

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Калужский филиал  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»  
(КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Горбунов А.К., Силаева Н.А., Крицкая А.Р.,  
Лысенко А.Л., Петросян О.П.

**ЭЛЕКТРОСТАТИКА. МАГНИТОСТАТИКА.  
ПОСТОЯННЫЙ ТОК. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА.  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсам «Физика» и «Физика и естествознание»

*для всех специальностей и направлений подготовки*

Калуга, 2018

УДК 53(076.5)

ББК 22.3я7

Г67

Методические указания составлены в соответствии с учебным планом для подготовки специалистов и бакалавров по следующим специальностям и направлениям подготовки КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана: 15.03.01, 09.03.04, 10.03.01, 13.03.03, 09.03.01, 11.03.03, 15.03.06, 20.03.01, 27.03.05, 27.03.04, 10.05.03, 15.05.01, 23.05.01

Методические указания рассмотрены и одобрены:

Кафедрой «Физика» (ФН4-КФ)

Зав. кафедрой ФН4-КФ \_\_\_\_\_ протокол № 7 от 19.02. 20 18 г.  
18 д.ф.-м.н., профессор А.К. Горбунов

Методической комиссией ФНК

Президент метод. комиссии \_\_\_\_\_ протокол № 2 от 28 февраля 20 18 г.  
Анфил к.х.н., доцент К.Л. Анфилов

Методической комиссией КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

Президент метод. комиссии \_\_\_\_\_ протокол № 2 от 06.03 20 18 г.

Рецензент \_\_\_\_\_ д.э.н., профессор О.Л. Перерва

Авторы \_\_\_\_\_ профессор кафедры ФН5-КФ, д.т.н., М.В. Астахов

\_\_\_\_\_ профессор кафедры ФН4-КФ, д.ф.-м.н., А.К. Горбунов

\_\_\_\_\_ ст. преподаватель кафедры ФН4-КФ, Н.А. Силаева

\_\_\_\_\_ доцент кафедры ФН4-КФ, к.п.н., А.Р. Крицкая

\_\_\_\_\_ доцент кафедры ФН4-КФ, к.т.н., А.Л. Лысенко

\_\_\_\_\_ доцент кафедры ФН4-КФ, к.ф.-м.н., О.П. Петросян

#### Аннотация.

Методические указания составлены в соответствии с рабочей программой курса «Физика» и «Физика и естествознание» и предназначены для выполнения лабораторных работ студентами 2 курса всех специальностей и направлений подготовки КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Методические указания содержат цели работы, краткую теоретическую и экспериментальную часть, анализ обработки результатов измерения, методику выполнения и оформления лабораторных работ, контрольные вопросы.

© КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018 г.

© Горбунов А.К.

© Петросян О.П.

© Силаева Н.А.

© Крицкая А.Р.

© Лысенко А.Л.

## Оглавление

1. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ .....	6
2. Лабораторная работа №1 «ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ».....	7
2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ .....	7
2.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.....	7
2.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	7
2.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	9
2.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	12
3. Лабораторная работа №2 «ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА» .....	13
3.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ .....	13
3.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.....	13
3.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	13
3.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	18
3.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	21
4. Лабораторная работа №3 «ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ИСТОЧНИКА ТОКА КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ».....	22
4.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ .....	22
4.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.....	22
4.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	22
4.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	24
4.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	26
5. Лабораторная работа №4 «ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЕСОВ» .....	27
5.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ .....	27
5.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.....	27
5.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	27
5.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	28
5.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	30

6. Лабораторная работа №5 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ».....	31
6.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ .....	31
6.2. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ .....	31
6.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	31
6.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	34
6.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	38
7. Лабораторная работа №6 «ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ».....	39
7.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ .....	39
7.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.....	39
7.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	39
7.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	43
7.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	45
8. Лабораторная работа №7 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ» .	46
8.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ .....	46
8.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.....	46
8.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	46
8.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	50
8.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	51
9. Лабораторная работа №8 «СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧЕНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА» .....	52
9.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ .....	52
9.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.....	52
9.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	52
9.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	55
9.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	59
10. Лабораторная работа №9 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА» .....	60
10.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	60
10.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ .....	60
10.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	60
10.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....	64

10.5.	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	67
11.	Лабораторная работа №10 «ЭФФЕКТ ХОЛЛА. ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ».....	68
11.1.	ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	68
11.2.	ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ .....	68
11.3.	ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	68
11.4.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....	72
11.5.	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	75
12.	Лабораторная работа №11 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА».....	75
12.1.	ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	75
12.2.	ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ .....	76
12.3.	ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	76
12.4.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....	80
12.5.	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	82
13.	Лабораторная работа №12 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ КОЛЕЦ НЬЮТОНА» .....	82
13.1.	ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	82
13.2.	ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ .....	83
13.3.	ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	83
13.4.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....	85
13.5.	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	89
14.	ЛИТЕРАТУРА.....	90

# **1. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ**

Представить отчет по лабораторной работе на стандартных листах формата А4 в соответствии с методикой выполнения и оформления лабораторных работ по физике:

