Для существования электрического тока необходимо наличие носителей тока и электрического поля.

Основными характеристиками тока являются сила тока и его плотность. **Силой тока  $I$**  называется величина, равная отношению заряда  $dq$ , перенесенного через поверхность за промежуток времени  $dt$ , к величине этого промежутка:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

В случае если ток постоянный:  $I = \frac{q}{t}$ . **Плотностью электрического тока** называется вектор  $\vec{j}$ , численно равный отношению силы тока через площадку, перпендикулярную направлению тока, к величине этой площадки:

$$\vec{j} = \frac{dI}{ds_{\perp}} \vec{n} \quad (2)$$

С учетом данного выражения силу тока можно задать следующим образом:

$$dI = j dS \cos \alpha \quad (3)$$



Для поддержания электрического тока в цепи необходим источник электрической энергии – источник тока. Силы, действующие на заряд со стороны источника тока, называются сторонними силами –  $F_{стор}$ . Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов по цепи. Отношение работы сторонних сил  $A_{стор}$  по перемещению положительного заряда к величине этого заряда называется электродвижущей силой – ЭДС:

$$\varepsilon = \frac{A_{стор}}{q}. \quad (4)$$

На неоднородном участке электрической цепи 1-2 (на участке цепи, содержащей ЭДС) одновременно действуют силы электрического поля и сторонние силы, которые совершают работу по переносу заряда по цепи:

$$dA_{12} = \vec{F}_{эл} d\vec{l} + \vec{F}_{стор} d\vec{l}. \quad (5)$$

Поскольку  $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}_{эл}$ ,  $\vec{F}_{стор} = q\vec{E}_{стор}$ , то полная работа на рассматриваемом участке будет равна:

$$A_{12} = q \int_1^2 \vec{E}_{эл} d\vec{l} + q \int_1^2 \vec{E}_{стор} d\vec{l}. \quad (6)$$

С учетом:  $\int_1^2 \vec{E}_{эл} d\vec{l} = \varphi_1 - \varphi_2$  и  $\int_1^2 \vec{E}_{стор} d\vec{l} = \varepsilon_{12}$ , получим:

$$A_{12} = q (\varphi_1 - \varphi_2) + q \varepsilon_{12}. \quad (7)$$

Величина, определяемая работой, совершаемой суммарным полем электрических и сторонних сил по перемещению положительного заряда на данном участке цепи к величине этого заряда называется падением напряжения ( напряжением) на данном участке цепи:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}. \quad (8)$$

Для однородного участка цепи, содержащей лишь сопротивление, справедлив **закон Ома**: сила тока  $I$  на участке электрической цепи пропорциональна приложенному напряжению  $U$ :

$$I \sim U = \Sigma U. \quad (9)$$

Здесь  $\Sigma$  – коэффициент пропорциональности, называемый электропроводностью. Величина, обратная электропроводности, называется сопротивлением  $R$ . Тогда закон Ома будет записан:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (9^1)$$



Сопротивление  $R$  зависит от геометрических размеров ( $l$ ,  $S$ ) и материала проводника ( $\rho$ ) следующим образом:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (10)$$

Закон Ома в дифференциальном виде записывается следующим образом:  $j = E / \rho$ . Введем величину  $\sigma$  – удельную электропроводность, которая обратно пропорциональна удельному сопротивлению  $\rho$ . Тогда закон Ома запишется:

$$j = \sigma E. \quad (11)$$

Для неоднородного участка цепи закон Ома имеет вид:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R_{\text{полн}}}; \quad (12)$$

если цепь замкнута, то  $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ ,  $\varepsilon_{12} = \varepsilon$  и тогда:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{полн}}}, \quad (13)$$

это закон Ома для замкнутой цепи. Здесь  $R_{\text{полн}}$  – суммарное сопротивление всей цепи, состоящее из сопротивления внешней цепи  $R$  и внутреннего сопротивления источника тока  $r$ :

$$R_{\text{полн}} = R + r. \quad (14)$$

Из закона Ома для замкнутой цепи следует:  $IR + Ir = \varepsilon$  или:

$$U_{\text{внеш}} + U_{\text{внутр}} = \varepsilon, \quad (15)$$

т. е. ЭДС равна сумме падений напряжений на внешнем и внутреннем сопротивлениях.

Если к концам проводника приложено напряжение  $U$ , то за время  $dt$  через сечение проводника переносится заряд  $dq = I dt$  и тогда работа тока на данном участке равна:

$$dA = U dq = U I dt = I^2 R dt = U^2 / R dt. \quad (16)$$

Воспользуемся определением мощности, тогда мощность тока на участке цепи:

$$P = dA / dt = U I = I^2 R = U^2 / R. \quad (17)$$

При прохождении электрического тока через сопротивление вся работа тока идет на его нагревание. По закону Джоуля-Ленца:

$$dQ = I^2 R dt, \quad (18)$$

или в дифференциальном виде:

$$w = \sigma E^2. \quad (19)$$

Здесь  $w$  – удельная тепловая мощность тока.

### Описание лабораторной установки и метода измерений

В работе используются следующие приборы и оборудование: источник питания  $\varepsilon$ , три резистора  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , магазин сопротивлений  $R_4$ , три амперметра  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , ключ  $K$ . Внешний вид лабораторной установки и электрическая схема показаны на рис. 1. и 1, а.



Рис. 1. Внешний вид лабораторной установки

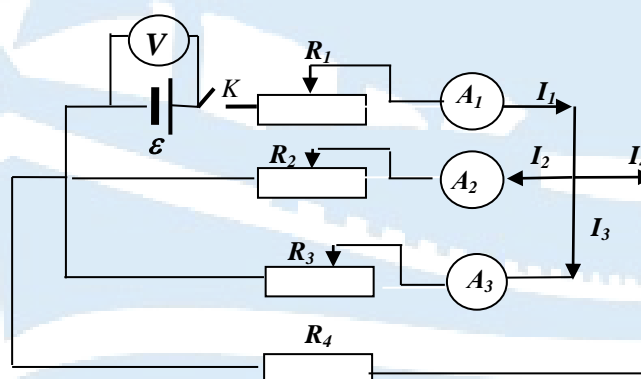


Рис. 1, а. Электрическая схема

Закон Ома позволяет рассчитывать разветвленные электрические цепи, однако их расчет довольно сложен. Задача расчета параметров электрической цепи значительно упрощается, если при расчете пользоваться правилами Кирхгофа.

**Первое правило Кирхгофа:** алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (20)$$

где  $n$  – число проводников, сходящихся в узле;  $I_k$  – сила тока в  $k$ -том проводнике. **Узлом** называется точка электрической цепи, в которой сходятся более двух проводников. Токи, подходящие к узлу, считаются положительными, токи, отходящие от него, – отрицательными. Первое правило Кирхгофа свидетельствует о том, что электрические заряды не должны накапливаться ни на каком из участков цепи.

**Второе правило Кирхгофа:** в любом замкнутом контуре, выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма падений напряжений на всех ветвях этого контура (**ветвь** – участок цепи от узла до узла) равна алгебраической сумме ЭДС всех источников электрической энергии, включенных в выбранный контур:

$$\sum_{k=1}^{n_i} I_k R_k = \sum_{k=1}^{n_i} \varepsilon_k, \quad (21)$$

где  $n_i$  – число ветвей, на которые контур разбивается узлами;  $I_k$  – сила тока;  $R_k$  – сопротивление;  $\varepsilon_k$  – ЭДС, соответствующие  $k$ -му участку. Второе правило Кирхгофа вытекает из закона Ома.

При решении задач с помощью правил Кирхгофа применяется следующий порядок расчета:

1. Указать направление обхода каждого контура в электрической цепи. Все токи в ветвях, совпадающие с направлением обхода, считать положительными. ЭДС считается положительной, если источник тока вызывает ток, совпадающий по направлению с обходом контура.

2. Подсчитать число узлов в цепи –  $m$ . Записать уравнения согласно первому правилу Кирхгофа для  $m - 1$  узлов цепи.

3. Выделить в цепи всевозможные замкнутые контуры; подсчитать число ветвей в цепи и с учетом направления обхода контура записать систему уравнений согласно второму правилу Кирхгофа. Число независимых уравнений должно быть равно:  $p - (m - 1)$ , где  $p$  – число ветвей в цепи, а  $m$  – число узлов. При составлении этих уравнений контуры следует выбирать так, чтобы каждый новый контур содержал хотя бы одну ветвь цепи, не входящую в уже рассмотренные контуры.

## Порядок выполнения работы

1. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.
2. Проверить правильность сборки электрической цепи согласно рис. 1,а и представить её на проверку преподавателю или заведующему лабораторией. Ключ **K** должен быть разомкнут.
3. Усвоить порядок изменения сопротивлений на магазине и переменных сопротивлениях и порядок переключения пределов измерения на амперметрах.
4. Установить на магазине сопротивлений  $R_4 = 50 \text{ Ом}$ .
5. Установить движки на переменных сопротивлениях  $R_1, R_2, R_3$  в среднее положение.
6. Установить на амперметрах переключателем предел измерения: на амперметре  $A_1 - 0,5 \text{ А}$ ; на амперметрах  $A_2$  и  $A_3 - 0,25 \text{ А}$ .
7. Определить цену делений амперметров  $A_1, A_2, A_3$  и вольтметра  $V$ .
8. Включить сеть и источник тока  $\varepsilon$ . Регулятором установить величину  $\varepsilon (3 \div 8) \text{ В}$  (по заданию преподавателя).
9. Установить по заданию преподавателя значение сопротивления на магазине сопротивлений  $R_4$ . Замкнуть ключ **K**.
10. Меняя сопротивления  $R_1, R_2, R_3$ , добиться как можно большего отклонения стрелок амперметров, после чего измерить токи  $I_1; I_2; I_3$  в ветвях контуров.
11. Записать значения  $\varepsilon$ , сопротивления  $R_4$  и измеренные значения токов  $I_1; I_2; I_3$  в табл. 1.
12. Произвести измерения токов  $I_1; I_2; I_3$  в ветвях контуров при двух других значениях  $R_4$  (по заданию преподавателя). Полученные значения токов записать в табл. 1. (Сопротивления  $R_1, R_2, R_3$  – не менять).

Таблица 1

№ п/п	$R_4$ Ом	$I_1$ А	$R_1$ Ом	$I_2$ А	$R_2$ Ом	$I_3$ А	$R_3$ Ом	$I_4$ А	$\varepsilon$ В
1									
2									
3									
$\langle R_1 \rangle =$			$\langle R_2 \rangle =$			$\langle R_3 \rangle =$		$\Delta R_1 =$	

## Обработка полученных результатов

1. Пользуясь правилами Кирхгофа, составить для данной электрической цепи необходимое для расчета сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и тока  $I_4$  число уравнений по первому и второму правилу.
2. Решая совместно полученные уравнения, найти ток  $I_4$  и сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  для каждого из трех измерений.
3. Найти средние значения  $\langle R_1 \rangle$ ,  $\langle R_2 \rangle$  и  $\langle R_3 \rangle$ . Все результаты записать в табл. 1.
4. Для значения сопротивления  $\langle R_1 \rangle$  найти абсолютную ошибку  $\Delta R_1$  как ошибку прямых измерений.

## Контрольные вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Какие измерения необходимо провести?
3. Как определить цену деления на шкале амперметра и вольтметра?
4. Изобразить принципиальную электрическую схему установки.
5. Рассказать порядок выполнения лабораторной работы.

## Контрольные вопросы для сдачи работы

1. Что называется силой тока, плотностью тока?
2. Какой участок цепи называется однородным? Сформулировать и записать закон Ома для однородного участка цепи в интегральном и дифференциальном виде.
3. Какой участок цепи называется неоднородным? Записать закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральном виде.
4. Записать закон Ома для замкнутой цепи.
5. Что называется падением напряжения на неоднородном участке цепи?
6. Что называется электродвижущей силой? Единицы измерения.
7. От чего зависит сопротивление проводника?
8. Сформулировать и записать закон Джоуля-Ленца в интегральном и дифференциальном виде.
9. Записать выражение для мощности тока.
10. Сформулировать и записать первое правило Кирхгофа. Что называется узлом электрической цепи?
11. Сформулировать и записать второе правило Кирхгофа. Что называется ветвью и контуром электрической цепи?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-4

### Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона

**Цель работы:** изучить движение заряженных частиц в магнитном поле; ознакомиться с методом магнетрона; определить удельный заряд электрона методом магнетрона.

#### Введение

На заряженную частицу  $q$ , движущуюся со скоростью  $\vec{V}$  в магнитном поле, индукция которого равна  $\vec{B}$ , действует сила  $\vec{F}$ . Эта сила называется **силой Лоренца**, или магнитной силой, и выражается формулой:

$$\vec{F} = q[\vec{V} \vec{B}]. \quad (1)$$

Сила Лоренца  $\vec{F}$  направлена перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы  $\vec{V}$  и  $\vec{B}$ . Направление  $\vec{F}$  выбирается так, чтобы последовательность векторов  $\vec{V}, \vec{B}, \vec{F}$  образовывала правовинтовую систему (так называемое правило левой руки). Модуль силы Лоренца выражается формулой:

$$F = qV B \sin \alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{V}$  и  $\vec{B}$ .

Траектория заряженной частицы в магнитном поле зависит от конфигурации поля, ориентации и величины вектора  $\vec{V}$ , отношения заряда частицы к её массе. Это отношение называется **удельным зарядом** частицы.

#### Описание лабораторной установки и метода измерений

Сущность метода магнетрона, используемого в работе, состоит в следующем: электронный вакуумный диод  $L$ , электроды которого представляют собой коаксиальные цилиндры, помещается внутри катушки индуктивности  $L$  так, что ось лампы (катод) совпадает с осью катушки (осью  $Z$ ).

Когда лампа включена в электрическую цепь, электроны, вылетающие из катода ( $K$ ) лампы, при отсутствии тока в катушке движут-



ся радиально к аноду ( $A$ ). При пропускании тока через катушку возникает магнитное поле, при этом лампа окажется в магнитном поле, параллельном оси лампы. На электроны, движущиеся от катода к аноду, начинает действовать сила Лоренца, вследствие чего траектория электрона искривляется.

При определенном отношении между скоростью электрона и индукцией магнитного поля катушки электроны перестанут достигать анода, т. е. ток в лампе прекратится.

Рассмотрим движение электрона в лампе при наличии магнитного поля. Воспользуемся цилиндрической системой координат (см. рис. 1), тогда положение электрона определяется его расстоянием  $r$  от оси и полярным углом  $\varphi$ .

Электрон, вылетающий из катода, движется в плоскости, перпендикулярной оси  $Z$ , совпадающей с направлением магнитного поля катушки с током. (Ось  $Z$  перпендикулярна к плоскости чертежа, см. рис. 1).

Момент импульса электрона  $L_z$  относительно оси  $Z$  равен:

$$L_z = m V_\varphi r, \quad (3)$$

где  $V_\varphi = r \frac{d\varphi}{dt}$  – составляющая скорости, перпендикулярная радиусу  $r$ ,  $m$  – масса электрона.

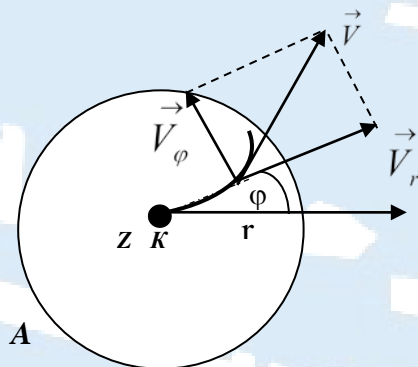


Рис. 1

Момент магнитной силы  $M_z$ , действующий на электрон, относительно оси  $Z$  будет равен:

$$M_z = r F_\varphi = r e V_r B, \quad (4)$$

где  $F_\varphi = e V_r B$ ,  $V_r = \frac{dr}{dt}$  – радиальная составляющая скорости электрона.

трона;  $e$  – заряд электрона. Запишем основное уравнение динамики вращательного движения:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}. \quad (5)$$

Спроецируем (5) на ось  $Z$  и подставим  $M_z$  и  $L_z$ , тогда имеем:

$$r e \frac{dr}{dt} B = \frac{d(m V_\varphi r)}{dt}. \quad (6)$$

Проинтегрировав уравнение (6), получим:

$$m V_\varphi r = \frac{1}{2} e B r^2. \quad (7)$$

Из (7) найдем  $V_\varphi$ :

$$V_\varphi = \frac{e B r}{2 m}. \quad (8)$$

Кинетическая энергия электрона равна работе сил электрического поля по его перемещению:

$$\frac{m(V_\varphi^2 - V_r^2)}{2} = eU, \quad (9)$$

где  $U$  – потенциал относительно катода точки поля, в которой находится электрон.

Подставляя в (9) значение  $V_\varphi$  из (8), получим:

$$eU = \frac{m}{2} \left[ \frac{1}{4} \left( \frac{e}{m} \right)^2 B^2 r^2 - V_r^2 \right]. \quad (10)$$

При некотором критическом значении индукции магнитного поля  $B_{кр}$ , скорость электрона вблизи анода станет перпендикулярной к радиусу  $r$ , т. е.  $V_r = 0$ . Тогда уравнение (10) примет вид:

$$eU_a = \frac{m}{8} \left( \frac{e}{m} \right)^2 B_{кр}^2 r_a^2, \quad (11)$$

где  $U_a$  – потенциал анода относительно катода (анодное напряжение) при критическом токе  $I_{кр}$ ;  $r_a$  – радиус цилиндрического анода лампы.

Критическое значение магнитной индукции катушки с током  $I_{кр}$  определяется из формулы:

$$B_{кр} = \mu_0 I_{кр} \frac{N}{\sqrt{L^2 + D^2}}, \quad (12)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная;  $N = 2500$  – число витков катушки;  $L = 168 \text{ мм}$  – длина катушки;  $D = 85 \text{ мм}$  – диаметр катушки.

Из (11) находим выражение для удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2} \quad (13)$$

Радиус анода лампы:  $r_a = 1,7 \text{ мм}$ .

Таким образом, удельный заряд электрона можно вычислить, экспериментально определив  $B_{кр}$ , для чего необходимо найти критическое значение тока  $I_{кр}$ .