1. Прочитать описание лабораторной работы, ознакомиться с теоретической и экспериментальной частью, выполнением эксперимента, контрольными вопросами.
2. Придерживаясь следующего плана, оформить отчет о выполнении лабораторной работы:
  - 1) записать номер и название лабораторной работы;
  - 2) записать цель лабораторной работы;
  - 3) записать приборы и принадлежности, включая измерительную линейку, штангенциркуль, секундомер электронный, микрометр и т. д.;
  - 4) теоретическая часть: записать основной закон или расчетную формулу с разъяснением буквенных обозначений физических величин, входящих в них, указать единицы измерений в СИ;
  - 5) экспериментальная часть: привести схему установки, рисунок или чертеж, поясняющий выполнение эксперимента; записать таблицу измерений, константы расчета;
  - 6) обработка результатов измерений: вычисление физических величин в СИ; построение графиков на миллиметровке, скрепленной с отчетом; расчет погрешностей измерений;
  - 7) записать ответ. Сделать выводы.

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ»

### 2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Необходимо исследовать электростатическое поле. По результатам эксперимента построить эквипотенциальные линии  $\varphi = \text{const}$  и линии напряженности  $\vec{E}$ , а также графики зависимости  $\varphi$  и  $E$  от расстояния между электродами вдоль оси симметрии ванны.

### 2.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Электростатическая ванна с электродами и электролитом; источник переменного тока; вольтметр.

### 2.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

*Электростатика* — наука о неподвижных и неизменных во времени зарядах и создаваемых ими электрических полях. Основной задачей электростатики является определение напряженности электрического поля  $\vec{E}$ , создаваемого различными заряженными телами и заряженными системами.

Аналитически эта задача решается тремя основными способами:

- ◆ способ I — с помощью уравнения Гаусса (первого уравнения Максвелла);
- ◆ способ II — по принципу суперпозиции;
- ◆ способ III — по известному потенциалу  $\varphi$  электрического поля.

При конструировании различных электронных приборов (лампы, кинескопы, конденсаторы, микроскопы и др.) необходимо знать распределение электрического поля между электродами сложной формы. Аналитический расчет поля удастся только при самых простых конфигурациях электродов. Сложные электростатические поля исследуются экспериментально и задаются графически с помощью линий напряженности и эквипотенциальных линий. Линии напряженности (силовые линии) позволяют определить модуль и направление напряженности поля. Касательная в любой точке линии напряженности совпадает по направлению с вектором  $\vec{E}$  в

этой точке поля. Модуль  $|\vec{E}|$  определяется по числу силовых линий, пересекающих единичную площадку, перпендикулярную линиям. Один из экспериментальных методов исследования электростатических полей — *метод электролитической ванны*.

Измерения в электролитической ванне производят с помощью электродов, форма которых воспроизводит реальный объект в некотором масштабе, обычно увеличенном. На электроды подаются потенциалы, равные потенциалам объекта или измененные в некотором отношении (обычно уменьшенные). При этом между электродами образуется электрическое поле, отличающееся от исследуемого по напряженности, но с точностью до масштаба совпадающее с ним по конфигурации.

В реальных конструкциях электростатическое поле существует либо в вакууме, либо в диэлектрике. В электролитической ванне поле существует в проводящей среде (электролите). Уравнения Максвелла, описывающие поля между электродами в обоих случаях, записываются одинаково:  $\text{div } \vec{E} = 0$  — нет источников поля, кроме самих электродов;  $\text{rot } \vec{E} = 0$  — отсутствует переменное магнитное поле. Таким образом, поля действительно подобны. В то же время измерение поля в проводящей среде, особенно на переменном токе достаточно низкой частоты, существенно проще. Низкая частота выбирается для возможности пренебречь в уравнении Максвелла

$$\text{rot } \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$$

правой частью. На переменном токе обычным вольтметром легко измеряется разность потенциалов между двумя любыми точками проводящей среды, или потенциал любой точки среды относительно электрода, потенциал которого принят за нуль.

По известному потенциалу определяется напряженность поля. Связь между  $\vec{E}$  и  $\varphi$  следует из общего правила нахождения консервативной силы, действующей в потенциальном поле:

$$\vec{F} = -\text{grad } W_n. \quad (1)$$

В электростатике

$$\vec{F} = q\vec{E}; \quad W_n = q\varphi,$$

и соотношение (1) принимает вид

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi. \quad (2)$$

Проекция напряженности поля на произвольное направление  $l$  опре-



деляется следующим образом:

$$E_l = -\partial\varphi/\partial l, \quad (3)$$

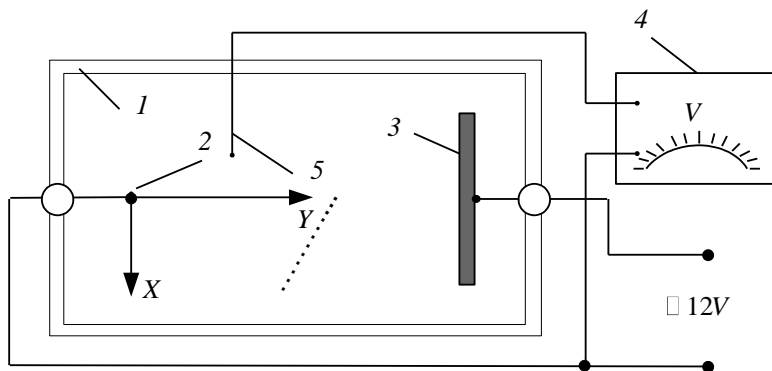
т. е. численно равна быстрой убывания потенциала на единицу длины в этом направлении. Вдоль линии напряженности  $E_l$  и  $|\partial\varphi/\partial l|$  достигают максимального значения, равного  $|\vec{E}|$ .