В работе используются следующие приборы и оборудование: **ФПЭ-03** – кассета (включает в себя катушку индуктивности  $L$ , внутри которой находится электронный вакуумный диод  $L$ ); источник питания **ИП**; миллиамперметр  $mA$ . Внешний вид лабораторной установки и электрическая схема представлены на рис. 2 и рис 2, а.

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.
2. Проверить правильность сборки электрической цепи согласно рис. 2, а и представить её на проверку преподавателю или заведующему лабораторией.
3. Включить установку. Установить регуляторами на источнике питания значение тока  $I_K = 0,6 \text{ А}$  и напряжение  $U_A = 40 \text{ В}$ . Дать прогреться лампе в течение 5 мин.

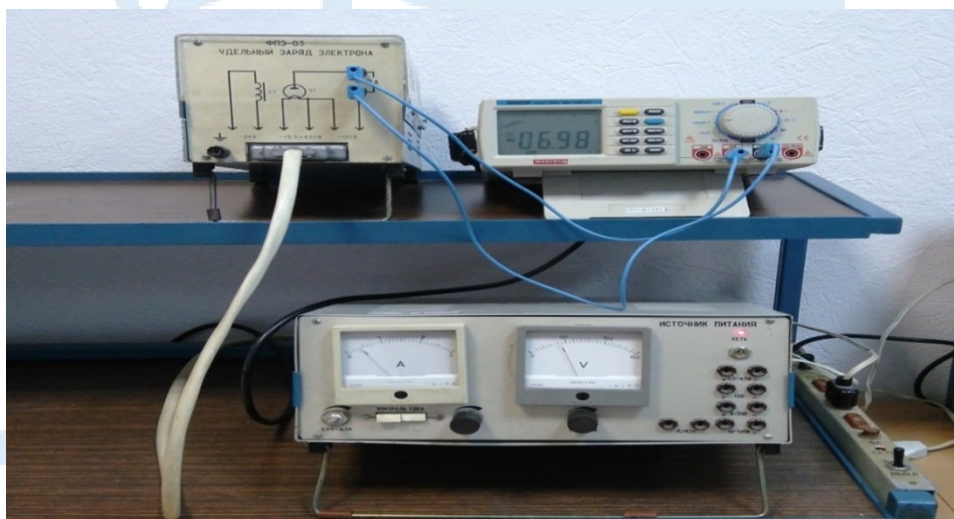


Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

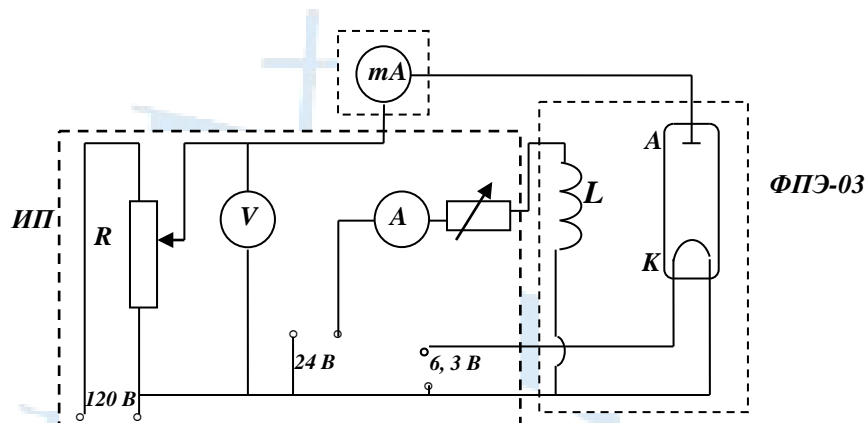


Рис. 2, а. Электрическая схема

4. Изменяя ток, текущий через катушку ( $I_K$ ) в пределах от  $0,6$  до  $2,4$  А через  $0,2$  А, производить измерения анодного тока  $I_A$  миллиамперметром  $mA$ . Значения  $I_K$  и  $I_A$  занести в табл. 1.

Установить регулятором напряжения  $U_A = 50$  В и проделать измерения согласно пункту 4. Произвести аналогичные измерения для  $U_A = 60$  В.

Таблица 1

$I_K$ А	$U_A=40$ В	$U_A=50$ В	$U_A=60$ В
	$I_A$ mA	$I_A$ mA	$I_A$ mA
0,6			
0,8			
1,0			
1,2			
1,4			
1,6			
1,8			
2,0			
2,2			
2,4			

5. По результатам измерений  $I_K$  и  $I_A$  для трех значений анодного напряжения построить графики функции  $I_A = \varphi(I_K)$ , (так называемые сбросовые характеристики, см. рис. 3).

6. Найти критическое значение тока  $I_{кр}$  в катушке, для чего провести касательную к точке перегиба сбросовой характеристики на

участке её спада и прямую линию, соответствующую изменению минимальных значений анодного тока, до взаимного пересечения (как показано на рис. 3). Занести значение  $I_{кр}$  в табл. 2.

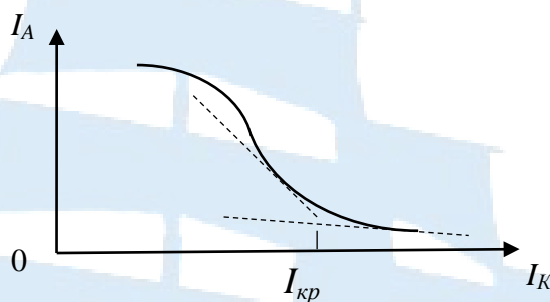


Рис. 3

7. Определить критическое значение  $B_{кр}$  индукции магнитного поля по формуле (13) и занести его в табл. 2.

Таблица 2

$U_A$ $B$	$I_{кр}$ $A$	$B_{кр}$ $Tл$	$(\frac{e}{m})_{экс}$ $Кл/кг$	$\langle (\frac{e}{m})_{экс} \rangle$ $Кл/кг$	$(\frac{e}{m})_{табл}$ $Кл/кг$	$\varepsilon$
40						
50						
60						

8. Вычислить удельный заряд электрона по формуле (13) для трех значений анодного напряжения, найти его среднее значение и сравнить с табличным.

9. Вычислить относительную погрешность  $\varepsilon$  полученной величины  $\frac{e}{m}$  по формуле:

$$\varepsilon = \frac{(\frac{e}{m})_{табл} - \langle (\frac{e}{m})_{экс} \rangle}{(\frac{e}{m})_{табл}} \quad (14)$$

Результаты расчетов по пунктам 8 и 9 записать в табл. 2.

### Контрольные вопросы для допуска к работе

1. Показать порядок включения установки.
2. Объяснить порядок включения амперметра в цепь в режиме измерения миллиамперов.

3. Какие измерения необходимо провести в работе?
4. Какой из амперметров измеряет анодный ток, а какой – ток через катушку?
5. Нарисовать сбросовую характеристику. Почему анодный ток с увеличением  $I_k$  уменьшается?
6. Сколько сбросовых характеристик требуется построить в данной работе?
7. Как определяется критическое значение тока в катушке?
8. Показать на установке, где находится соленоид и лампа.

### Контрольные вопросы для сдачи работы

1. Что называется удельным зарядом? Каковы единицы его измерения?
2. В чем суть метода магнетрона для определения удельного заряда электрона? Какова величина удельного заряда электрона?
3. Как направлена сила, действующая со стороны магнитного поля на движущуюся в этом поле заряженную частицу по отношению к вектору скорости этой частицы?
4. Записать выражение для силы Лоренца в векторном и скалярном видах.
5. Как определяется направление силы Лоренца? Привести пример.
6. Когда заряженная частица движется в магнитном поле, совершает ли при этом сила Лоренца работу? Ответ обосновать.
7. Зависит ли величина удельного заряда электрона  $e/m_{экс}$  от величины анодного напряжения? Ответ обосновать.
8. Какой вид будет иметь траектория заряженной частицы, если она движется в однородном магнитном поле со скоростью  $\vec{V}$ , перпендикулярной вектору  $\vec{B}$ ? Ответ обосновать.
9. Какой будет траектория заряженной частицы, если она движется в однородном магнитном поле со скоростью  $\vec{V}$ , направленной под углом вектору  $\vec{B}$ ? Ответ обосновать.
10. Получить формулу периода обращения частицы с удельным зарядом, равным  $e/m$ , в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ .
11. Можно ли по характеру отклонения заряженной частицы в магнитном поле судить о знаке заряда этой частицы?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-5

### Изучение магнитного поля соленоида с помощью датчика Холла

**Цель работы:** познакомиться с холловским методом измерения индукции магнитного поля соленоида; определить постоянную Холла; исследовать магнитное поле соленоида.

#### Введение

В пространстве, окружающим проводники с током или движущиеся заряды, возникает магнитное поле, которое можно обнаружить по его воздействию на другой проводник с током или магнитную стрелку. Магнитное поле в каждой точке пространства может быть описано с помощью **вектора магнитной индукции**  $\vec{B}$  или с помощью вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ . В вакууме векторы  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  связаны соотношением:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad (1)$$

здесь  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная.

Для вычисления напряженности магнитного поля используется **закон Био-Савара-Лапласа**, согласно которому напряженность поля  $d\vec{H}$ , создаваемая элементом проводника с током  $I d\vec{l}$  в некоторой точке пространства на расстоянии  $\vec{r}$ , определяется выражением:

$$d\vec{H} = \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}. \quad (2)$$

Для нахождения результирующей напряженности, создаваемой проводником с током конечных размеров, надо воспользоваться принципом суперпозиции магнитных полей:

$$\vec{H} = \sum_{i=1}^n \vec{H}_i. \quad (3)$$

В пределе (3) записывается следующим образом:

$$\vec{H} = \int_i d\vec{H}. \quad (4)$$

В скалярном виде формула (2) имеет вид:

$$dH = \frac{I dl}{4\pi r^2} \sin \alpha . \quad (5)$$

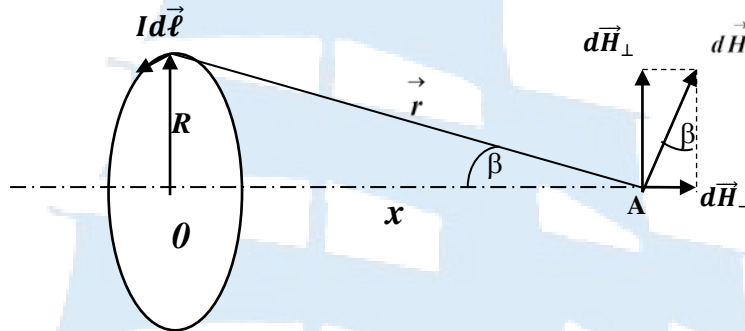


Рис. 1

Применим формулу (5) для вычисления напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  на оси кругового тока на расстоянии  $x$  от центра контура (рис. 1). Разобьём контур на элементы  $dl$ .

При сложении составляющих магнитного поля  $d\vec{H}_\perp$ , перпендикулярных оси  $OA$ , они скомпенсируют друг друга вследствие симметрии контура. Тогда результирующая напряженность поля в точке  $A$  направлена по оси кругового тока и равна по модулю:

$$H_{оси} = \oint_l dH_- . \quad (6)$$

Из рис. 1 видно, что:

$$dH_- = dH \sin \beta . \quad (7)$$

Подставим в (7) формулу (5) и учтём, что векторы  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$  взаимно перпендикулярны, т. е.  $\sin \alpha = 1$ . Из рис. 1 видно, что  $\sin \beta = \frac{R}{r}$ , в результате получим:

$$dH_- = \frac{I R}{4\pi r^3} dl . \quad (8)$$

Тогда, из формулы (6), имеем:

$$H_{оси} = \int_0^{2\pi R} \frac{I R}{4\pi r^3} dl = \frac{I R^2}{2r^3} . \quad (9)$$

Используем формулу (9) для вычисления поля соленоида конечной длины (рис. 2). Это поле направлено по оси  $Z$ . Изобразим участок

соленоида  $dZ$  на отдельном рисунке (см. рис. 3). На участке  $dZ$  будет  $ndZ$  витков, которые в точке  $O$  соленоида создадут напряженность:

$$dH_z = \frac{IR^2}{2r^3} n dZ \quad (10)$$

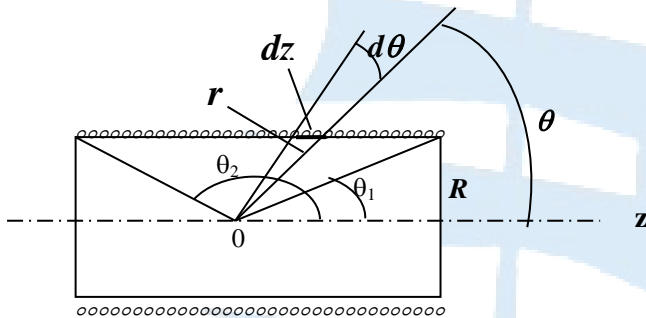


Рис. 2

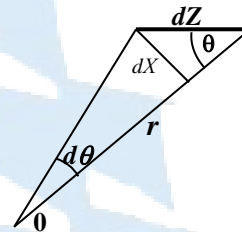


Рис. 3

Из рис. 2 и 3 следует:

$$r = \frac{R}{\sin \theta}, \quad dX = r d\theta, \quad dZ = \frac{rd\theta}{\sin \theta}. \quad (11)$$

Подставим (11) в (10) и проинтегрируем в пределах от  $\theta_1$  до  $\theta_2$ :

$$H_z = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{2} In \sin \theta d\theta = \frac{1}{2} In (\cos \theta_1 - \cos \theta_2). \quad (12)$$

Формула (12) определяет величину магнитного поля соленоида на оси  $Z$ . Для бесконечно длинного соленоида магнитное поле на его оси определяется выражением:

$$H_z = In. \quad (13)$$

### Описание лабораторной установки и метода измерений

Для экспериментального исследования напряженности магнитного поля на оси соленоида в настоящей работе используется метод, основанный на явлении Холла. Сущность явления Холла состоит в следующем. Если через проводящую пластинку с поперечным сечением  $a \cdot h_d$  (см. рис. 4) пропустить ток плотностью  $\vec{j}$  и поместить её в поперечное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}_0$ , то перпендикулярно векторам  $\vec{j}$  и  $\vec{B}_0$  создается электрическое поле напряженностью  $\vec{E}$ .

Возникающая при этом разность потенциалов  $\Delta\varphi_x$  (холловская разность потенциалов или ЭДС Холла) пропорциональна величине тока и индукции магнитного поля:

$$\Delta\varphi_x = R_x j B_0 a = R_x \frac{I_d B_0}{h_d}, \quad (14)$$

где  $I_d = a h_d j$ . Коэффициент пропорциональности:  $R_x = \frac{1}{en}$  называется постоянной Холла, а само описанное выше устройство – датчиком Холла.

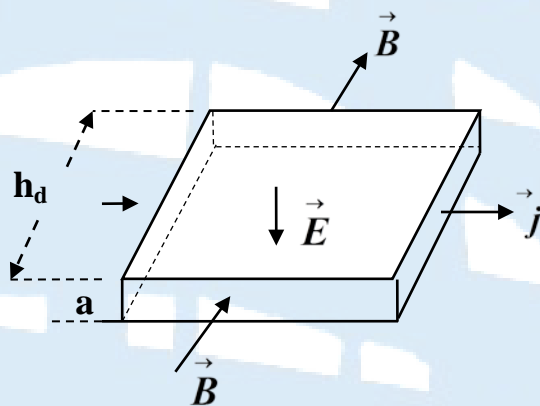


Рис. 4

Силовые линии магнитного поля на оси соленоида направлены вдоль оси, поэтому датчик Холла располагается на торце специального штока, вставляемого в соленоид. Для измерения положения датчика внутри соленоида на боковой грани штока нанесена миллиметровая шкала.

### Порядок выполнения работы

В работе используются следующие приборы и оборудование: источник питания **ИП** с амперметром, цифровой вольтметр **V**, кассета **ФПЭ-04**, соленоид **L**, шток **Ш** с закрепленным на конце датчиком Холла **ДХ**.

Параметры установки:  $h_d = 0,2 \text{ мм}$ ,  $I_d = 90 \text{ мА}$ ,  $N = 2500$ ,  $L = 168 \text{ мм}$ .

Внешний вид лабораторной установки и электрическая схема представлены на рис. 5 и 5, а.



Рис. 5. Внешний вид лабораторной установки

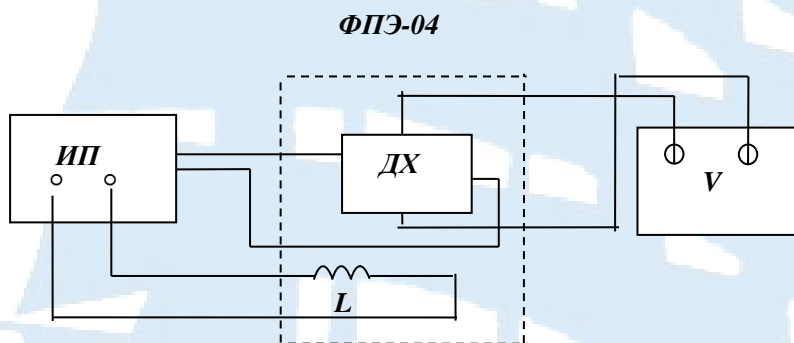


Рис. 5, а. Электрическая схема

**Задание 1. Определение постоянной Холла. Определение зависимости магнитной индукции в средней точке на оси соленоида от величины тока**

1. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.
2. Проверить правильность сборки электрической цепи согласно рис. 5, а и представить её на проверку преподавателю или заведующему лабораторией.
3. Поставить шток **Ш** в среднее положение на оси соленоида («0» по шкале). Включить источник питания и вольтметр в сеть «220 В».
4. Установить силу тока, равную **0,5 А**. Измерить вольтметром **V** ЭДС Холла  $\Delta\varphi_x$  и **вычесть из неё поправку  $\Delta\varphi_{xp} = 1,75 мВ$** . Данные занести в табл. 1.



Таблица 1

№ п/п	Ток соленоида $I_c, A$	ЭДС датчика $\Delta\varphi_x, мВ$	Напряженность $H_0, A/м$	Индукция $B_0, Тл$	Постоянная Холла $R_{Хх}, Вм/ТлА$	$\langle R_{Хх} \rangle, Вм/ТлА$
1	0,5					
2	1					
3	1,5					
4	2					

5. Прodelать измерения  $\Delta\varphi_x$  для токов  $1 A$ ;  $1,5 A$ ;  $2 A$ . Данные для  $\Delta\varphi_x$  (с учетом поправки  $\Delta\varphi_{хп} = 1,75 мВ$ ) занести в табл. 1.