В эксперименте сначала строятся эквипотенциальные линии (линии равного потенциала), а затем линии напряженности (силовые линии).

## 2.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 4.1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки

В ванну 1, наполненную электролитом (подсоленная вода), погружены электроды 2 и 3 заданной конфигурации. К электродам подводится напряжение 12 В промышленной частоты 50 Гц. Вольметр 4 подключен к одному из электродов (потенциал которого принимается равным нулю) и к зонду 5. Положение зонда в ванне (т. е. координаты какой-либо точки поля) определяется с помощью миллиметровки, лежащей под ванной.

### 4.2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Собрать установку.
2. Включить источник питания и вольметр. Дать приборам прогреться в течение 3–5 мин. Прикоснувшись зондом вольметра к электроду 2, убедиться в наличии на нем нулевого потенциала (заземления).

3. Перемещая зонд *б* вдоль оси симметрии ванны (по оси *y*) от электрода 2 к электроду 3, получить координаты точек, потенциалы которых равны 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10 В. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений

$\phi$ , В	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>y</i> , см								

4. Аналогично, перемещая зонд *б* в направлении, примерно перпендикулярном к оси *y*, снять координаты *x* и *y* точек, лежащих на эквипотенциальных линиях  $\phi_1 = 5$  В;  $\phi_2 = 7$  В;  $\phi_3 = 9$  В. Ввиду симметрии поля координаты снимаются только с одной стороны от оси *y*, на другую сторону координаты отражаются зеркально. Снимается не менее 5 точек на каждой эквипотенциальной полулинии по всей полуширине ванны. Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений

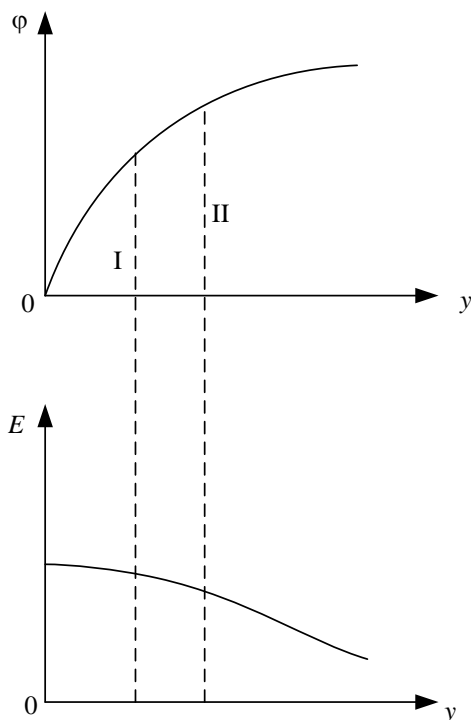
<i>x</i>							
<i>y</i>							

### 4.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным табл. 1 построить график  $\phi = f_1(y)$  на миллиметровке.

2. Построить график зависимости  $E = f_2(y)$  вдоль оси симметрии.

Для этого разность  $\Delta\phi_i = \phi_{i+1} - \phi_i = 1$  В соседних значений верхней строки табл. 1 делим на разность  $\Delta y_i = y_{i+1} - y_i$  соответствующих соседних значений нижней строки табл. 1. В соответствии с (3)  $|\Delta\phi_i / \Delta y_i| = E_i$ . График  $E = f_2(y)$  построить под графиком  $\phi = f_1(y)$ . Пример зависимости приведен на рис. 2.



**Рис. 2.** Пример зависимости  $\phi$  и  $E$  от расстояния между электродами

Ось  $y$  должна быть одинаковой для обеих зависимостей (начало, масштаб). Тогда соотношение  $E = |\partial\phi/\partial y|$  подтверждается графическим дифференцированием:  $|\vec{E}|$  пропорционален тангенсу угла наклона зависимости  $\phi_{(y)}$ ;  $|\vec{E}|$  уменьшается до постоянной величины в области, где  $\phi$  увеличивается линейно.

3. Построить силовые линии электростатического поля (линии  $\vec{E}$ ). Для этого разделить электрод 3 на 10 одинаковых частей и провести 11 силовых линий. Центральная линия идет вдоль оси симметрии. Пять построенных с одной стороны оси симметрии зеркально отобразить на другую. При построении использовать известное положение о перпендикулярности эквипотенциальных линий и силовых линий. То есть силовая линия, выходя перпендикулярно поверхности электрода 2, доходит до электрода 3, всегда

пересекая линии равного потенциала перпендикулярно. Направление силовых линий противоположно ходу построения: они направлены от электрода 3 с бóльшим потенциалом к электроду 2 с меньшим (нулевым) потенциалом.

Проверить возможность определения модуля  $|\vec{E}|$  по густоте силовых линий: число линий, пересекающих отрезок одинаковой длины (3 см), перпендикулярный силовым линиям (изогнутый по эквипотенциальной линии), пропорционально напряженности поля. Получить отношение числа линий для  $y_1 = 5$  см и  $y_2 = 15$  см (вдоль оси  $y$ ) и сравнить с отношением  $E_1/E_2$  из графика  $E = f_2(y)$ .

## 2.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит основная задача электростатики?
2. Назовите основные методы определения  $\vec{E}$ .
3. Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом.
4. Определение линии напряженности электрического поля.
5. Как силовые линии определяют модуль напряженности?
6. Докажите взаимную перпендикулярность эквипотенциальных и силовых линий.
7. В каком реальном приборе поле аналогично исследованному?

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА»

#### 3.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с приборами и методами измерения электрических сопротивлений.

#### 3.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Принадлежности к мостику Уитстона: реохорд; магазин сопротивлений; гальванометр; амперметр; ключ; провода; измеряемые сопротивления; мост постоянного тока типа НВЛ-49.

#### 3.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Теоретической основой измерения электрического сопротивление является *закон Ома*

$$I = U/R, \quad (1)$$

связывающий протекающий по проводнику ток, сопротивление проводника и падение напряжения на нем.

В свою очередь, сопротивление проводника определяется материалом проводника и его размерами:

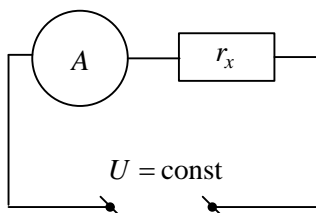
$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление, характеризующее материал проводника;  $l$  и  $S$  — его длина и площадь поперечного сечения.

Принципиально уравнение (2) может использоваться для измерения  $R$ , если известно  $\rho$  и экспериментально определены  $l$  и  $S$ . Однако на практике такой метод неудобен и не может обеспечить высокой точности измерения.

Более совершенны *электрические методы измерений*. Электрическое сопротивление измеряют омметрами и измерительными мостами.

На рис. 1 приведена электрическая схема омметра, применяемого для измерения сравнительно больших сопротивлений.



**Рис. 1.** Электрическая схема омметра

В качестве измерительного прибора  $A$  используется магнитно-электрический миллиамперметр, для которого

$$\alpha = SI, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — показания прибора (угол поворота подвижной части);  $S$  — чувствительность прибора;  $I$  — протекающий ток.

Для приведенной схемы

$$\alpha = S \frac{U}{r + r_x}, \quad (4)$$

где  $r$  — сопротивление прибора.

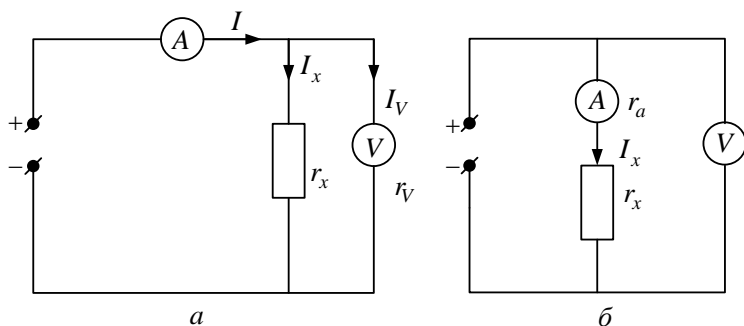
Из формулы (4) следуют основные особенности: шкала прибора носит гиперболический характер; ноль шкалы совмещен с максимальным углом отклонения подвижной части.

В качестве источника питания омметры имеют сухую батарею. С течением времени напряжение батареи падает, т. е. условие  $U = \text{const}$  не выполняется, что приводит к большой погрешности. Для компенсации в миллиамперметре есть специальный магнитный шунт, позволяющий выполнить условие  $SU = \text{const}$ . Компенсация производится при накоротко замкнутых зажимах  $r_x$ : рукоятку шунта перемещают до установления стрелки прибора на отметке 0.

Омметры обладают сравнительно невысокой точностью (класс 1,5 или 2,5). Их главное преимущество — это малые габариты и вес, что позволяет создать небольшие переносные приборы.

Следующим по точности является *метод вольтметра и амперметра*.

Измерения производятся по двум схемам, показанным на рис. 2.



**Рис. 2.** Схемы метода вольтметра и амперметра

В обоих случаях получается лишь приближенное значение измеряемого сопротивления:

$$r'_x = U/I. \quad (5)$$

Действительное значение сопротивления  $r_x$  для схемы на рис. 2, а:

$$r_x = \frac{U}{I_x} = \frac{U}{I - I_V} = \frac{U}{I - U/r_V}. \quad (6)$$

Погрешность возникает за счет того, что амперметр учитывает не только ток  $I_x$ , но и ток  $I_V$ , ответвляющийся в вольтметр. Схему целесообразно применять для измерения малых сопротивлений.