6. Вычислить напряженность  $H_0$  и индукцию магнитного поля  $B_0$  для заданных значений силы тока по формулам:  $H_0 = I \frac{N}{L}$ ,  $B_0 = \mu_0 H_0$ . Результаты занести в табл. 1.

7. По формуле:  $R_{Хх} = \frac{\Delta\varphi_x h_d}{I_a B_0}$ , которая следует из (14), вычислить постоянную Холла для всех измерений, найти её среднее значение  $\langle R_{Хх} \rangle$ , полученные данные занести в табл. 1.

8. Найти абсолютную погрешность  $\Delta R_{Хх}$  как погрешность прямых измерений.

9. По данным табл. 1 построить графики зависимости:  $B_0 = \varphi(I_c)$  и  $\Delta\varphi_x = \varphi(I_c)$ .

## Задание 2. Исследование зависимости индукции магнитного поля $B$ от координаты $Z$ на оси соленоида

1. Установить величину тока в соленоиде по указанию преподавателя, записать его в табл. 2. Поставить шток в крайнее положение на оси соленоида («100» по шкале).

2. Перемещать шток с датчиком Холла по оси соленоида с интервалом  $20 мм$  до крайнего положения и одновременно измерять ЭДС Холла. Полученные данные занести в табл. 2.

3. Вычислить индукцию магнитного поля для каждого положения датчика Холла по формуле:  $B = \frac{\Delta\varphi_x h_d}{I_a \langle R_{Хх} \rangle}$ , полученные данные занести в табл. 2.

4. По данным табл. 2 построить график зависимости  $B = \varphi(Z)$ . Проанализировать полученную зависимость.

Таблица 2

$$(I_c = \quad )$$

Положение датчика $Z$ , мм	100	80	60	40	20	0	20	40	60	80	100
ЭДС Холла, $\Delta\varphi_x$ (мВ)											
Индукция $B$ , мТл											

5. Для значения  $B$ , полученного при нулевом положении штока, рассчитать относительную  $\varepsilon$  и абсолютную  $\Delta B$  погрешности измерений как погрешность косвенных измерений.

### Контрольные вопросы для допуска к работе

1. Где расположен датчик Холла? Чему равна толщина датчика Холла? Какова величина управляющего тока, проходящего через датчик?
2. Что представляет собой соленоид? Укажите, где он находится в лабораторной установке.
3. Какая величина измеряется при помощи датчика Холла?
4. В каком положении должен находиться шток при выполнении первого упражнения?
5. Какие измерения проводятся при выполнении первого и второго заданий?

### Контрольные вопросы для сдачи работы

1. Сформулировать и записать закон Био-Савара-Лапласа в векторном и скалярном видах.
2. Пользуясь законом Био-Савара-Лапласа, вывести формулу для индукции магнитного поля в центре кругового тока.
3. Пользуясь законом Био-Савара-Лапласа, вывести формулу для индукции магнитного поля на оси кругового тока.
4. Записать формулы для напряженности магнитного поля в центре и на оси кругового тока.
5. Какое выражение называется циркуляцией вектора индукции магнитного поля по замкнутому контуру?

6. Сформулировать и записать теорему о циркуляции вектора магнитной индукции по замкнутому контуру (в векторном и скалярном видах).

7. Пользуясь теоремой о циркуляции вектора магнитной индукции по замкнутому контуру, вывести формулу для индукции магнитного поля на оси бесконечно длинного соленоида.

8. Записать формулу для индукции магнитного поля соленоида конечной длины.

9. В чем заключается явление Холла?

10. Вывести формулу для ЭДС Холла.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-6

### Определение характеристик магнитного поля с помощью гальванометра

**Цель работы:** определить цену деления гальванометра; применить явление электромагнитной индукции для нахождения напряженности и индукции магнитного поля постоянного магнита.

#### Введение

В пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает поле, называемое магнитным. Магнитное поле обнаруживается по силовому действию. Так, если рамку с током поместить в магнитное поле, она начнет ориентироваться по полю.

**Вектор магнитного момента  $\vec{P}_m$**  рамки с током определяется следующим образом:

$$\vec{P}_m = IS\vec{n}, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока, протекающего по рамке с током;  $S$  – площадь рамки;  $\vec{n}$  – нормаль к плоскости рамки.

Так как рамка с током испытывает ориентирующее действие тока, то на неё в магнитном поле действует пара сил. Вращающий момент сил  $\vec{M}$  определяется формулой:

$$\vec{M} = [\vec{P}_m \vec{B}] \quad (2)$$

Основной силовой характеристикой магнитного поля является **вектор магнитной индукции  $\vec{B}$** . Величина магнитной индукции в

данной точке магнитного поля определяется отношением максимального вращающего момента  $M_{max}$ , действующего на рамку, к магнитному моменту рамки с током  $p_m$ :

$$B = \frac{M_{max}}{p_m}. \quad (3)$$

Магнитная индукция измеряется в теслах (Тл).

Графически магнитное поле изображают при помощи линий магнитной индукции (силовых линий) – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора  $\vec{B}$ . Силовые линии никогда не пересекаются, по густоте линий можно судить о величине магнитной индукции. Силовые линии всегда замкнуты. Поля, обладающие замкнутыми силовыми линиями, называются вихревыми, т. е. магнитное поле – **вихревое**. Направление линий индукции определяется по правилу правого винта.

Магнитное поле описывается также другой силовой характеристикой – вектором напряженности  $\vec{H}$ . В вакууме вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  и вектор напряженности  $\vec{H}$  связаны между собой соотношением:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad (4)$$

здесь  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная.

Поток вектора магнитной индукции  $d\Phi_m$  (магнитный поток) через элемент поверхности  $d\vec{S}$  определяется следующим образом:

$$d\Phi_m = \vec{B} d\vec{S} = B dS \cos \alpha = B_n dS. \quad (5)$$

Магнитный поток через поверхность  $S$ :

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B_n dS = B S \cos \alpha, \quad (6)$$

здесь  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и нормалью к поверхности  $\vec{n}$ . Магнитный поток измеряется в веберах ( $B\phi$ ).

При изменении магнитного потока через замкнутый проводящий контур в последнем возникнет электродвижущая сила индукции  $\epsilon_i$  и по контуру потечет ток. Это явление называется явлением электромагнитной индукции, а возникающий ток – индукционным. Вели-

чина  $\varepsilon_i$  не зависит от способа изменения магнитного потока  $\Phi_m$ , а определяется скоростью его изменения. Запишем закон электромагнитной индукции:

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7)$$

т. е. ЭДС электромагнитной индукции равна скорости изменения магнитного потока, взятого с обратным знаком.

Пусть цепь состоит из проводящей рамки с количеством витков  $N$  и площадью  $S$ , имеющей сопротивление  $R$ , и гальванометра с сопротивлением  $R_g$ . При повороте рамки в магнитном поле по цепи потечет индукционный ток.

Для определения мгновенного значения силы индукционного тока применим закон Ома для нашей замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R + R_g}, \quad (8)$$

или, с учетом (6):

$$I = - \frac{1}{R + R_g} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (9)$$

В результате поворота рамки по цепи протечет заряд  $q$ .

Найдем величину этого заряда. Из определения силы тока:  $I = \frac{dq}{dt}$ , с учетом (8) имеем:

$$dq = Idt = - \frac{1}{R + R_g} \frac{d\Phi}{dt} dt = - \frac{1}{R + R_g} d\Phi. \quad (10)$$

В нашем случае магнитный поток  $\Phi$  определяется выражением:

$$\Phi = NBS \cos \alpha. \quad \text{Тогда: } d\Phi = -NBS \sin \alpha d\alpha. \quad (11)$$

Если рамку повернуть на угол  $\alpha = \pi/2$ , то из (11) и (10) имеем:

$$q = \frac{NBS}{R + R_g}, \quad (12)$$

т. е. наша задача сводится к определению величины заряда  $q$ . Зная  $q$ , из (12) найдем величину магнитной индукции  $B$ .



## Описание лабораторной установки и метода измерений

В работе используются следующие приборы и оборудование: источник постоянного тока *ИП* с вольтметром *V*, зеркальный гальванометр *G*, переключатели *K* и *П*, конденсатор *C*, постоянный подковообразный магнит *NS*, проводящая рамка *P*, демпфер *K<sub>Г</sub>*.

Параметры установки:  $C = 10 \text{ нФ} \pm 20 \%$ ;  $R = 1,2 \text{ кОм} \pm 5 \%$ ;  $R_{Г} = 22 \text{ Ом} \pm 5 \%$ ;  $S = 12 \text{ см}^2$ ;  $N = 10$ .

Внешний вид лабораторной установки и ее электрическая схема показаны на рис. 1 и 1, а. Если переключатели *K* и *П* стоят в положении 3-4 (см. рис. 1, а), то рамка *P*, которую можно поворачивать в магнитном поле подковообразного магнита, подключена к гальванометру. При повороте рамки индуцированный заряд *q* проходит через цепь гальванометра, что приводит к отбросу светового луча (зайчика) на шкале гальванометра на *n* делений.

Для определения величины заряда *q* требуется определить цену деления гальванометра *G*.



Рис. 1. Внешний вид лабораторной установки



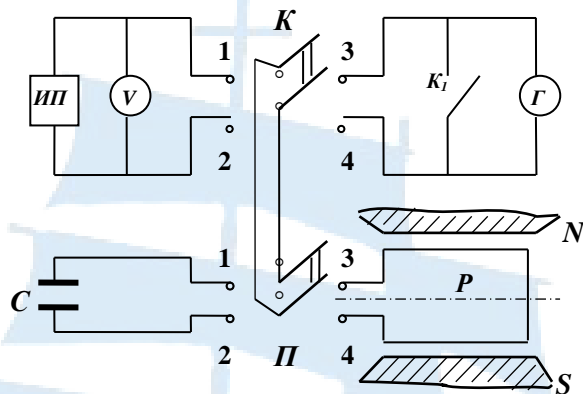


Рис. 1, а. Электрическая схема

Включим **ИП**, переключатели **К** и **П** поставим в положение 1-2 (см. рис. 1, а), при этом конденсатор **С** замыкается на источник питания **ИП** и заряжается до разности потенциалов  $U$ , измеряемой вольтметром **V**. Заряд  $q_0$  на обкладках конденсатора будет равен:

$$q_0 = C U, \quad (13)$$

где  $C$  – ёмкость конденсатора.

Если переключатель **К** перебросить в положение 3-4, через гальванометр протечет заряд  $q_0$ , накопленный конденсатором. Этот заряд вызовет отклонение светового луча (зайчика) на  $n_0$  делений. Тогда цена деления гальванометра будет равна:

$$G = \frac{q_0}{n_0} = \frac{C U}{n_0}. \quad (14)$$

Зная цену деления гальванометра, найдем заряд  $q$ , прошедший через гальванометр при повороте рамки в магнитном поле магнита и вызвавший отклонение луча на  $n$  делений:

$$q = G n. \quad (15)$$

Тогда, с учетом формулы (12), имеем для величины индукции  $B$ :

$$B = \frac{G n (R + R_r)}{N S}. \quad (16)$$

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.
2. Проверить правильность сборки электрической цепи согласно рис. 1, а и представить её на проверку преподавателю или заведующему лабораторией.

3. Включить гальванометр в сеть «220 В», убедиться в установке светового луча на  $\theta$ .

4. Включить источник питания в сеть, установить на нем напряжение  $U$  (по заданию преподавателя), записать значение  $U$  в табл. 1.

### Задание 1. Определение цены деления гальванометра

– замкнуть ключи  $K$  и  $\Pi$  в положение 1-2, выдержать 5 с;  
 – перекинуть ключ  $K$  в положение 3-4, одновременно измерить отклонение светового луча по шкале гальванометра  $n_0$ , занести значение  $n_0$  в табл. 1;

– успокоить колеблющийся луч с помощью демпфера  $K_1$ , нажимая его кнопку при прохождении луча через  $\theta$  шкалы;

– повторить измерения  $n_0$  5 раз.

### Задание 2. Определение магнитной индукции

– поставить переключатель  $\Pi$  в положение 3-4;  
 – повернуть ручку рамки  $P$  до упора и не отпускать;  
 – замкнуть переключатель  $K$  в положение 3-4 (световой луч на  $\theta$ );  
 – отпустить ручку рамки, одновременно измерить отклонение светового луча  $n$ , результат занести в табл. 1;

– разомкнуть переключатель  $K$ , демпфером остановить луч;

– повторить измерения  $n$  5 раз.

5. После окончания эксперимента отключить гальванометр и источник питания из сети.

6. Записать класс точности вольтметра  $n_V$  и максимальное показание его шкалы  $U_{max}$  (для определения  $\Delta U$ ).

Таблица 1

№ п/п	$n_0$ , мм	$n$ , мм	$U$ , В	$\Delta U$ , В	$G, 10^{-9}$ Кл/мм	$B$ , Тл	$\Delta B$ , Тл	$H$ , А/м	$\Delta H$ , А/м
1									
2									
4									
5									
6									

## Обработка полученных результатов

1. Рассчитать среднее значение  $\langle n_0 \rangle$  и погрешность  $\Delta \langle n_0 \rangle$  методом прямых измерений.
2. Рассчитать среднее значение  $\langle n \rangle$  и погрешность  $\Delta \langle n \rangle$  методом прямых измерений.
3. По формуле:  $G = \frac{CU}{\langle n_0 \rangle}$  определить цену деления гальванометра.
4. Определить  $\Delta U$  как погрешность электрических измерений.
5. Определить относительную погрешность  $\varepsilon = \frac{\Delta G}{G}$  при расчете  $G$  как погрешность косвенных измерений.
6. Рассчитать среднее значение величины магнитной индукции  $\langle B \rangle$  по формуле  $\langle B \rangle = \frac{G \langle n \rangle (R + R_r)}{N S}$ , используя значения  $\langle n \rangle$ ,  $G$  и заданные параметры установки.
7. Определить относительную погрешность  $\varepsilon$  для индукции магнитного поля по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta B}{\langle B \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \langle n \rangle}{\langle n \rangle}\right)^2 + \frac{\Delta R^2 + \Delta R_r^2}{(R + R_r)^2}}.$$

$\Delta R$  и  $\Delta R_r$  найти по их известным относительным ошибкам.

8. Определить абсолютную погрешность  $\Delta B$  для индукции магнитного поля по формуле:  $\Delta B = \langle B \rangle \cdot \varepsilon$ .
9. Рассчитать напряженность магнитного поля  $H$  по формуле:  $H = \frac{B}{\mu_0}$  и найти абсолютную погрешность  $\Delta H$  по формуле:  $\Delta H = \frac{\Delta B}{\mu_0}$ .
10. Результаты расчетов записать в табл. 1.

## Контрольные вопросы для допуска к работе

1. Укажите шкалу гальванометра. Какую величину измеряет гальванометр в данной работе?
2. Для чего производится градуировка гальванометра?
3. Каково назначение конденсатора?
4. Назовите основные характеристики магнитного поля.
5. Какое явление используется в работе для измерения характеристик магнитного поля?

6. Почему поворот рамки осуществляется с помощью пружины, на какой угол поворачивается рамка и почему?
7. Для чего служит демпфер? Расскажите принцип его действия.
8. Объясните порядок зарядки конденсатора, нарисуйте электрическую схему для зарядки конденсатора.

### Контрольные вопросы для сдачи работы

1. Назовите основные характеристики магнитного поля. Каковы единицы измерения величин, характеризующих магнитное поле?
2. Как связаны между собой векторы  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  в вакууме?
3. Как графически изображается магнитное поле? Дайте определение линиям индукции магнитного поля? Какое поле называется однородным?
4. В чем заключается явление электромагнитной индукции? Сформулируйте закон электромагнитной индукции и дайте его математическую запись.
5. Что называется магнитным потоком, от чего он зависит, единицы измерения?
6. Сформулируйте правило Ленца для определения направления индукционного тока.
7. Если нормаль к проводящему контуру совпадает с направлением вектора  $\vec{B}$ , то на какой угол следует повернуть плоскость контура, чтобы изменение магнитного потока было максимальным?
8. Вывести формулу (16).
9. Как в работе определяются абсолютные погрешности измерений  $\Delta B$  и  $\Delta H$ ?

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-7 Изучение явления взаимной индукции

**Цель работы:** исследование явления взаимной индукции двух коаксиально расположенных катушек. Определение коэффициента взаимной индукции при различном положении катушек, при различных значениях питающего напряжения на одной из катушек, при различных частотах питающего напряжения.

## Введение

Рассмотрим два контура 1 и 2, расположенные на некотором расстоянии друг от друга (рис. 1).

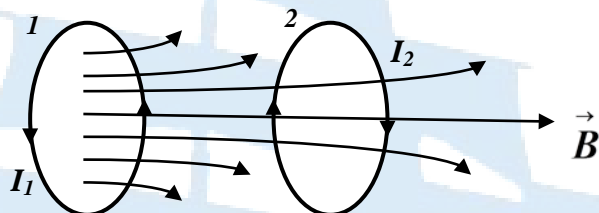


Рис. 1

Если по контуру 1 пропустить ток  $I_1$ , то он создаёт поток магнитной индукции  $\Phi_{21}$  через контур 2, который будет пропорционален току  $I_1$ :

$$\Phi_{21} = M_{21} I_1. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности  $M_{21}$  называется **коэффициентом взаимной индукции** контуров 1-2 или взаимной индуктивностью контуров. Коэффициент взаимной индукции зависит от формы и взаимного расположения контуров 1-2, а также от магнитных свойств окружающей среды.

При **изменении** тока  $I_1$  в первом контуре магнитный поток  $\Phi_{21}$  через второй контур изменится и, согласно явлению электромагнитной индукции, в нём наводится ЭДС индукции  $\varepsilon_2$ , которая в данном случае называется **ЭДС взаимной индукции**:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{dI_1}{dt}. \quad (2)$$

Если пропустить переменный ток  $I_2$  через контур 2, то, в соответствии с вышеизложенным, в контуре 1 возникнет ЭДС взаимной индукции:

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M_{12} \frac{dI_2}{dt}. \quad (3)$$

Как показывают соответствующие расчеты, коэффициенты взаимной индукции для данной пары контуров равны:

$$M_{21} = M_{12}. \quad (4)$$

## Описание лабораторной установки и метода измерений

Лабораторная установка включает в себя следующие приборы и оборудование: **ФПЭ-05** – кассета, внутри которой помещены две катушки индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  на одной оси; штوك **Ш** со шкалой, показывающей взаимное расположение катушек  $L_1$  и  $L_2$ ; сопротивление  $R = 10^4 \text{ Ом} \pm 5 \%$ ; переключатели  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ ; **ЗГ** – звуковой генератор (генератор звуковой частоты), на панели которого расположен вольтметр; **ЭО** – электронный осциллограф.

Катушка  $L_2$  надета на катушку  $L_1$  и может перемещаться вдоль её оси. Питание катушек ( $L_1$  или  $L_2$ ) осуществляется от генератора **ЗГ**, который вырабатывает напряжение:

$$U = U_0 \cos \omega t. \quad (5)$$

Вольтметр измеряет действующее значение напряжения:

$$U_{\text{действ}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Сопротивление  $R$  подобрано таким образом, что оно многократно превышает активное и индуктивное сопротивления катушек. В этом случае силу переменного тока, протекающего через катушку  $L_1$ , можно определить по формуле:

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \cos \omega t. \quad (7)$$

Ток  $I_1$  создает переменный магнитный поток через катушку 2, в результате чего в ней возникает переменная ЭДС взаимной индукции  $\varepsilon_2$ :

$$\varepsilon_2 = -M_{21} \frac{dI_1}{dt} = M_{21} \frac{U_0}{R} \omega \sin \omega t. \quad (8)$$

Для измерения ЭДС используется осциллограф. Если переменное ЭДС подать на вход осциллографа, то на его экране будет наблюдаться синусоида (см. рис. 2).

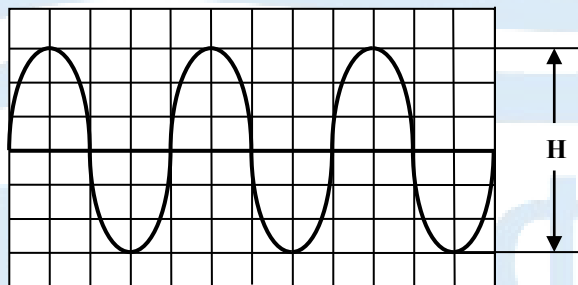


Рис. 2



Измерив в больших делениях шкалы расстояние  $H$  между крайними точками, получим удвоенное значение амплитуды сигнала. Для нахождения амплитуды ЭДС в вольтах требуется разделить значение  $H$  пополам и умножить на цену деления, которая определяется по положению переключателя «V/дел».

Из формулы (8) следует, что амплитуда ЭДС взаимной индукции в катушке 2 равна:

$$\varepsilon_{02} = M_{21} \frac{U_0}{R} \omega = M_{21} \frac{U_0}{R} 2\pi\nu, \quad (9)$$

где  $\nu$  – частота звукового генератора. Из (9) имеем:

$$M_{12} = \frac{\varepsilon_{02} R}{2\pi\nu U_0}. \quad (10)$$

Подав переменное напряжение на катушку 2 (переключатели  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  перебросить в противоположное направление), получим:

$$M_{21} = \frac{\varepsilon_{01} R}{2\pi\nu U_0}. \quad (11)$$

### Порядок выполнения работы

Внешний вид лабораторной установки и электрическая схема показаны на рис. 3 и 3, а.



Рис. 3. Внешний вид лабораторной установки

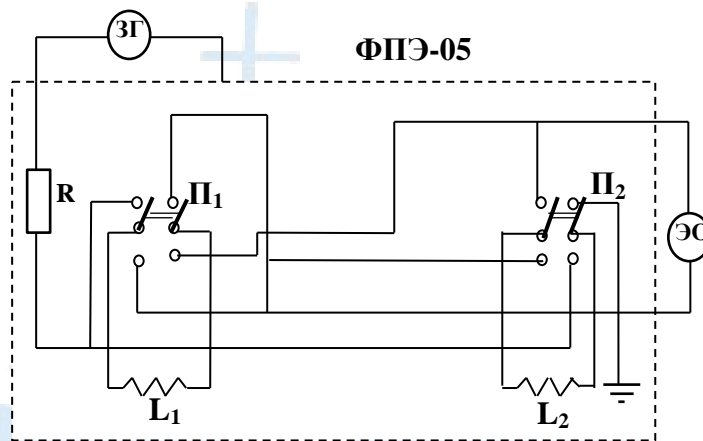


Рис. 3, а. Электрическая схема

**Задание 1. Определение коэффициентов взаимной индукции  $M_{12}$  и  $M_{21}$  при различном взаимном положении катушек 1 и 2**

1. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.
2. Проверить правильность сборки электрической цепи согласно рис. 3, а и представить её на проверку преподавателю или заведующему лабораторией.
3. Ознакомиться с работой электронного осциллографа и звукового генератора.
4. Уяснить порядок переключения сигнала с генератора на катушки.
5. Задать напряжение  $U_{действ}$  на генераторе и частоту сигнала  $\nu$  генератора (по указанию преподавателя), записать их значения в табл. 1.
6. С помощью переключателей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  подать напряжение  $U_{действ}$  на катушку 1 и ЭДС с катушки 2 на осциллограф.
7. Установить подвижную катушку в крайнее положение ( $Z = 0$ ). Перемещая её в противоположное крайнее положение через 1 см, измерять максимальные значения ЭДС взаимной индукции ( $\mathcal{E}_{02}$ ) в цепи второй катушки. Полученные данные занести в табл. 1.
8. Поменять местами катушки 1 и 2, для чего перекинуть переключатели  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . Произвести измерения максимальных значений ЭДС взаимной индукции ( $\mathcal{E}_{01}$ ) согласно пункту 7, данные занести в табл. 1 ( $\mathcal{E}_{01}$ ).

БГАРФ

Таблица 1

$Z, \text{ см}$	$\varepsilon_{02}, \text{ В}$	$M_{21}, \text{ Гн}$	$\varepsilon_{01}, \text{ В}$	$M_{12}, \text{ Гн}$	Параметры
0					$U_{\text{действ}} =$
1					
2					
3					$U_0 =$
4					
5					
6					$\nu =$
7					
8					$R = 10^4 \text{ Ом} \pm 5 \%$
9					
10					

**Задание 2. Определение коэффициентов взаимной индукции  $M_{12}$  ( $M_{21}$ ) при различных значениях амплитуды напряжения**

1. Поставить подвижную катушку в среднее положение.
2. Задать частоту питающего напряжения по указанию преподавателя, записать её значение в табл. 2.
3. Измерять значения амплитуды ЭДС взаимной индукции  $\varepsilon_{02}$  при различных значениях напряжения  $U_{\text{действ}}$  в цепи катушки  $I$  в интервале от **0,5 В** до **5 В** через **0,5 В**. Полученные значения занести в табл. 2.

Таблица 2

$U_{\text{действ}}, \text{ В}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	$\nu =$
$\varepsilon_{02}, \text{ В}$											$R = 10^4 \text{ Ом} \pm 5 \%$
$M_{12}, \text{ Гн}$											

**Задание 3. Определение коэффициентов взаимной индукции  $M_{12}$  ( $M_{21}$ ) при различных частотах питающего напряжения**

1. Поставить подвижную катушку в среднее положение.
2. Задать значение напряжения  $U_{\text{действ}}$  по указанию преподавателя, записать его в табл. 3.

3. Измерять значения амплитуды ЭДС взаимной индукции  $\mathcal{E}_{02}$  при различных частотах звукового генератора от **5 до 30 кГц**, данные занести в табл. 3.

Таблица 3

$\nu$ , кГц	5	8	12	15	18	20	23	25	30	$U_{действ} =$  $R = 10^4 \text{ Ом} \pm 5 \%$
$\mathcal{E}_{02}$ , В										
$M_{12}$ , Гн										

### Обработка полученных результатов

1. По данным, полученным при выполнении задания 1, по формуле (10) определить коэффициенты взаимной индукции  $M_{12}$  и  $M_{21}$  при различном взаимном положении катушек **1** и **2**. Результаты занести в табл. 1.

Построить графики зависимости  $M_{12}$  и  $M_{21}$  как функции координаты **Z**. Убедиться, что коэффициенты взаимной индукции для данной пары контуров в пределах ошибок опыта совпадают.

2. По данным, полученным при выполнении задания 2, по формуле (10) определить коэффициенты взаимной индукции  $M_{12}$  ( $M_{21}$ ) при различных значениях амплитуды питающего напряжения. Результаты занести в табл. 2.

3. По данным, полученным при выполнении задания 3, по формуле (10) определить коэффициенты взаимной индукции  $M_{12}$  ( $M_{21}$ ) при различных значениях частоты питающего напряжения. Результаты занести в табл. 3.

4. Для наибольшего значения  $M_{21}$ , взятого из табл. 3, рассчитать относительную погрешность  $\varepsilon$  как погрешность косвенного измерения и абсолютную погрешность  $\Delta M_{21}$  по формулам:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta \mathcal{E}_0}{\mathcal{E}_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_0}{U_0}\right)^2}. \quad (12)$$

$$\Delta M_{21} = \varepsilon \cdot M_{21}. \quad (13)$$

Принять:  $\Delta \mathcal{E}_0$  как равное цене деления осциллографа;  $\Delta R / R$  – задано;  $\Delta \nu = 0,5 \text{ кГц}$ ;  $\Delta U = 0,2 \text{ В}$ .

## Контрольные вопросы для допуска к работе

1. Укажите на кассете переключатели  $П_1$  и  $П_2$ , а также шток  $Ш$ , для чего они служат?
2. Укажите вольтметр, которым производится измерение величины напряжения, подаваемого на осциллограф.
3. Расскажите, как измеряется ЭДС взаимной индукции?
4. Расскажите порядок выполнения 1, 2 и 3 заданий.

## Контрольные вопросы для сдачи работы

1. В чем состоит явление взаимной индукции?
2. Записать формулу для ЭДС взаимной индукции.
3. Сформулировать закон электромагнитной индукции.
4. Записать формулу для ЭДС электромагнитной индукции.
5. Сформулировать правило Ленца.
6. Какая величина называется магнитным потоком, от чего он зависит? В каких единицах измеряется магнитный поток?
7. Как связаны между собой поток магнитной индукции и сила тока, протекающего через контур?
8. От чего зависит коэффициент взаимной индукции?
9. Где используется явление взаимной индукции?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-8

### Исследование основных характеристик солнечной батареи

**Цель работы:** изучить принцип преобразования солнечной энергии в электрическую. Снять вольт-амперную и световую характеристики солнечной батареи. Получить зависимость мощности от нагрузочного сопротивления. Найти внутреннее сопротивление солнечной батареи.

### Введение

Солнце является основным источником энергии, обеспечивающим существование жизни на Земле. Солнечная энергия, распространяясь в космическом пространстве за счет электромагнитного излуче-



ния, достигает поверхности Земли. Для характеристики солнечного излучения используются следующие величины.

1. Поток излучения – величина, равная энергии, переносимой электромагнитными волнами за одну секунду через произвольную поверхность. Поток излучения измеряется в  $\text{Дж/с} = \text{Вт}$ .

2. Плотность потока излучения – величина, равная отношению потока излучения к площади облучаемой им поверхности, единица измерения –  $\text{Вт/м}^2$ .

3. Световой поток – поток излучения, оцениваемый по его воздействию на человеческий глаз. Единица измерения – люмен ( $\text{лм}$ ).

4. Освещенность – величина, равная отношению светового потока, падающего на поверхность, к площади этой поверхности. Единица измерения – люкс ( $\text{лк}$ ).

В связи с большим потенциалом солнечной энергии стоит вопрос о максимальном ее использовании для нужд людей. При этом самым оптимальным представляется прямое преобразование солнечной энергии в электрическую при помощи солнечных батарей. В фотоэлектрических преобразователях солнечной энергии используется, как правило, кремний с добавками других элементов, образующих структуру с  $p - n$  переходом.

Схема работы полупроводникового фотоэлемента (солнечного элемента) следующая: в  $p$ -слое полупроводника создается дырочная (положительная проводимость) проводимость, а в  $n$ -слое – электронная (отрицательная). На границе слоев возникает потенциальный барьер, препятствующий перемещению электронов и дырок из одного слоя в другой.

Когда на солнечный элемент падает световой поток, фотоны, поглощаясь, создают пары электрон – дырка, которые, подходя к границе слоев, понижают потенциальный барьер. Это дает возможность носителям (электронам и дыркам) беспрепятственно проходить из слоя в слой, при этом в полупроводнике возникает наведенная электродвижущая сила (ЭДС), солнечный элемент становится источником электрической энергии. Солнечные элементы последовательно соединяются в солнечные модули, которые, в свою очередь, параллельно соединяются в солнечные батареи.

Солнечная батарея характеризуется рядом параметров и характеристик, определяющих ее свойства и пределы практической приме-



нимости. К основным из них относятся: нагрузочная вольт-амперная характеристика и световые характеристики солнечной батареи.

Типичная конструкция солнечного элемента показана на рис. 1.

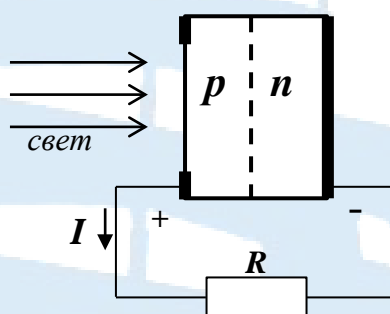


Рис. 1

Нагрузочная вольт-амперная характеристика выражает зависимость тока нагрузки  $I_H$  от напряжения  $U$  на солнечной батарее при включении ее в различные нагрузочные сопротивления  $R_H$ . При снятии вольт-амперной характеристики освещенность  $E$  солнечной батареи остается постоянной:  $I_H = \varphi(U)_{E=const}$ . Вольт-амперная характеристика имеет вид, изображенный на рис. 2.

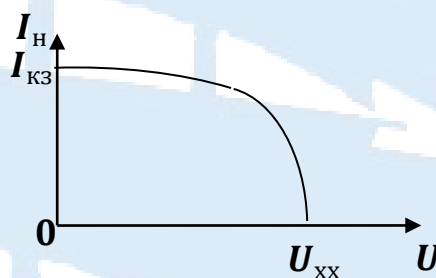


Рис. 2

При  $R_H = 0$  точка, лежащая на оси токов, соответствует току короткого замыкания  $I_{кз}$ . При  $R_H \rightarrow \infty$  точка, лежащая на оси напряжений, соответствует напряжению холостого хода  $U_{хх}$  (фото ЭДС).

Световые характеристики выражают зависимость фото ЭДС, тока короткого замыкания и тока нагрузки, напряжения от освещенности  $E$ . КПД солнечной батареи – это отношение мощности, выделяемой на фотоэлементе при нагрузке, к падающему световому потоку. Значение КПД солнечной батареи определяется потерями энергии, связанными с конструктивными особенностями фотоэлемента, и зависит от режима его работы. Иначе, КПД – это коэффициент преобра-

зования солнечной энергии в электрическую. Кремниевые солнечные элементы имеют коэффициент преобразования 10-15 %.

### Описание лабораторной установки и метода измерений

Внешний вид лабораторной установки показан на рис. 3. Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 3, а.



Рис. 3. Внешний вид лабораторной установки

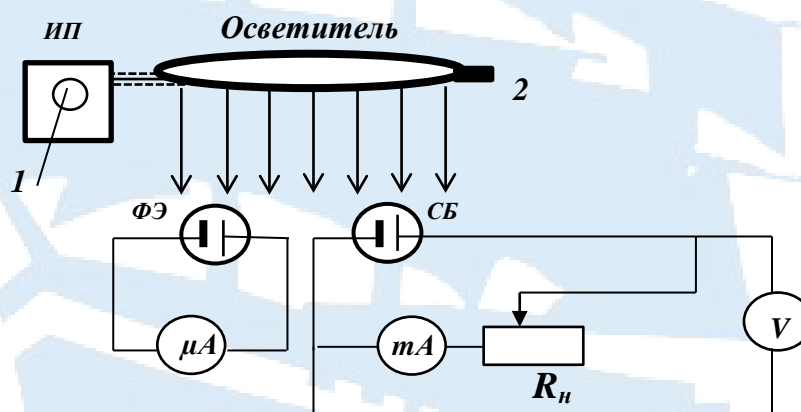


Рис. 3, а. Электрическая схема

Источником света служит лампа накаливания (12 В, 30 Вт), питаемая через понижающий трансформатор (ИП) от сети 220 В. Поток излучения от осветителя одновременно падает на фотоэлемент (ФЭ) и на солнечную батарею (СБ). Величину потока излучения можно регулировать регулятором интенсивности светового пучка (I) и регулятором выходного отверстия осветителя (2).

Ток в цепи фотоэлемента измеряется микроамперметром ( $\mu A$ ), в цепи с солнечной батареей – миллиамперметром ( $mA$ ). В этой цепи также имеется вольтметр ( $V$ ) для измерения напряжения и переменное нагрузочное сопротивление ( $R_n$ ), представляющее собой магазин сопротивлений.

Измеряя ток и напряжение в цепи при неизменной освещенности  $E$  и различных нагрузочных сопротивлениях  $R_n$ , снимаем нагрузочную вольт-амперную характеристику:  $I_n = \varphi(U)_{E=const}$ . Зная ток и напряжение, можно найти электрическую мощность:  $P = I_n U$ .

Поскольку фототок на фотоэлементе пропорционален освещенности, то, меняя освещенность фотоэлемента, а соответственно и солнечной батареи при помощи регулятора интенсивности светового пучка и регулятора выходного отверстия осветителя, можно снять световые характеристики солнечной батареи: зависимость фото ЭДС, а также тока короткого замыкания, тока нагрузки, напряжения от освещенности при определенном значении нагрузочного сопротивления.