Для схемы на рис. 2, б  $r_x$  определяется по формуле

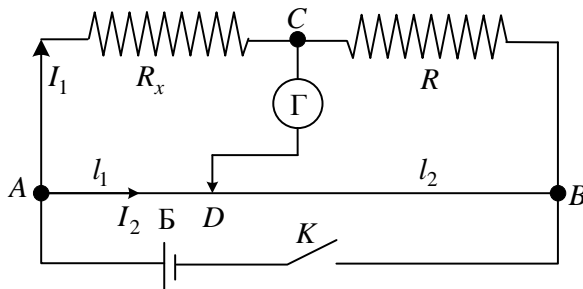
$$r_x = \frac{U - I_x \cdot r_A}{I_x}. \quad (7)$$

Погрешность появляется из-за неточного показания вольтметра, так как, кроме напряжения на измеряемом сопротивлении, он учитывает также падение напряжения на амперметре. Схема применяется для измерения больших сопротивлений.

Преимуществом метода является то, что по измеряемому сопротивлению можно пропустить такой же ток, как и в условиях его работы, что очень важно при измерении сопротивлений, значение которых зависит от тока.

Наиболее высокая точность достигается при измерении сопротивлений *мостовым методом*. В этом методе измеряемое сопротивление сравнивается с эталонным.

Принципиальная схема моста постоянного тока (мостика Уитстона) приведена на рис. 3.



**Рис. 3.** Принципиальная схема моста постоянного тока

Она состоит из реохорда  $AB$ , известного сопротивления  $R$ , измеряемого сопротивления  $R_x$ , гальванометра  $\Gamma$  (высокочувствительного прибора для измерения малых токов), батареи и ключа. Реохорд представляет собой тонкую металлическую проволоку общей длиной  $l$ , натянутую вдоль измерительной линейки. Вдоль реохорда может перемещаться ползунок с контактом  $D$ , положение которого определяет длины  $l_1$  и  $l_2$ , так что  $l = l_1 + l_2$ . Если контакт  $D$  отсоединить от реохорда, то ток будет протекать от узла  $A$  к узлу  $B$  по двум ветвям: ветви  $R_x - R$  (ток  $I_1$ ) и реохорду (ток  $I_2$ ).

Ветвь  $CD$  (при замкнутом контакте  $D$ ) позволяет току перейти из одной основной ветви в другую как по «мостику», откуда вся схема получила название моста.

Обозначим потенциалы узлов схемы через  $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_D$ . При перемещении ползунка  $D$  по реохорду потенциал  $\varphi_D$  может изменяться от  $\varphi_A$  до  $\varphi_B$ , в частности принимать значение  $\varphi_D = \varphi_C$ . Равенство определяется по отсутствию ток через гальванометр:

$$I_{\Gamma} = \frac{\varphi_C - \varphi_D}{R_{\Gamma}} = 0 \text{ при } \varphi_D = \varphi_C.$$

Эта операция подбора положения движка, при котором  $I_{\Gamma} = 0$ , называется *уравновешиванием моста*, а мост, через гальванометр которого не течет ток, называется *уравновешенным*.



Покажем, что в уравновешенном мосте неизвестное  $R_x$  определяется по известным  $R$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ .

Для этого воспользуемся вторым правилом Кирхгофа для контуров  $ACD$  и  $CBD$ . Получим соответственно:

$$I_1 R_x - I_2 R_{AD} = 0 \text{ и } I_1 R - I_2 R_{DB} = 0;$$

отсюда

$$I_1 R_x = I_2 R_{AD} \text{ и } I_1 R = I_2 R_{DB}.$$

Разделив почленно, получим

$$R_x = R \frac{R_{AD}}{R_{DB}}. \quad (8)$$

Так как

$$R_{AD} = \rho l_1 / S; \quad R_{DB} = \rho l_2 / S,$$

то равенство (8) принимает вид

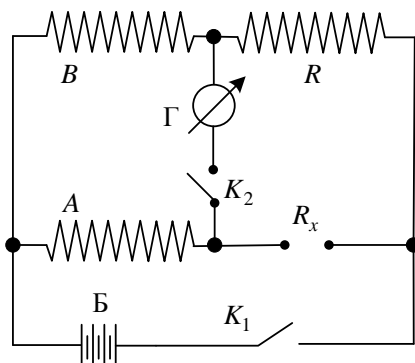
$$R_x = R \frac{l_1}{l_2}. \quad (9)$$

Рассмотренный мостик Уитстона дает наглядное представление о методе измерений, но может быть использован в сравнительно небольшом пределе измерений (от 1 до 1000 Ом) и с ограниченной точностью. Более универсальны и удобны в работе различные мосты промышленного изготовления, из которых в настоящей работе применяется мост постоянного тока МВЛ-49. Принципиальная схема моста приведена на рис. 4.