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.
2. Проверить правильность сборки электрической цепи согласно рис. 3, а и представить её на проверку преподавателю или заведующему лабораторией.
3. Убедиться, что миллиамперметр установлен на предел измерения силы тока **-2 mA**; а вольтметр – на предел измерения напряжения **-2 В**. Включить сеть, источник питания, миллиамперметр и вольтметр.
4. Выставить при помощи регулятора на источнике питания максимальную интенсивность света, при этом микроамперметр в цепи фотоэлемента должен показывать **100 мкА**.
5. Снять нагрузочную вольт-амперную характеристику. Для этого при постоянной освещенности (максимальной) измерять величину тока  $I_n$  и величину напряжения  $U$  при изменении сопротивления  $R_n$  от 1 до 30 кОм. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

$R_n$ , кОм	$I_H$ , mA		$U$ , В		$P$ , mВт	
	$E=E_0$	$E=0,5E_0$	$E=E_0$	$E=0,5E_0$	$E=E_0$	$E=0,5E_0$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
15						
20						
25						
30						

6. Аналогичные измерения повторить при освещенности солнечного элемента в 2 раза меньшей. Для этого ток в цепи фотоэлемента установить равным **50 мкА**. Данные занести в табл. 1.

7. Исследовать световую характеристику:  $\varepsilon_\phi = \varphi(E)$ , где  $\varepsilon_\phi$  – фото ЭДС. Для этого отключить магазин сопротивлений и миллиамперметр от цепи. Уменьшая освещенность  $E$  солнечной батареи (при помощи регулятора интенсивности светового пучка и регулятора выходного отверстия осветителя) так, чтобы показания микроамперметра в цепи фотоэлемента уменьшались на **10 мкА**, что соответствует уменьшению освещенности на 10 %, вольтметром измерять фото ЭДС. Результаты занести в табл. 2.

8. Выключить осветитель, миллиамперметр и вольтметр, сеть.

Таблица 2

$E, \%$	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
$\varepsilon_\phi$ , В										

### Обработка результатов измерений

1. Зная ток и напряжение в цепи солнечной батареи, найти мощность  $P = I_H U$  для освещенностей 100 % и 50 %. Результаты занести в табл. 1.

2. По данным табл. 1 построить вольт-амперную характеристику:  $I_H = \varphi(U)_{E=const}$  для освещенностей 100 % и 50 %. Из графика найти ток короткого замыкания  $I_{кз}$  и напряжение холостого хода  $U_{хх}$ . Полученные данные занести в табл. 3.

3. Построить график зависимости мощности батареи от нагрузочного сопротивления:  $P = \varphi(R_H)_{E=const}$  для освещенностей 100 % и 50 %. Из графика найти максимальную мощность и внутреннее сопротивление солнечной батареи  $r_{вн}$ , используя положение, что мощность батареи максимальна при равенстве внутреннего и внешнего сопротивлений. Полученные значения  $P_{max}$  и  $r_{вн}$  занести в табл. 3.

Таблица 3

$I_{кз}, mA$		$U_{хх}, B$		$P_{max}, mBm$		$r_{вн}, kOm$	
$E=E_0$	$E=0,5E_0$	$E=E_0$	$E=0,5E_0$	$E=E_0$	$E=0,5E_0$	$E=E_0$	$E=0,5E_0$

4. По данным табл. 2 построить световую характеристику батареи:  $\epsilon_\phi = \varphi(E)$ . Величину освещенности откладывать в процентах.

### Контрольные вопросы для допуска к работе

1. Перечислите, какие приборы и оборудование входят в лабораторную установку.
2. Для чего в работе используется фотоэлемент?
3. Какие характеристики солнечной батареи снимаются в работе?
4. Как определяется максимальная мощность солнечной батареи и ее внутреннее сопротивление?
5. На какие пределы измерения должны быть установлены миллиамперметр и вольтметр в цепи батареи?
6. Как регулируется освещенность солнечной батареи?
7. В каких пределах меняется нагрузочное сопротивление?

### Контрольные вопросы для сдачи работы

1. Принцип работы полупроводникового кремниевого фотоэлемента.
2. Ток короткого замыкания. Как из экспериментальных данных найти ток короткого замыкания?
3. Фото ЭДС. Как из экспериментальных данных найти фото ЭДС?



4. Как из экспериментальных данных найти внутреннее сопротивление солнечной батареи?
5. Докажите, что при максимальной мощности внутреннее сопротивление равно нагрузочному сопротивлению.
6. Каков КПД солнечной батареи?
7. Как возникает фото ЭДС на *p-n* переходе?
8. Основные характеристики солнечной батареи, способы их определения.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-9

### Исследование магнитных свойств ферромагнетиков, изучение гистерезиса ферромагнитных материалов

**Цель работы:** снять основную кривую намагничивания; изучить гистерезис ферромагнитных материалов; вычислить основные характеристики ферромагнетиков; найти: работу по перемагничиванию ферромагнетика, остаточную намагниченность, величину коэрцитивной силы и магнитную проницаемость.

#### Введение

Все вещества обладают магнитными свойствами, то есть являются **магнетиками**. Магнитные свойства веществ определяются величиной и ориентацией магнитных моментов атомов (молекул), которые, в свою очередь, определяются орбитальными магнитными моментами всех электронов данного атома.

По представлениям классической физики, электрон в атоме движется по круговой орбите, образуя **орбитальный ток**  $I_{orb}$ :

$$I_{orb} = \frac{e}{T} = e \nu = \frac{eV}{2\pi r}, \quad (1)$$

здесь  $e$  – элементарный заряд;  $\nu$  – частота обращения электрона по орбите радиуса  $r$  со скоростью  $V$ .

Токи, обусловленные движением электронов в атомах (молекулах), называют **микротоками** или **молекулярными токами**.

Орбитальному току  $I_{orb}$  соответствует **орбитальный магнитный момент электрона**  $\vec{P}_m$ , модуль которого определяется следующим образом:



$$p_m = I S = I \pi r^2 = \frac{eVr}{2}. \quad (2)$$

Орбитальным магнитным моментом атома называется вектор  $\vec{P}_a$ , который равен геометрической сумме орбитальных магнитных моментов всех электронов атома:

$$\vec{P}_a = \sum_{i=1}^n \vec{P}_{mi} \quad (3)$$

Внесём атом в магнитное поле с индукцией  $\vec{B}_0$ . Если орбита электрона ориентирована относительно вектора  $\vec{B}_0$  произвольным образом, составляя с ним угол  $\alpha$ , то она приходит в такое движение вокруг  $\vec{B}_0$ , при котором вектор магнитного момента электрона  $\vec{p}_m$ , сохраняя постоянным угол  $\alpha$ , вращается вокруг вектора  $\vec{B}_0$  с некоторой угловой скоростью  $\vec{\omega}_L$  (см. рис. 1).

Такое движение называется **прецессией Лармора**, а  $\vec{\omega}_L$  – угловой скоростью прецессии. Вследствие прецессии Лармора появляется дополнительный **орбитальный ток**  $\Delta I_{orb}$ , которому соответствует наведенный орбитальный магнитный момент электрона  $\Delta \vec{p}_m$  (рис. 1).

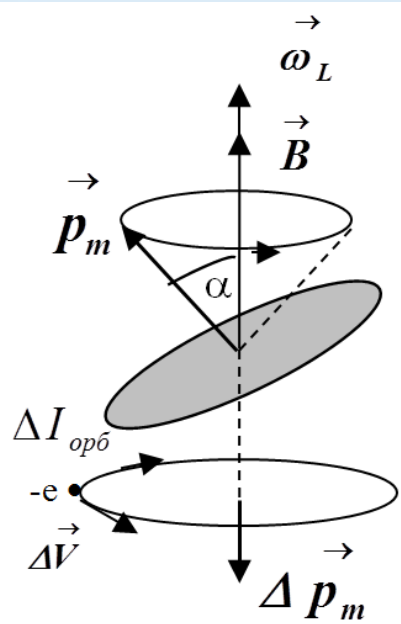


Рис. 1

Общий наведенный орбитальный момент атома равен:

$$\Delta \vec{P} = \sum_{i=1}^n \Delta \vec{P}_{mi} . \quad (4)$$

Вектор  $\Delta \vec{P}$  противоположен вектору  $\vec{B}_0$  по направлению. Наведенные составляющие магнитных полей атомов (молекул) складываются и образуют собственное магнитное поле вещества, ослабляющее внешнее магнитное поле. Этот эффект получил название **диамагнитного эффекта**. Диамагнетизм свойствен всем веществам.

Итак, вещества, внесенные в магнитное поле, намагничиваются. Для количественного описания намагничивания магнетиков вводят векторную величину  $\vec{J}$  – **намагниченность**, которая определяется магнитным моментом единицы объёма магнетика:

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_{ma}}{\Delta V} = \frac{\sum \vec{P}_a}{\Delta V} , \quad (5)$$

здесь  $\vec{P}_{ma}$  – магнитный момент магнетика, равный векторной сумме магнитных моментов отдельных атомов (молекул).

По своим магнитным свойствам магнетики делятся на три основные группы: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики. К диамагнетикам относятся вещества, **магнитные моменты атомов (молекул) которых, в отсутствие внешнего магнитного поля равны нулю**. При внесении диамагнетика во внешнее магнитное поле атомы (молекулы) вещества приобретают наведенные магнитные моменты  $\Delta \vec{P}$ , т. е. образуют собственное магнитное поле. Наведенные магнитные моменты  $\Delta \vec{P}$  пропорциональны вектору  $\vec{B}$  и противоположны ему по направлению. Итак, **диамагнетики** – это вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении, противоположном направлению вектора магнитной индукции  $\vec{B}_0$ .

**У парамагнетиков атомы (молекулы) обладают собственным магнитным моментом  $\vec{P}_a$** . В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов  $\vec{P}_a$  ориентированы совершенно беспорядочно вследствие теплового движения атомов (молекул). При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле устанавливается преиму-

ществленная ориентация магнитных моментов атомов (молекул) вещества по направлению вектора  $\vec{B}_0$ , т. е. возникает собственное магнитное поле. Итак, **парамагнетики** – это вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле по направлению вектора  $\vec{B}_0$ .

В результате намагничивания магнетиков результирующее магнитное поле в веществе  $\vec{B}$  будет равно сумме магнитных индукций внешнего магнитного поля  $\vec{B}_0$  и поля  $\vec{B}'$ , созданного микротоками (молекулярными токами):

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' . \quad (6)$$

Видно, что вектор  $\vec{B}$  зависит от  $\vec{B}'$ , т. е. от магнитных свойств магнетика.

Введем вектор  $\vec{H}$ , который называется **напряженностью магнитного поля**, он определяется следующим образом:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} . \quad (7)$$

Как показывает опыт, намагниченность  $\vec{J}$  прямо пропорциональна напряженности  $\vec{H}$  магнитного поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H} , \quad (8)$$

здесь  $\chi$  – безразмерная величина, называемая **магнитной восприимчивостью вещества**. Для диамагнетиков  $\chi$  – отрицательная величина, для парамагнетиков  $\chi$  – положительна. Абсолютное значение магнитной восприимчивости для диамагнетиков и парамагнетиков мало – порядка  $10^{-4}$ - $10^{-6}$ .

Подставив (8) в (7), получим:

$$\vec{H}(1 + \chi) = \frac{\vec{B}}{\mu_0} . \quad (9)$$

Введем величину:  $\mu = 1 + \chi$ , которая называется **магнитной проницаемостью вещества**. Тогда:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}) . \quad \mu = \frac{B}{\mu_0 H} . \quad (10)$$

Помимо диамагнетиков и парамагнетиков, называемых слабомагнитными веществами ( $\mu \approx 1$ ), существуют сильномагнитные вещества – ферромагнетики, у которых магнитное поле  $\vec{B}$  может в сотни и тысячи раз превосходить внешнее магнитное поле  $\vec{B}_0$ . **Ферромагнетики** – это кристаллические вещества, обладающие спонтанной (самопроизвольной) намагниченностью, следовательно, они намагничены даже при отсутствии внешнего магнитного поля.

В квантовой теории ферромагнетизма показано, что ответственными за магнитные свойства ферромагнетиков являются спиновые (собственные) магнитные моменты электронов. При определенных условиях в кристаллах возникают обменные силы, которые заставляют магнитные моменты электронов, а, соответственно, и магнитные моменты атомов выстраиваться параллельно друг другу. В результате возникают области спонтанного (самопроизвольного) намагничивания, которые называются **доменами**. Размеры доменов составляют  $10^{-4}$ - $10^{-6}$  м. Домены обладают магнитными моментами  $\vec{P}_{дом}$ . При отсутствии внешнего магнитного поля магнитный момент ферромагнетика  $\vec{P}_\phi$  равен нулю, так как магнитные моменты доменов ориентированы хаотически. Внешнее магнитное поле ориентирует по полю магнитные моменты не отдельных атомов, а магнитные моменты доменов. Поэтому с ростом напряженности внешнего магнитного поля  $\vec{H}$  намагниченность  $\vec{J}$  растет очень быстро.

Если для слабомагнитных веществ зависимость  $\vec{J}$  от  $\vec{H}$  является линейной, то для ферромагнетиков она имеет более сложный вид (см. рис. 2). Кривая  $\vec{J} = \varphi(\vec{H})$  или  $\vec{B} = \varphi(\vec{H})$  называется основной кривой намагничивания.

При  $\vec{J} = \vec{J}_{нас}$  все магнитные моменты доменов ориентированы по полю, в результате наступает магнитное насыщение.

Магнитная индукция  $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J})$  с увеличением  $\vec{H}$  быстро растет, вследствие роста  $\vec{J}$ , а затем увеличивается по линейному закону (см. рис. 3).

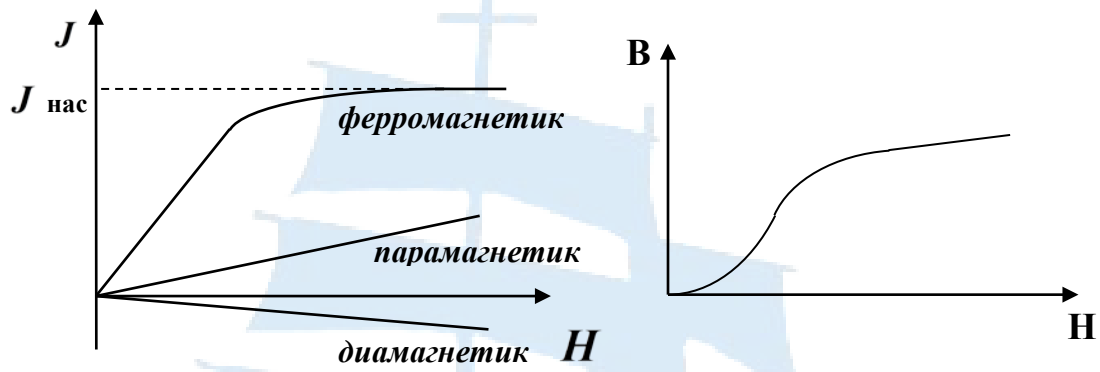


Рис. 2

Рис. 3

Существенная особенность ферромагнетиков – не только большие значения магнитной проницаемости  $\mu = (10^3-10^6)$ , но и сложная зависимость  $\mu = \varphi(H)$  (см. рис. 4). Как видно из рисунка, при больших значениях  $\vec{H}$  магнитная проницаемость  $\mu$  стремится к 1.

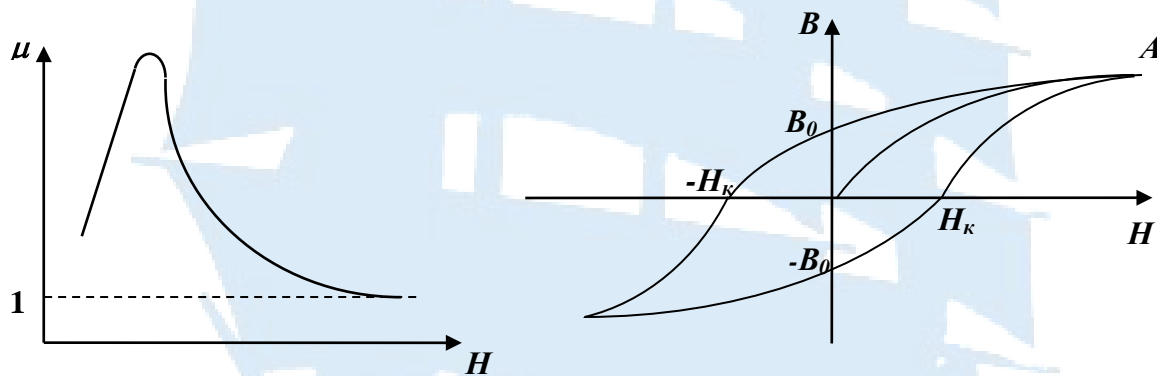


Рис. 4

Рис. 5

Значения  $\vec{J}$  и  $\vec{B}$  зависят от предшествующего состояния ферромагнетика (зависимость от предыстории), что приводит к явлению **гистерезиса**. При циклических изменениях величины и направления напряженности внешнего магнитного поля  $\vec{H}$  эта зависимость характеризуется кривой, называемой петлей гистерезиса (рис. 5).

Пусть ферромагнетик полностью размагничен. Во внешнем магнитном поле, напряженность которого  $H$  увеличивается, индукция  $B$  возрастает по **основной кривой намагничивания**  $OA$  до точки  $A$  (рис. 5). Если затем уменьшать  $H$ , то индукция  $B$  уменьшается по кривой  $AB_0$ . При  $H = 0$  индукция равна  $B_0$  – **остаточное намагничивание**. Индукция  $B$  обращается в ноль только в размагничивающем магнитном поле, напряженность которого равна  $-H_K$ . Величина  $H_K$



называется **коэрцитивной силой**. В зависимости от  $H_k$  различают мягкие ферромагнетики: ( $H_k \approx 1-10 \text{ А/м}$ ) и жесткие: ( $H_k \approx 10^4-10^5 \text{ А/м}$ ).

### Описание лабораторной установки и метода измерений

Внешний вид лабораторной установки и электрическая схема приведены на рис. 6 и 6, а. Она состоит из кассеты **ФПЭ – 07**, звукового генератора **ЗГ**, электронного осциллографа **ЭО**.

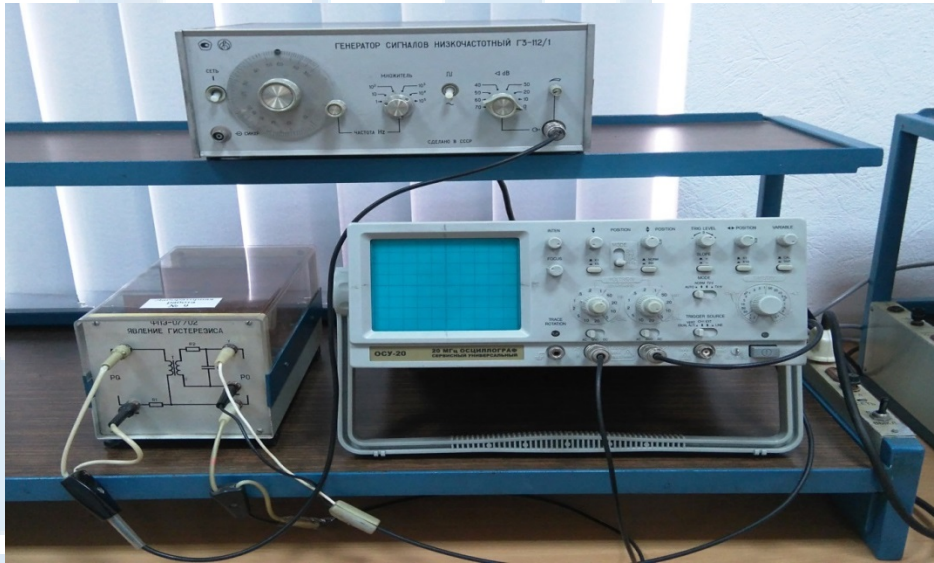


Рис. 6. Внешний вид лабораторной установки

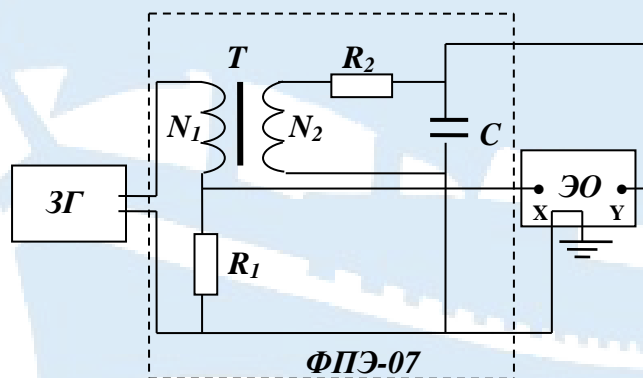


Рис. 6, а. Электрическая схема

Исследуемый образец, находящийся внутри кассеты, выполнен в виде тороидального трансформатора **T**, первичная обмотка которого содержит  $N_1 = 200$  витков, а вторичная обмотка –  $N_2 = 50$  витков. Напряжение на первичную обмотку трансформатора подается с выхода звукового генератора через сопротивление  $R_1 = 100 \text{ Ом} \pm 5 \%$ .

Вторичная обмотка трансформатора последовательно соединена с сопротивлением  $R_2 = 24 \text{ кОм} \pm 5 \%$  и конденсатором  $C = 0,22 \text{ мкФ} \pm 5 \%$ . С сопротивления  $R_1$  на вход усилителя горизонтального отклонения «Х» осциллографа  $PO$  подается напряжение  $U_x$ , пропорциональное напряженности магнитного поля  $H$ :

$$U_x = \frac{2\pi r_T R_1}{N_1} H, \quad (11)$$

здесь  $r_T$  – радиус обмотки тороида:  $r_T = \frac{r_1 + r_2}{2}$ , где  $r_1 = 15,5 \text{ мм}$  и  $r_2 = 9,25 \text{ мм}$  – внешний и внутренний радиусы тороида.

На вертикальный вход «Y» с конденсатора  $C$  подается напряжение  $U_y$ , пропорциональное индукции магнитного поля  $B$ :

$$U_y = \frac{N_2 S_T}{R_2 C} B, \quad (12)$$

здесь  $S_T$  – площадь поперечного сечения тороида:

$$S_T = (r_1 - r_2) b, \quad (13)$$

где  $b = 7 \text{ мм}$  – толщина тороида.

Подав одновременно напряжения  $U_x$  и  $U_y$  на горизонтально и вертикально отклоняющие пластины осциллографа, получим на экране петлю гистерезиса.

Напряжения  $U_x$  и  $U_y$  определяются по отклонению электронного луча на экране осциллографа:

$$U_x = k_x x; \quad U_y = k_y y. \quad (14)$$

Здесь  $k_x$  и  $k_y$  – цена деления, которая определяется по положению переключателя « $V_x/\text{дел}$ » и « $V_y/\text{дел}$ » на панели осциллографа,  $x$  и  $y$  – число больших делений шкалы экрана осциллографа.

Из выражений (11), (12), (14) имеем для напряженности  $H$ :

$$H = \frac{N_1 k_x x}{2\pi R_1 r_T} \quad (15)$$

и для индукции  $B$ :

$$B = \frac{R_2 C k_y y}{N_2 S_T}. \quad (16)$$

По площади петли гистерезиса можно найти работу по перемагничиванию ферромагнетика  $A$ , которая расходуется на изменение его

внутренней энергии. Соответствующие расчеты дают следующее выражение для **работы по перемагничиванию, отнесенной к единице объёма ферромагнетика**:

$$A_v = \frac{N_1 R_2 C k_x k_y}{2\pi r_T R_1 N_2 S_T} S_{петли} \quad (17)$$

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.
2. Ознакомиться с описанием лабораторной установки и методом измерений.
3. Ознакомиться с работой звукового генератора и электронного осциллографа в режиме наблюдений фигур Лиссажу.
4. Проверить правильность сборки электрической цепи согласно рис. 6, а и представить её на проверку преподавателю или заведующему лабораторией.
5. С разрешения преподавателя или заведующего лабораторией включить лабораторный стенд и приборы и дать им прогреться в течение **5 мин.**
6. Установить следующие параметры выходного сигнала генератора: частоту – по заданию преподавателя, выходное напряжение – **0 В.**
7. Вырезать кальку по размеру экрана осциллографа.
8. Установить луч в центре экрана, затем, регулируя величину выходного напряжения, установить максимальную петлю гистерезиса, скопировать её на кальку. По положению переключателя « $V_x/\text{дел}$ » и « $V_y/\text{дел}$ » на панели осциллографа определить  $K_x$  и  $K_y$ .
9. Уменьшая величину выходного напряжения, получить семейство петель гистерезиса – не менее **5** петель. Для каждой петли снять координаты « $x$ » и « $y$ » её вершины. Все экспериментальные данные записать в табл. 1. Координаты « $x$ » и « $y$ » записываются в больших делениях шкалы экрана осциллографа.

Таблица 1

$N$	$x$ , дел	$K_x$ , $V_x/\text{дел}$	$H$ , А/м	$y$ , дел	$K_y$ , $V_y/\text{дел}$	$B$ , Тл	$\mu$	$r_T$ , м	$S_T$ , $\text{м}^2$
1									
2									
3									
4									
5									

10. Установить максимальную петлю гистерезиса. Для этой петли записать координату « $x_k$ », соответствующую коэрцитивной силе  $H_k$  и координату « $y_{ост}$ », соответствующую остаточной намагниченности  $B_o$ . Данные занести в табл. 2.

Таблица 2

$x_k, \text{ дел}$	$H_k, \text{ А/м}$	$y_{ост}, \text{ дел}$	$B_{ост}, \text{ Тл}$	$S_{петли}, \text{ дел}^2$	$A_V, \text{ Дж/м}^3$

### Обработка результатов измерений

1. Зная данные лабораторной установки, определить  $r_T$  – радиус обмотки тороида и  $S_T$  – площадь поперечного сечения тороида.
2. По формулам (15) и (16) вычислить значения напряженности  $H$  и индукции  $B$  вершин каждой петли гистерезиса и записать их в табл. 1.
3. Изобразить графически основную кривую намагничивания в координатах  $B = \varphi(H)$ .
4. Зная значения  $H$  и  $B$ , для каждой петли найти магнитную проницаемость  $\mu$  по формуле (10), данные записать в табл. 1.
5. Построить график функции:  $\mu = \varphi(H)$ .
6. По измеренным величинам  $x_k$  и  $y_{ост}$ , используя формулы (15) и (16), найти значения коэрцитивной силы  $H_k$  и остаточной намагниченности  $B_o$ . Результаты занести в табл. 2.
7. Максимальную петлю, зарисованную на кальке, скопировать на миллиметровую бумагу и подсчитать её площадь –  $S_{петли}$  (в делениях).
8. По формуле (17) определить работу  $A_V$  по перемагничиванию ферромагнетика за один цикл, отнесенную к единице объёма. Полученные значения площади и работы записать в табл. 2.

### Контрольные вопросы для допуска к работе

1. Каково назначение звукового генератора и электронного осциллографа в данной работе?
2. Укажите, где находится ферромагнетик?
3. Какие измерения необходимо произвести в ходе работы?
4. Как определяется цена деления  $K_x$  и  $K_y$ ?
5. Нарисуйте график  $B = f(H)$  для ферромагнетиков.

6. Какую величину надо изменять, чтобы получить семейство петель гистерезиса?

7. Как определяется площадь петли гистерезиса? Для каких целей она определяется?

### **Контрольные вопросы для сдачи работы**

1. Что называется орбитальным магнитным моментом электрона, атома?

2. Как влияет внешнее магнитное поле на движение электронов в атомах вещества?

3. Какие вещества называются диамагнетиками? Объяснить механизм их намагничивания.

4. Что называется диамагнитным эффектом? Объяснить возникновение диамагнитного эффекта.

5. Какие вещества называются парамагнетиками? Объяснить механизм их намагничивания. Присущ ли парамагнетикам диамагнитный эффект?

6. Какая величина называется намагниченностью магнетика, единица её измерения?

7. Какая величина называется напряженностью магнитного поля, единица её измерения?

8. Как связаны между собой магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость вещества, их численные значения для диамагнетиков и парамагнетиков?

9. Какие вещества называются ферромагнетиками?

10. Что называется доменом? Объяснить механизм намагничивания ферромагнетиков.

11. Перечислите основные свойства ферромагнетиков.

12. Что называется гистерезисом? Какова причина его возникновения?

13. Что такое коэрцитивная сила, единица её измерения?

14. Как ведут себя домены при увеличении внешнего магнитного поля? Почему возникает насыщение?

15. Почему возникает остаточная намагниченность (индукция)?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-10

### Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

**Цель работы:** определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в Калининграде.

#### Введение

В любой точке пространства, окружающего Землю, и на её поверхности обнаруживается действие магнитных сил, т. е. в этом пространстве имеется магнитное поле – **магнитное поле Земли**. Это поле в основном обусловлено процессами, протекающими в жидком металлическом ядре Земли.

Существование магнитного поля в любой точке Земли можно установить с помощью магнитной стрелки. Если подвесить магнитную стрелку на нити так, чтобы точка подвеса совпадала с центром тяжести стрелки, то стрелка устанавливается по направлению касательной к силовой линии магнитного поля Земли.

Магнитные полюсы Земли не совпадают с её географическими полюсами. Северный магнитный полюс находится вблизи южного географического полюса Земли, а южный магнитный полюс – вблизи северного географического полюса. Угол между осью вращения Земли и линией, соединяющей её магнитные полюса, составляет  $11,5^\circ$ . В северном полушарии южный конец магнитной стрелки будет наклонен к поверхности Земли и стрелка составит с горизонтом угол  $\theta$ , называемый **углом наклона** (на экваторе угол наклона равен нулю). Вертикальная плоскость, проходящая через линию, соединяющую полюса магнитной стрелки, есть плоскость **магнитного меридиана**.

Все плоскости магнитных меридианов Земли пересекаются на одной прямой, а следы магнитных меридианов на поверхности Земли сходятся в северном и южном магнитных полюсах.

Поскольку магнитные полюса не совпадают с географическими полюсами, то магнитная стрелка отклонена от географического меридиана. Угол  $\alpha$  между магнитным и географическим меридианами называется магнитным склонением. Разложим вектор напряженности магнитного поля Земли  $\vec{H}_z$  на две составляющие: горизонтальную –

$\vec{H}_Г$  и вертикальную –  $\vec{H}_В$ . Если магнитная стрелка может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, то она будет устанавливаться под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли  $\vec{H}_Г$  в плоскости магнитного меридиана.

Знание углов склонения  $\alpha$  и наклонения  $\theta$ , а также горизонтальной составляющей  $\vec{H}_Г$  дают возможность определить величину и направление полной напряженности магнитного поля Земли в данной точке. **Индукция магнитного поля Земли на экваторе имеет значение  $4,2 \cdot 10^{-5}$  Тл, на полюсе –  $7,0 \cdot 10^{-5}$  Тл.**

В 1820 г. Эрстед установил, что при прохождении по проводнику электрического тока вокруг проводника возникает магнитное поле, действующее на помещенную в это поле магнитную стрелку. Основными характеристиками магнитного поля являются напряженность и индукция. Для вычисления напряженности (индукции) магнитного поля используют закон Био-Савара-Лапласа, согласно которому напряженность поля  $d\vec{H}$ , создаваемая элементом проводника с током  $I d\vec{l}$  в некоторой точке  $A$  пространства, находящейся на расстоянии  $\vec{r}$  от него, определяется выражением (см. рис. 1):

$$d\vec{H} = \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}. \quad (1)$$

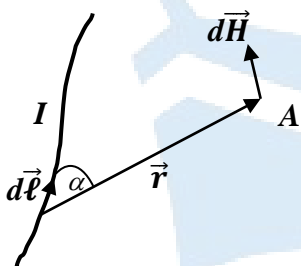


Рис. 1

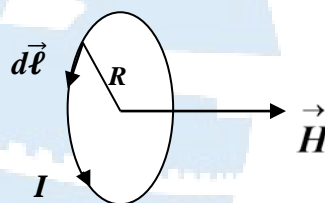


Рис. 2

Для нахождения результирующей напряженности, создаваемой проводником с током конечных размеров, надо воспользоваться принципом суперпозиции магнитных полей:

$$\vec{H} = \sum_{i=1}^n \vec{H}_i. \quad (2)$$

В пределе формула (2) записывается следующим образом:

$$\vec{H} = \int_l d\vec{H}. \quad (3)$$

В скалярном виде формула (1) имеет вид:

$$dH = \frac{I dl}{4\pi r^2} \sin \alpha, \quad (4)$$

здесь  $\alpha$  – угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ .

Применим формулу (4) для вычисления магнитного поля в центре круглого витка радиусом  $R$ , по которому течет ток (круговой ток). Как следует из рис. 2, все элементы кругового тока создают в центре магнитные поля одинакового направления – вдоль нормали от витка в соответствии с правилом правого винта. Так как все элементы проводника перпендикулярны радиусу витка ( $\sin \alpha = 1$ ) и расстояние от всех элементов проводника до центра кругового тока одинаково и равно  $R$ , то, согласно (4):

$$dH = \frac{I dl}{4\pi R^2}. \quad (5)$$

Тогда, по формуле (3):

$$H = \int_l dH = \frac{I}{4\pi R^2} \int dl = \frac{I}{4\pi R^2} 2\pi R = \frac{I}{2R}. \quad (6)$$

### Описание лабораторной установки и метода измерений

Возьмем проволочный круговой виток радиуса  $R$ , плоскость которого вертикальна, и поместим в его центре магнитную стрелку. Повернем виток так, чтобы ось стрелки совпала с его плоскостью (рис. 3). Это означает, что плоскость магнитного меридиана совпадает с плоскостью витка.

Ток, проходящий через виток, создает магнитное поле  $\vec{H}$ , вектор которого перпендикулярен вектору горизонтальной составляющей  $\vec{H}_g$  магнитного поля Земли. В результате действия полей  $\vec{H}$  и  $\vec{H}_g$  стрелка повернется на некоторый угол  $\beta$  и установится в направлении результирующего поля  $\vec{H}_p$ .

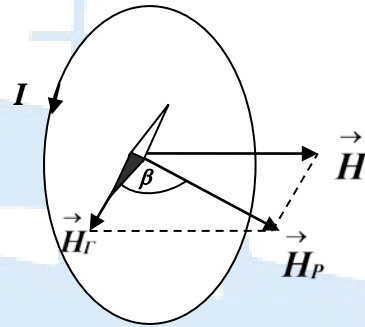


Рис. 3

Если вычислить  $\mathbf{H}$  по формуле (6) и измерить угол поворота стрелки  $\beta$ , то можно найти горизонтальную составляющую магнитного поля Земли в месте проведения опыта, (см. рис. 3):

$$H_r = \frac{H}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (7)$$

На практике, поскольку поле одного кругового тока мало, берут несколько витков. Если число витков  $N$ , то, с учетом выражений (6) и (7) получим:

$$H_r = \frac{I N}{2R \operatorname{tg} \beta}. \quad (8)$$

Выражение (8) получено в предположении, что стрелка находится в центре витка. Всякая же стрелка имеет конечные размеры, поэтому формула (8) выполняется лишь приближенно, степень приближения зависит от отношения размеров стрелки к радиусу витка. Кроме этого, на точность измерений влияют предметы из ферромагнитных материалов.

Лабораторная установка, применяемая в данной работе, состоит из тангенс-гальванометра  $T-G$ , блока питания  $\mathcal{E}$ , реостата  $R$ , амперметра  $A$  переключателя  $\Pi$  (см. рис. 4). Тангенс-гальванометр представляет собой несколько плотно прилегающих друг к другу витков кругового проводника, расположенных вертикально в плоскости магнитного меридиана. В центре витка помещена магнитная стрелка, способная вращаться вокруг вертикальной оси в горизонтальной плоскости.