Постоянное сопротивление  $R$  называется *плечом сравнения*. Сопротивление осуществлено в виде рычажного магазина известных сопротивлений, встроенных в мост. Эти сопротивления выполнены отдельными декадами, включены последовательно и позволяют набирать сопротивления до  $10^4$  Ом с наименьшей ступенью в 0,1 Ом. Вместо реохорда применяется специальный штепсельный магазин сопротивления, позволяющий задавать различные отношения сопротивлений плеч моста  $A$  и  $B$ , называемых *плечами отношения*. На панели моста выведены зажимы для подключения измеряемого сопротивления, а также гальванометра  $\Gamma$  и батареи  $B$ , которые включаются на время измерения ключами  $K_2$  и  $K_1$ . Величина измеряемого сопротивления  $R_x$  определяется по равенству

$$R_x = R \cdot \frac{A}{B}, \quad (10)$$

где  $R$  — значение сопротивления по рычажному магазину плеча сравнения;  $A$  и  $B$  — значения сопротивлений по штепсельному магазину плеч отношений.



**Рис. 4.** Принципиальная схема моста постоянного тока МВЛ-49

В схеме моста не имеет значения, в какую диагональ включен гальванометр, а в какую — источник питания. На рис. 4 они поменялись местами по сравнению с рис. 3. Однако это не изменяет окончательного выражения (10), которое совпадает с (8).

Мост позволяет проводить измерение сопротивлений от 1 до  $10^6$  Ом. Абсолютная погрешность плеча сравнения

$$\Delta R = \pm (0,0005R + 0,005) \text{ Ом.}$$

Относительная погрешность плеч отношений не превышает

$$\Delta A/A = \Delta B/B \approx 0,025\%.$$

## 3.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 4.1. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

#### Измерение сопротивления мостиком Уитстона

1. Собрать схему мостика Уитстона.
2. Подвижной контакт установить посередине реохорда. При равенстве плеч ( $l_1 = l_2$ ) точность измерения наибольшая.

3. Подобрать сопротивление  $R$  магазина так, чтобы ток через гальванометр прекратился.  
В начале подбора ключ  $K$  замыкают кратковременно. Если стрелка значительно отклонилась от нулевого положения, то ключ размыкают, изменяют сопротивление магазина и вновь замыкают ключ. Если уравнивание моста не удастся осуществить подбором сопротивления  $R$ , то окончательное уравнивание осуществляют небольшим перемещением ползунка реохорда. Разомкнуть ключ. Значение  $l_1$  и  $l_2$  реохорда и сопротивления  $R$  записать в табл. 1.
4. Немного изменить сопротивление магазина (на 3–5%) в обе стороны от ранее установленного значения и перемещением ползунка реохорда в каждом случае вновь уравновесить мост.
5. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений

№ опыта	$l_1$	$l_2$	$R$	$R_x$
1				
2				
3				

### Измерение сопротивлений мостом МВЛ-49

На мосте МВЛ-49 проводят измерение двух сопротивлений (предыдущего и нового) по отдельности и при последовательном и параллельном их включении. Для этого:

1. К зажимам Б, Г и Х моста подключить соответственно батарею, гальванометр и измеряемое сопротивление.
2. Установить штепселя плеч сравнения первоначально в положение

$$\frac{A}{B} = \frac{100 \text{ Ом}}{100 \text{ Ом}} = 1.$$

3. Нажать ключ  $K_1$  батареи, а затем кратковременно — ключ  $K_2$  гальванометра. Изменением сопротивления рычажного магазина (плеча сравнения) уравнивают мост. Изменение сопротивления производят при разомкнутых ключах. Ключи размыкают в обратной последовательности: сначала  $K_2$ , а затем  $K_1$ . Если пределов рычажного магазина не хватает для уравнивания моста, изменить первоначальное соотношение плеч сравнения.

#### 4. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений

	$A/B$	$R_{\text{маг}}$	$R_{1x}$	$R_{x \text{ пар}}$	$R_{x \text{ посл}}$
Сопротивление $R_1$				—	—
Сопротивление $R_2$				—	—
Параллельное соединение			—		—
Последовательное соединение			—	—	

### 4.2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным табл. 1 записать окончательный результат измерения:

$$R_x = \bar{R}_x \pm \Delta R_x; \quad \varepsilon = (\Delta R_x / R_x) \cdot 100\%,$$

где  $\Delta R_x$  — абсолютная погрешность измерения;  $t_\alpha(n)$  — коэффициент Стьюдента;  $S$  — средняя квадратичная погрешность серии измерений:

$$\Delta R_x = t_\alpha(n) \cdot S; \quad t_\alpha(n) = t_{0,95}(3) = 4,3; \quad S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta R_x)^2}{n(n-1)}}.$$

2. По данным табл. 2 и сведениям о погрешностях, приведенным при описании моста МВЛ-49, записать окончательный результат измерений:

$$R_1 = R_{1x} \pm (R_{1x} + 10) \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}; \quad \varepsilon = (R_{1x} + 10) / R_{1x} \cdot 5 \cdot 10^{-4};$$

$$R_2 = R_{2x} \pm (R_{2x} + 10) \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}; \quad \varepsilon = (R_{2x} + 10) / R_{2x} \cdot 5 \cdot 10^{-4};$$

$$R_{\text{пар}} = R_{x \text{ пар}} \pm \Delta R_{\text{пар}}; \quad \varepsilon_{\text{пар}} = \quad, \%;$$

$$R_{\text{посл}} = R_{x \text{ посл}} \pm \Delta R_{\text{посл}}; \quad \varepsilon_{\text{посл}} = \quad, \%;$$

где

$$\varepsilon = \Delta R / R + \Delta A / A + \Delta B / B = (R + 10) / R \cdot 5 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-4}.$$

3. Рассчитать  $R'_{\text{пар}}$  и  $R'_{\text{посл}}$  по формулам:

$$R'_{\text{пар}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad R'_{\text{посл}} = R_1 + R_2$$

и сравнить с результатом п.2 (попадание расчетных значений в доверительный интервал экспериментальных).

4. Сравнить относительную погрешность измерения  $R_1$  мостиком Уитстона и мостом МВЛ-49.

### **3.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Преимущества и недостатки омметров.
2. Преимущества и недостатки метода вольтметра и амперметра.
3. Основное преимущество мостового метода.
4. Почему схема называется мостовой?
5. Сформулируйте правила Кирхгофа.
6. Выведите соотношение (10) для измерения сопротивления по методу уравнивания моста.
7. Докажите, что наименьшая погрешность в мостике Уитсона достигается при  $l_1 = l_2$ .

## **4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ИСТОЧНИКА ТОКА КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ»**

### **4.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучение компенсационного метода измерения электрических величин (ЭДС, токов, сопротивлений) на примере измерения ЭДС источника тока.

### **4.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ**

Исследуемый и эталонный гальванические элементы; батарея аккумуляторов; реохорд; гальванометр; переключатели.

### **4.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

В природе существует большое число химических, атомных, фотоэлектрических и других процессов, сопровождающихся разделением зарядов, т. е. возникновение ЭДС. Поэтому измерение малых ЭДС маломощных источников является не только самоцелью, но в ряде случаев и важным средством изучения явлений природы.

Если, например, опустить в раствор электролита два электрода, изготовленные из различных материалов, образуется гальванический элемент, ЭДС которого зависит от того, какие химические реакции протекают в области контакта раствора электролита с электродом. Отсюда измерение ЭДС гальванического элемента может дать сведения о протекающих в нем химических процессах.

Необходимо отметить, что измерение ЭДС с помощью вольтметра сопровождается ошибкой. Действительно, вольтметр, хотя и обладает сравнительно высоким сопротивлением, потребляет некоторый ток.

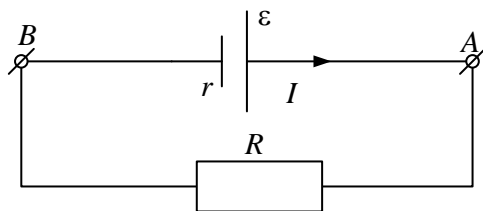
На рис. 1 вольтметр, измеряющий ЭДС источника, представлен эквивалентным внешним сопротивлением  $R$ . Согласно II правилу Кирхгофа,

$$IR + Ir = \varepsilon.$$

Поэтому вольтметр, подключенный к зажимам источника тока для измерения его ЭДС, показывает

$$U = IR = \varepsilon - Ir,$$

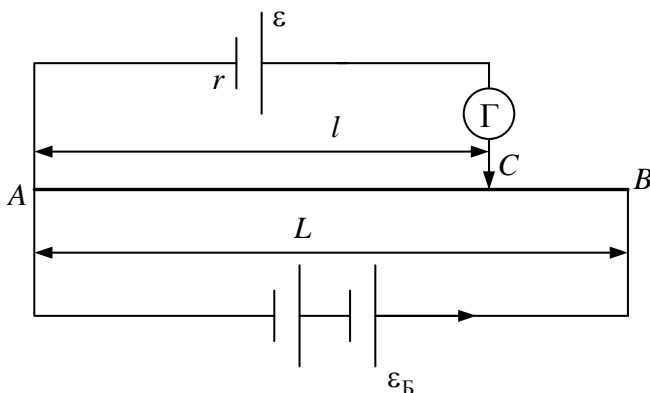
т. е. напряжение, которое меньше ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника.



**Рис. 1.** Схема измерения ЭДС вольтметром

Отсюда видно, что измерение ЭДС вольтметром дает ошибку, которая тем больше, чем больше ток потребляет вольтметр и чем больше внутреннее сопротивление источника тока. Наиболее совершенным методом измерения ЭДС является *компенсационный метод*.

Идея компенсационного метода заключается в том, что в момент измерения от источника ЭДС не потребляется ток, и тогда напряжение на его зажимах равно ЭДС.



**Рис. 2.** Измерение ЭДС компенсационным методом

Компенсационный метод можно осуществить с помощью электрической схемы, изображенной на рис. 2.

Исследуемый источник тока  $\varepsilon$  и вспомогательная батарея  $\varepsilon_{\text{Б}}$  соединены одноименными полюсами в точке  $A$ . Батарею замыкают реохордом  $AB$ , который представляет собой однородную проволоку длиной  $L$  и сопротивлением  $R$ . Второй полюс исследуемого источника через гальванометр  $\Gamma$  присоединен к подвижному контакту  $C$  реохорда. Переме-

шая контакт, можно найти такую точку, когда ток через гальванометр равен нулю. Тогда

$$U_{AC} = \varepsilon,$$

т. е. ЭДС источника скомпенсировано напряжением между точками  $A$  и  $C$ .