Рис. 4. Внешний вид лабораторной установки

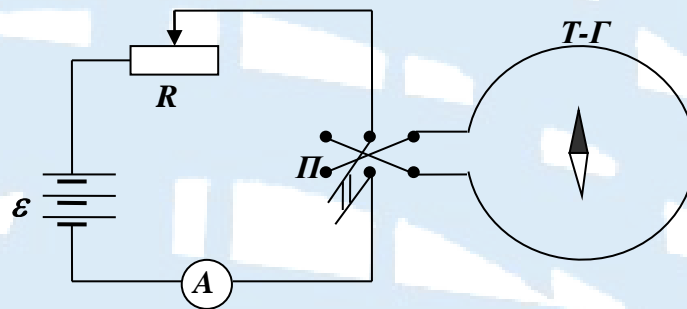


Рис. 4, а. Электрическая схема

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.
2. Проверить правильность сборки электрической цепи согласно рис. 4, а и представить её на проверку преподавателю или заведующему лабораторией. Переключатель **П** должен быть разомкнут.
3. Включить блок питания  $\varepsilon$  в сеть и установить напряжение по заданию преподавателя.
4. Установить витки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана Земли (по направлению магнитной стрелки).
5. Замкнуть цепь, при помощи реостата **R** подобрать такой ток, чтобы угол отклонения магнитной стрелки  $\beta'$  был примерно  $40^\circ$ .
6. С помощью переключателя **П** изменить направление тока в витках катушки на противоположное. Снова определить угол откло-



нения магнитной стрелки –  $\beta''$ , величину тока при этом не менять. Значения силы тока  $I$ , углов  $\beta'$  и  $\beta''$  записать в таблицу.

Таблица

$N_0$ $n/n$	$I$ , А	$\beta_i'$	$\beta_i''$	$\langle \beta_i \rangle$	$\operatorname{tg} \beta_i$	$H_{Gi}$ , А/м	$\langle H_G \rangle$ , А/м	$\Delta H_G$ , А/м	$B_G$ , Тл
1									
2									
3									
4									
5									

7. Операции, указанные в пунктах 4 и 5, повторить еще четыре раза, подбирая каждый раз такой ток, чтобы магнитная стрелка отклонялась больше предыдущего на  $5^0$ . Значения токов и углов отклонения стрелки записать в таблицу.

### Обработка результатов измерений

1. Вычислить пять раз значения  $H_{Gi}$  по формуле (8).
2. Найти среднее значение  $H_G$ . Сравнить полученное значение с горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в Калининграде. Зная  $H_G$ , найти значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля  $B_G$ . Полученные данные записать в таблицу.
3. Найти ошибку в определении  $H_G$ . Расчет погрешности выполнить как для прямого измерения.

### Контрольные вопросы для допуска к работе

1. Какова цель работы?
2. Какие приборы используются в данной работе? Каково их назначение? Для чего нужен переключатель  $\Pi$ ?
3. Почему перед выполнением работы необходимо установить витки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана Земли?
4. Почему при включении тока магнитная стрелка тангенс-гальванометра отклоняется на некоторый угол?
5. Какие величины измеряются в работе?

## Контрольные вопросы для сдачи работы

1. Записать закон Био-Савара-Лапласа для напряженности и индукции магнитного поля в векторном и скалярном видах.
2. Вывести формулу для определения напряженности магнитного поля в центре кругового тока.
3. Вывести формулу для определения напряженности магнитного поля на оси кругового тока.
4. Как определяется направление вектора напряженности в центре и на оси кругового тока?
5. Дайте определения углов магнитного склонения и магнитного наклона. Чему равен угол магнитного наклона на экваторе?
6. Как можно обнаружить магнитное поле в рассматриваемой области пространства?
7. Введите понятие линии магнитной индукции, потока вектора магнитной индукции.
8. Сформулируйте теорему Гаусса для магнитного поля. Каков характер магнитного поля?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-11

### Определение работы выхода электрона из металла

**Цель работы:** построение и изучение вольт-амперной характеристики диода; исследование зависимости плотности тока насыщения при термоэмиссии от температуры катода; определение работы выхода электрона из вольфрама.

### Введение

Носителями тока в металлах являются свободные электроны, т. е. электроны, слабо связанные с ионами кристаллической решетки металла. Свободные электроны при комнатной температуре практически не покидают металл. Это объясняется тем, что в поверхностном слое металла имеется задерживающее электрическое поле, препятствующее выходу электрона из металла. Работа, которую нужно затратить для удаления электрона из металла, называется работой  $A$ .

Электроны, покидая металл, удаляются от него на расстояния порядка атомных размеров и создают над поверхностью металла «электронное облако». Это облако вместе с наружным слоем положитель-

ных ионов решетки и индуцированных в результате вылета электронов индуцированных положительных зарядов образует двойной электрический слой, поле которого подобно полю плоского конденсатора. Это поле препятствует дальнейшему выходу свободных электронов из металла. Толщина этого электрического слоя равна ( $10^{-10}$ – $10^{-9}$ ) м. Таким образом, электрон при вылете из металла должен преодолеть задерживающее его электрическое поле двойного слоя.

Разность потенциалов  $\Delta\varphi$  в этом слое, называемая поверхностным скачком потенциала, определяется работой выхода  $A$  электрона из металла:

$$\Delta\varphi = \frac{A}{e}, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона. Работу выхода принято измерять в электрон-вольтах ( $\text{эВ}$ ):  $1 \text{ эВ}$  равен работе, совершаемой силами поля при прохождении электроном разности потенциалов в  $1 \text{ В}$ . Следовательно:  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . Работа выхода зависит от химической природы металлов, от чистоты их поверхности и имеет значения нескольких электрон-вольт.

Если электронам в металле сообщить энергию, необходимую для преодоления задерживающего его электрического поля двойного слоя, т. е. энергию, равную по величине работе выхода, то часть электронов покинет металл, т. е. наблюдается явление испускания электронов из металла – электронная эмиссия.

Термоэлектронная эмиссия – это испускание электронов нагретыми металлами. С повышением температуры число электронов, покидающих металл, растет. Исследование закономерностей термоэлектронной эмиссии можно провести с помощью простейшей двухэлектродной электронной лампы – вакуумного диода, который представляет собой откачанный баллон, содержащий два электрода: катод  $K$  и анод  $A$ . Катодом обычно служит нить из вольфрама. Если диод включить в цепь (см. рис. 1), то при накаливании катода и подаче на анод положительного напряжения в анодной цепи диода возникает ток.

Катод нагревается током, создаваемым батареей накала  $B_H$ , температуру катода можно менять, регулируя с помощью реостата  $R_H$  силу тока накала. На электроды подается напряжение от анодной батареи  $B_A$ . Это напряжение можно менять с помощью потенциометра  $\Pi$  и измерять вольтметром  $V$ . Сила анодного тока измеряется миллиамперметром  $mA$ .

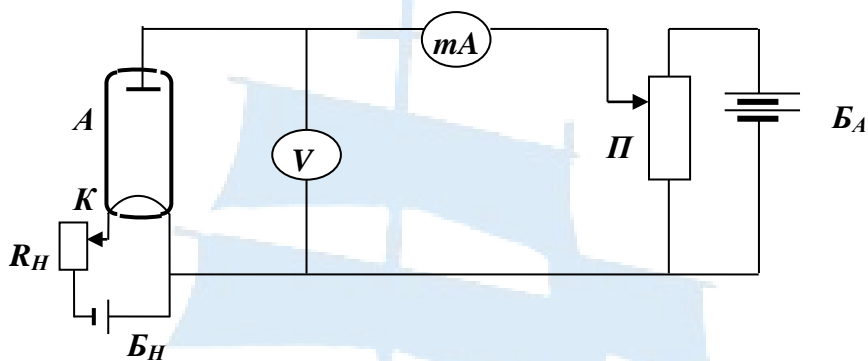


Рис. 1

При постоянном токе накала кривая зависимости силы анодного тока от анодного напряжения имеет вид, показанный на рис. 2.

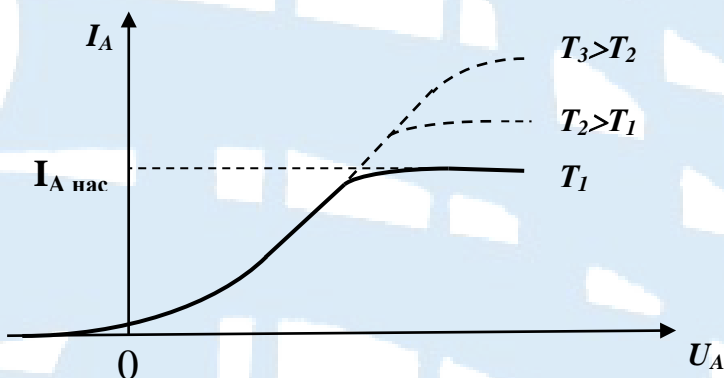


Рис. 2

Эта кривая называется вольт-амперной характеристикой диода. Различные кривые соответствуют разным температурам катода. Рассмотрим характерные особенности кривых  $I_A = f(U_A)$ . При  $U_A = 0$  в цепи течет слабый ток, обусловленный числом электронов, долетающих до анода. Чтобы сделать ток, равный  $0$ , необходимо приложить между катодом и анодом некоторое отрицательное напряжение.

Из рис. 2 видно, что закон Ома для вакуумного диода не выполняется. Начальный участок кривой довольно хорошо следует полученному теоретически Ленгмюром и Богуславским закону **трех вторых**, согласно которому сила анодного тока изменяется пропорционально  $U_A^{3/2}$ . С увеличением  $U_A$  все больше электронов достигают анода, при определенном значении  $U_A$  все вылетевшие из катода электроны достигают анода – ток перестает расти, т. е. наступает насыщение. Максимальный термоэлектронный ток, возможный при данной температуре катода, называется током насыщения –  $I_{A \text{ нас}}$ .

При повышении температуры увеличивается скорость хаотического движения электронов в металле, поэтому число электронов, способных покинуть металл, резко возрастает. Плотность тока насыщения, то есть сила тока насыщения на каждую единицу поверхности катода анода, вычисляется по формуле Ричардсона-Дешмена:

$$j_{нас} = BT^2 e^{-\frac{A_{вых}}{kT}}, \quad (2)$$

где  $B$  – постоянная эмиссии;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж / К – постоянная Больцмана.

### Описание лабораторной установки и метода измерений

Внешний вид лабораторной установки и электрическая схема приведены на рис. 3 и 3, а.



Рис. 3

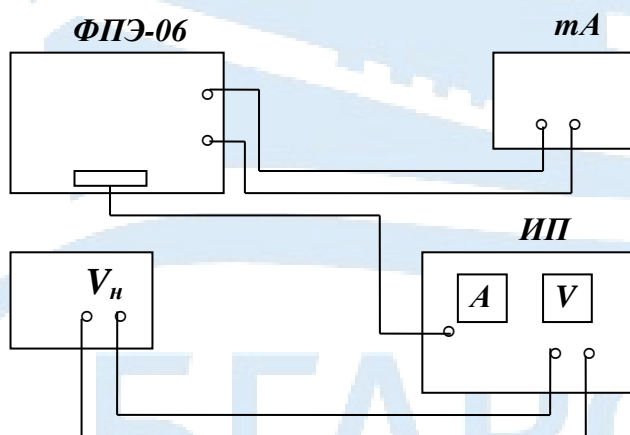


Рис. 3, а



Здесь *ИП* – источник питания; *ФПЭ-06* – кассета с собранной электрической схемой (см. рис. 1);  $V_n$  – вольтметр для измерения напряжения накала  $U_n$ ;  $V$  и  $A$  – вольтметр и амперметр на панели источника питания, вольтметр измеряет анодное напряжение  $U_A$ , амперметр – ток накала  $I_{нак}$ ;  $mA$  – миллиамперметр для измерения анодного тока –  $I_A$ .

Измеряя на опыте зависимость тока насыщения от температуры, можно определить работу выхода для данного катода. В работе для определения работы выхода используется метод прямых Ричардсона, который заключается в следующем. Прологарифмируем формулу (2):

$$\ln \frac{j}{T^2} = \ln B - \frac{A_{вых}}{k} \frac{1}{T}. \quad (3)$$

График функции (3) представляет собой прямую линию, тангенс угла наклона которой равен:  $tg \alpha = A_{вых} / k$ . Отсюда можно найти работу выхода:

$$A_{вых} = k tg \alpha. \quad (4)$$

Для построения графика необходимо знать плотность анодного тока насыщения  $j_{нас}$  и температуру катода  $T$ . Температура рассчитывается следующим образом. Подводимая к катоду мощность расходуется в основном на тепловое излучение. Для вольфрама экспериментально определена зависимость температуры катода  $T$  от расходуемой на его нагрев мощности, приходящейся на единицу площади поверхности катода  $P/S_k$ . Данная зависимость приведена на рис. 4. По этому графику, зная мощность, подводимую к катоду, можно определить его температуру.

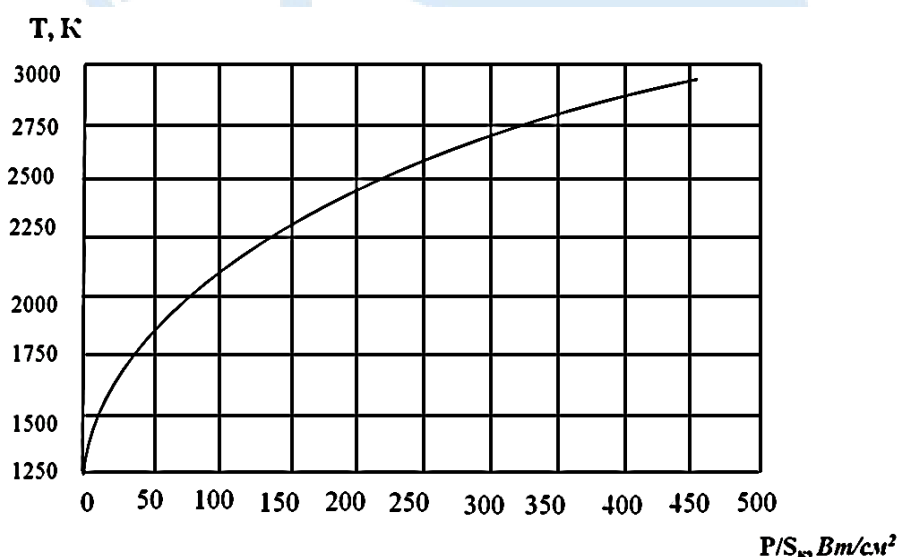


Рис. 4

## Порядок выполнения работы

1. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.
2. Проверить правильность сборки электрической цепи согласно рис. 3, а и представить её на проверку преподавателю или заведующему лабораторией. Максимальное значение тока накала  $I_{нак}$  измеряемое амперметром на панели источника питания, не должно превышать **2,2 А**. Напряжение накала  $U_H$  измеряется вольтметром  $V_H$ , который подключается к клеммам, где указано напряжение **2,5–4,5 В**. Регулировка анодного напряжения  $U$  осуществляется ручкой на панели источника питания, расположенной под вольтметром  $V$ . Для измерения анодного тока  $I_A$  используется амперметр  $mA$ , который подключается к cassette **ФПЭ-06**. Он должен работать в режиме миллиамперметра, измеряя ток до **20 мА**.
3. Установить напряжение накала  $U_H = 3,7 В$ , записать значение тока накала  $I_{нак}$ , и, увеличивая анодное напряжение от **10 до 100 В** через **10 В**, измерять значения анодного тока  $I_A$ .
4. Провести аналогичные измерения для напряжения накала в интервале **3,7–4,2 В**, меняя его через **0,1 В**, фиксируя при этом значения тока накала. Данные измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

$U_H,$ <b>В</b>	$I_{нак}$ <b>А</b>	$U_H,$ <b>В</b>	$I_{нак}$ <b>А</b>	$U_H,$ <b>В</b>	$I_{нак}$ <b>А</b>	$U_H,$ <b>В</b>	$I_{нак}$ <b>А</b>	$U_H,$ <b>В</b>	$I_{нак}$ <b>А</b>	$U_H,$ <b>В</b>	$I_{нак}$ <b>А</b>
3,7		3,8		3,9		4,0		4,1		4,2	
$U_A,$ <b>В</b>	$I_A,$ <b>mA</b>	$U_A,$ <b>В</b>	$I_A,$ <b>mA</b>	$U_A,$ <b>В</b>	$I_A,$ <b>mA</b>	$U_A,$ <b>В</b>	$I_A,$ <b>mA</b>	$U_A,$ <b>В</b>	$I_A,$ <b>mA</b>	$U_A,$ <b>В</b>	$I_A,$ <b>mA</b>
10		10		10		10		10		10	
20		20		20		20		20		20	
30		30		30		30		30		30	
40		40		40		40		40		40	
50		50		50		50		50		50	
60		60		60		60		60		60	
70		70		70		70		70		70	
80		80		80		80		80		80	
90		90		90		90		90		90	
100		100		100		100		100		100	

5. Для каждого значения тока накала построить вольт-амперную характеристику, точку перегиба на полученных кривых считать точкой насыщения. Зная масштаб графика, определить ток насыщения  $I_H$ .

6. Для всех значений напряжения накала рассчитать по формуле  $P = I_H U_H$  мощность, выделяемую на катоде, а также мощность, приходящуюся на единицу площади поверхности катода. Площадь поверхности катода принять равной  $S_K = 3,52 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ .

7. По графику (см. рис. 4), зная величины  $P/S_K$ , определить температуру катода для каждого значения мощности, выделяемой на катоде.

8. Рассчитать плотность анодного тока насыщения по формуле:  $j_{\text{нас}} = \frac{I_{\text{нас}}}{S}$ , принять  $S = 11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ .

9. Все полученные данные занести в табл. 2.

Таблица 2

№	$j_{\text{нас}}$ mA	$I_H$ A	$U_H$ B	$P/S_K$ Вт/см <sup>2</sup>	$T$ , K	$1/T$ , K <sup>-1</sup>	$j_{\text{нас}}$ , A/м <sup>2</sup>	$j_{\text{нас}}/T^2$ ,	$\ln j_{\text{нас}}/T^2$
1									
2									
3									
4									
5									
6									

10. Построить график зависимости  $\ln \frac{j}{T^2} = f\left(\frac{1}{T}\right)$ .

11. Определить тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс и рассчитать работу выхода по формуле (4). Полученное значение перевести в эВ.

12. Рассчитать погрешность измерений по правилу графической обработки результатов измерений.

### Контрольные вопросы для допуска к работе

1. Изобразить принципиальную электрическую схему лабораторной установки, дать пояснения использования приборов.

2. Рассказать порядок выполнения работы и методику снятия показаний по измерительным приборам.

3. Что собой представляет вакуумный диод?

4. Какая зависимость называется вольт-амперной характеристикой диода?

5. Какова природа сил, препятствующих выходу электронов из металла?
6. Как перевести единицу измерения энергии, выраженную в джоулях, в электрон-вольты?
7. Как в работе определяется плотность анодного тока насыщения?
8. Каким образом в работе определяется температура накала катода?
9. Объяснить, как в работе производится расчет абсолютной и относительной погрешности измерений.

### **Контрольные вопросы для сдачи работы**

1. Что называется работой выхода электрона из металла?
2. Что называется термоэлектронной эмиссией?
3. Объяснить, как возникает двойной электрический слой вокруг поверхности металла. Какова его толщина?
4. Нарисовать электрическую схему для снятия вольт-амперной характеристики диода.
5. Как доказать, что из катода при термоэлектронной эмиссии вылетают отрицательно заряженные частицы – электроны?
6. Изобразить вольт-амперные характеристики диода при различных температурах.
7. Что такое ток насыщения? Как достигается ток насыщения?
8. Почему ток насыщения зависит от температуры?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-12**

### **Исследование затухающих колебаний в колебательном контуре**

**Цель работы:** изучение электромагнитных колебаний, исследование затухающих колебаний в колебательном контуре, определение параметров и характеристик колебательного контура.

### **Введение**

**Электромагнитными колебаниями** называются колебания, при которых величины заряда, падения напряжения, тока периодически изменяются со временем.

Для возбуждения незатухающих электромагнитных колебаний используется простейший колебательный контур: идеализированная

электрическая цепь, состоящая из последовательно включенных конденсатора  $C$  и катушки индуктивности  $L$  (см. рис. 1).

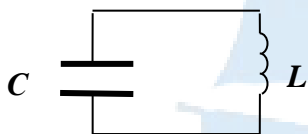


Рис. 1

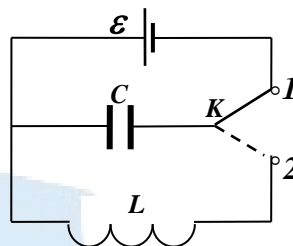


Рис. 2

Если зарядить конденсатор до величины  $q_{max}$  (рис. 2, ключ  $K$  находится в позиции 1), между его обкладками возникнет электрическое поле, энергия которого равна:

$$W_{\text{э}} = \frac{q_{max}^2}{2C}. \quad (1)$$

Отключим источник тока и замкнем конденсатор на катушку индуктивности (рис. 2, ключ  $K$  находится в позиции 2), тогда он начнет разряжаться и по цепи потечет ток. Через  $1/4$  периода конденсатор полностью разрядится, а ток в катушке достигнет наибольшего значения  $I_{max}$ , при этом энергия магнитного поля равна:

$$W_{\text{м}} = \frac{LI_{max}^2}{2}. \quad (2)$$

Начиная с этого момента, ток в контуре течет за счет ЭДС самоиндукции. Поскольку активное сопротивление цепи равно нулю, полная энергия не расходуется на нагревание и остается постоянной. В дальнейшем ток уменьшается и, когда заряд на обкладках достигнет первоначальной величины  $q_{max}$ , сила тока становится равной нулю, т. е. произошла перезарядка конденсатора.

Затем процессы протекают в обратном порядке, и система приходит в исходное состояние. В ходе рассмотренного процесса периодически изменяются заряд, напряжение на обкладках конденсатора и ток, текущий через индуктивность.



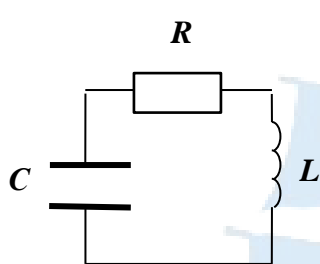


Рис. 3

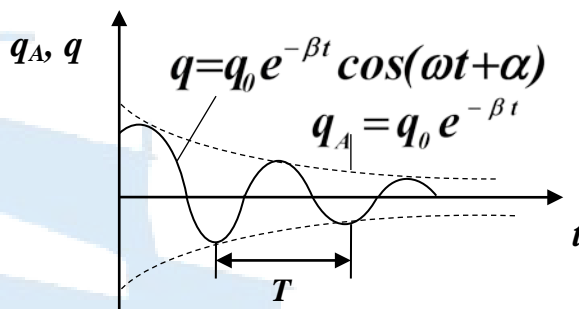


Рис. 4

Всякий реальный колебательный контур обладает сопротивлением  $R$  (рис. 3). Энергия, запасенная в контуре, постепенно расходуется на нагревание, вследствие чего колебания затухают.

Составим уравнение затухающих колебаний для данного контура, используя второе правило Кирхгофа. Так как падение напряжения на конденсаторе равно:  $U_c = \frac{q}{C}$ , на сопротивлении:  $U_R = IR$ , а ЭДС самоиндукции:  $\varepsilon_i = -L \frac{dI}{dt}$ , тогда:

$$U_c + U_R = \varepsilon_i = -L \frac{dI}{dt} . \quad (3)$$

С учетом того, что:  $I = \frac{dq}{dt}$ ,  $\frac{dI}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}$ , после подстановки в (3) получим:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (4)$$

Обозначим:  $\frac{1}{LC} = \omega_0^2$ ,  $\frac{R}{L} = 2\beta$ , тогда:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (5)$$

Это уравнение затухающих колебаний в дифференциальном виде, здесь  $\omega_0$  – собственная циклическая частота колебательного контура,  $\beta$  – коэффициент затухания. Решение этого уравнения имеет вид:

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (6)$$

где  $\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$  – частота затухающих колебаний.

Как следует из (6), амплитуда колебаний уменьшается со временем по логарифмическому закону. Зависимость (6) представлена на рис. 4. Период затухающих колебаний определяется по формуле:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \quad (7)$$

Закон изменения напряжения имеет вид:

$$U = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha). \quad (8)$$

Введем понятие времени релаксации  $\tau$  – это время, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в  $e$  раз ( $e$  – основание натурального логарифма). Если  $\frac{U_{10}}{U_{20}} = e = \frac{e^{-\beta t_1}}{e^{-\beta t_2}} = e^{\beta(t_2 - t_1)}$ ,  $t_2 - t_1 = \tau$  по усло-

вию, тогда:  $e = e^{\beta(t_2 - t_1)} = e^{\beta\tau}$  или  $\beta\tau = 1$ . Отсюда:

$$\tau = \frac{1}{\beta}. \quad (9)$$

Затухающие колебания характеризуются логарифмическим декрементом затухания  $\lambda$ . Это натуральный логарифм отношения амплитуд, отстоящих друг от друга по времени на один период:

$$\lambda = \ln \frac{e^{-\beta t_1}}{e^{-\beta t_2}} = \ln \frac{U_{10}}{U_{20}}, \quad (10)$$

поскольку:  $t_2 - t_1 = T$ , то:

$$\lambda = \beta T. \quad (11)$$

Пусть  $N$  – число колебаний, в течение которых амплитуда уменьшается в  $e$  раз, тогда получим:

$$\lambda = \beta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N}. \quad (12)$$

Добротностью колебательной системы  $Q$  называется величина, равная произведению  $2\pi$  на отношение энергии колебаний системы в момент времени  $t$  к убыли этой энергии за один период, т. е:

$$Q = 2\pi \frac{W(t)}{W(t) - W(t+T)}. \quad (13)$$

Если  $\lambda \ll l$ , то  $\omega \approx \omega_0$ , и  $Q = \pi / \lambda = \pi / \beta T_0 = \omega_0 / 2\beta$ . Так, для колебательного контура при данном условии:  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ .

### Описание лабораторной установки и метода измерений

В работе используются следующие приборы и оборудование: источник постоянного тока **ИП** с вольтметром; генератор звуковых сигналов **ЗГ**; персональный компьютер **ПК**; кассета с колебательным контуром **ФПЭ-10/11**; преобразователь импульсов **ПИ/ФПЭ-09**; магазин сопротивлений **МС**.

Внешний вид лабораторной установки и электрическая схема показаны на рис. 5 и 5, а.

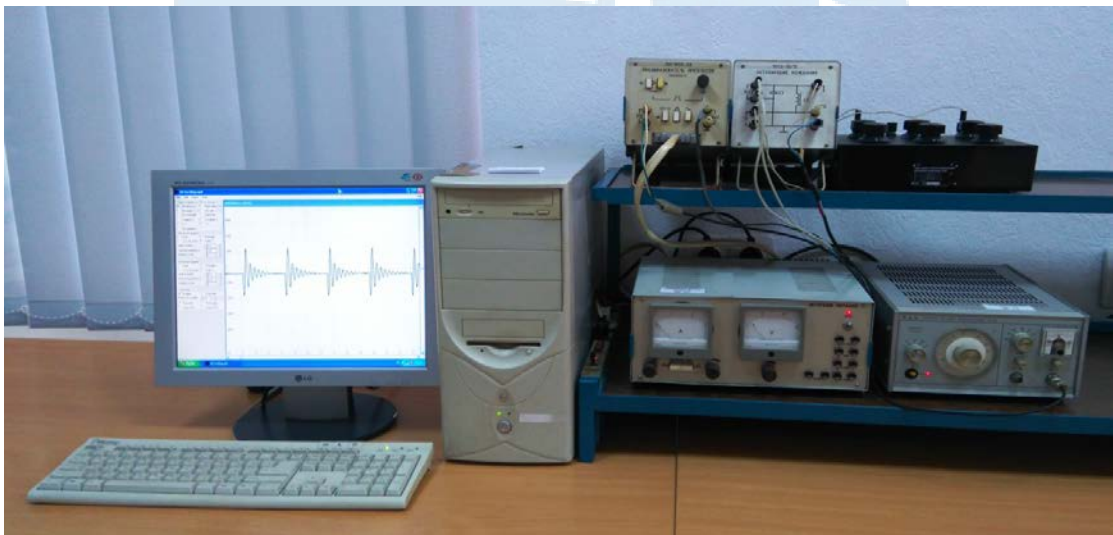


Рис. 5. Внешний вид лабораторной установки

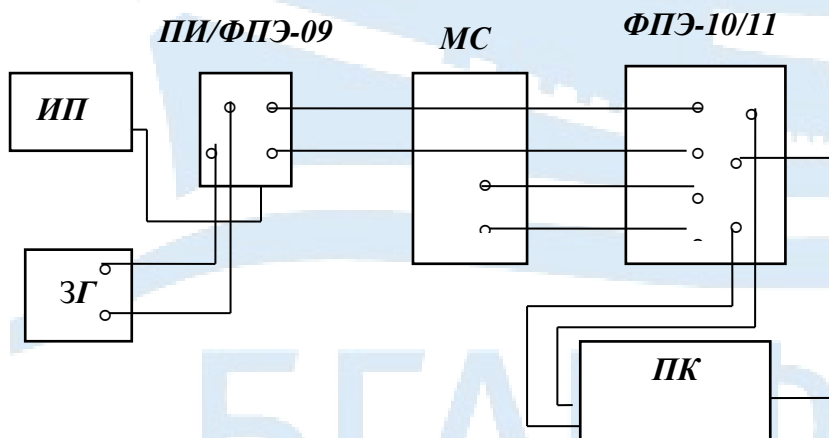


Рис. 5, а. Электрическая схема

Происходящие в контуре затухающие колебания наблюдаются на экране монитора **ПК**. Картина имеет вид, изображенный на рис. 6. По наблюдаемой картине можно определить период  $T$  затухающих колебаний. На рис. 6 показано, как определяется период колебаний  $T$  и амплитудные значения напряжения  $U_{01}, U_{02}, U_{03}$ .

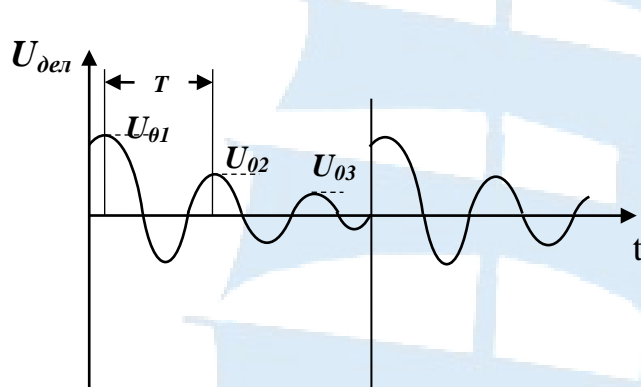


Рис. 6

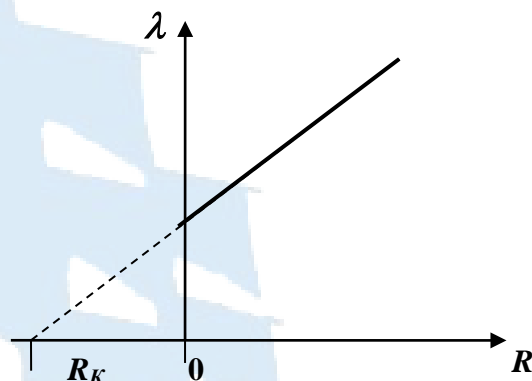


Рис. 7

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе.
2. Проверить правильность сборки электрической цепи согласно рис. 5, а и представить её на проверку преподавателю или заведующему лабораторией.
3. Подготовить приборы к работе:
  - 1) установить следующие параметры выходного напряжения звукового генератора: частота (**100-150 Гц**), напряжение **2 В**.
  - 2) на преобразователе импульсов **ПИ / ФПЭ - 09** нажать кнопку **Л** и правую клавишу «**скважность грубо**».
  - 3) на магазине сопротивлений **МС** установить сопротивление, равное **100 Ом**.
4. Включить лабораторный стенд, источник постоянного тока **ИП**; генератор звуковых сигналов **ЗГ**; персональный компьютер **ПК**.
5. Получить на экране монитора устойчивую картину колебаний (см. рис. 6).
6. Измерить период колебаний  $T$  (в мс) и амплитуды колебаний  $U_{10}; U_{20}; U_{30}$ ; (в единицах делений шкалы), данные занести в табл. 1.

Таблица 1

$R_M$ , Ом	$t_1$ , мс	$t_2$ , мс	$T$ , мс	$U_{10}$ , дел	$U_{20}$ , дел	$U_{30}$ , дел	$\lambda_{12}$	$\lambda_{23}$	$\langle \lambda \rangle$
100									
200									
300									
400									

7. Выполнить измерения по пункту 5 для сопротивлений **200 Ом, 300 Ом, 400 Ом**. Данные занести в табл. 1.

### Обработка полученных результатов

1. Комбинируя попарно амплитуды колебаний  $U_{10}$ ;  $U_{20}$ ;  $U_{30}$ , вычислить по формуле (10) логарифмические декременты затухания  $\lambda_{12}$  и  $\lambda_{23}$  и найти среднее значение  $\langle \lambda \rangle$  для каждого из сопротивлений  $R_M$ . Расчеты занести в табл. 1.

2. Из формулы (11) найти коэффициенты затухания  $\beta$  для каждого из сопротивлений  $R_M$ , полученные результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

$R_M$ , Ом	$\beta$ , с <sup>-1</sup>	$R_K$ , Ом	$R$ , Ом	$L$ , Гн	$\langle L \rangle$ , Гн	$C$ , Ф	$\langle C \rangle$ , Ф
100							
200							
300							
400							

3. Построить график зависимости логарифмического декремента затухания  $\lambda$  от сопротивления магазина  $R_M$  (см. рис. 7). Экстраполируя график к  $\lambda = 0$ , найти сопротивление катушки индуктивности  $R_K$ .

4. Найти полное сопротивление контура  $R$ , которое складывается из сопротивления магазина и катушки индуктивности:  $R = R_M + R_K$ .

5. Согласно формуле (11) имеем:

$$\lambda = \beta T = \frac{R}{2L} T = \frac{R_M + R_K}{2L} T. \quad (15)$$

Из формулы (15), зная для каждого сопротивления значения  $\langle \lambda \rangle$  и  $T$ , найти индуктивность  $L$ . Из формулы  $T = 2\pi\sqrt{LC}$  для каждого сопротивления найти емкость контура  $C$ . Результаты занести в табл. 2.



## **Контрольные вопросы для допуска к работе**

1. Укажите на стенде для данной работы источник питания, катушку с колебательным контуром, магазин сопротивлений, звуковой генератор, преобразователь импульсов, каково их назначение?
2. Проверьте правильность соединения приборов. Расскажите порядок их включения.
3. Какие колебания изучаются в работе? Назовите основные характеристики затухающих колебаний.
4. Расскажите порядок выполнения работы, какие измерения необходимо провести?

## **Контрольные вопросы для сдачи работы**

1. Дайте определение колебательного движения.
2. Какие колебания называются гармоническими?
3. Почему происходит затухание колебаний? Нарисуйте электрическую схему колебательного контура, в котором происходят затухающие электромагнитные колебания.
4. Запишите уравнение затухающих колебаний для величины заряда, силы тока и напряжения в дифференциальном и интегральном видах.
5. Назовите основные характеристики электромагнитных колебаний.
6. Что называется логарифмическим декрементом затухания?
7. Что называется временем релаксации?
8. Какая величина называется добротностью колебательного контура?
9. Запишите, по какому закону происходит убывание амплитуды затухающих колебаний?
10. Запишите формулу для частоты затухающих колебаний.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Савельев И.В. Курс физики: учеб. пособие для вузов: / И.В. Савельев. 7-е изд., стереотип. – СПб.: Лань, 2007.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. 6-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2007. – 719 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – 18-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2010. – 557 с.



978980001633

**Владимир Михайлович Смурыгин**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

Лабораторный практикум  
для курсантов и студентов младших курсов  
технических специальностей  
всех форм обучения

---

*Ведущий редактор И.А. Мещерякова  
Младший редактор Г.В. Деркач*

*Лицензия № 021350 от 28.06.99.*

*Компьютерное редактирование  
И.В. Леонова*

*Печать офсетная.*

*Подписано в печать 12.02.2018 г.  
Усл. печ. л. 6,5. Уч.-изд. л. 6,7.*

*Формат 60 x 90 1/16.*

*Заказ № 1324. Тираж 83 экз.*

Доступ к архиву публикации и условия доступа к нему:  
<http://bgarf.ru/academy/biblioteka/elektronnyj-katalog/>

**БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»**

*Издательство БГАРФ,  
член Издательско-полиграфической ассоциации высших учебных заведений  
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6.*