Напряжение  $U_{AC}$  можно рассчитать по закону Ома:

$$U_{AC} = I r_{AC} = \frac{\varepsilon_B}{R + r} \cdot r_{AC} = \frac{\varepsilon_B}{R + r} \cdot \frac{R}{L} \cdot l. \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что при постоянных параметрах батареи  $\varepsilon_B$  и  $r$  измеряемая ЭДС связана простой зависимостью с длиной участка реохорда  $l$ , на котором происходит компенсация ЭДС. Приборы, устроенные таким образом, называются *потенциометрами постоянного тока*.

Наибольшая точность в измерении ЭДС достигается при использовании компенсационного метода и относительных измерений. В этом случае дополнительно вышеописанным методом измеряют ЭДС эталонного источника, которая известна с большой точностью:

$$\varepsilon_3 = \frac{E_B}{R + r} \cdot \frac{R}{L} \cdot l_3. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) находят ЭДС измеряемого источника:

$$\varepsilon = \varepsilon_3 \cdot \frac{l}{l_3}. \quad (3)$$

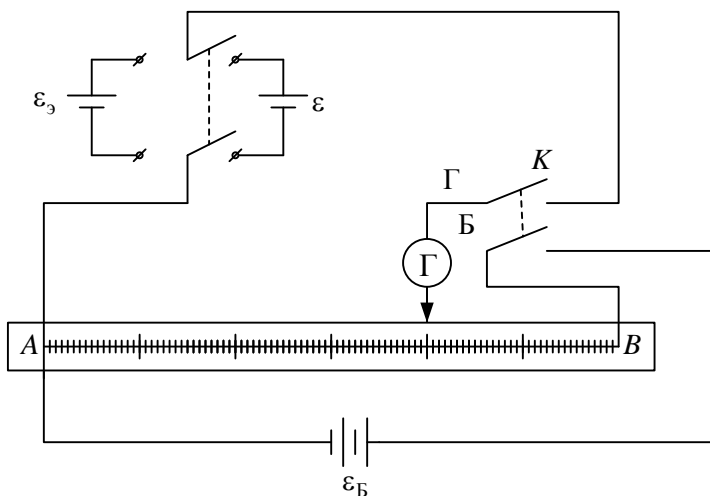
При относительных измерениях влияние старения вспомогательной батареи (изменения  $\varepsilon_B$  и  $r$ ) не сказывается на точности измерения.

## 4.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 4.1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В настоящей лабораторной работе относительные измерения ЭДС компенсационным методом проводятся с помощью схемы, приведенной на рис. 3.





**Рис. 3.** Схема лабораторной установки

Компенсация эталонной и измеряемой ЭДС проводится с помощью реохорда, проволока которого натянута на линейку с делениями (ноль линейки совпадает с точкой  $A$ ). Двойной ключ  $K$  устроен так, что при его включении сначала замыкаются контакты  $B$  цепи батареи, и только затем замыкаются контакты  $\Gamma$  цепи гальванометра. Такой порядок необходим для предохранения гальванометра от сильных токов, которые могут возникнуть при обратном порядке включения.

#### 4.2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Скомпенсировать ЭДС эталонного источника. Для этого перемещают подвижный контакт реохорда и, замыкая на короткое время двойной ключ, находят такое положение контакта, при котором гальванометр установится на нуле. Значение  $l_0$ , отсчитанное по положению подвижного контакта на шкале реохорда, занести в табл. 1.
2. Произвести компенсацию ЭДС исследуемого источника. Соответствующее значение  $l$  также занести в табл. 1.
3. Операции по пунктам 1 и 2 проделать еще два раза.

*Таблица 1*

**Результаты измерений**

№	$l_0$ , см	$l$ , см	$\bar{\varepsilon}$ , В	$\Delta\varepsilon/\bar{\varepsilon}$ , В	$\Delta\varepsilon$ , В	$\bar{\varepsilon} \pm \Delta\varepsilon$ , В
---	------------	----------	-------------------------	---	-------------------------	---

1						
2						
3						

### 4.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По измеренным значениям  $l_3$  и  $l$  рассчитать величины  $\bar{l}_3$  и  $\bar{l}$ .
2. По формуле (3), пользуясь средними значениями, рассчитать величину ЭДС исследуемого источника  $\bar{\varepsilon}$ .
3. Определить относительную погрешность

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\bar{\varepsilon}} = \frac{\Delta l_3}{\bar{l}_3} + \frac{\Delta l}{\bar{l}},$$

приняв  $\Delta l_3 = \Delta l$  равным делению шкалы реохорда.

4. Определить абсолютную погрешность  $\Delta\varepsilon$  и записать окончательный результат:

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} + \Delta\varepsilon, \text{ В}; \quad \frac{\Delta\varepsilon}{\bar{\varepsilon}} = \quad, \text{ \%}.$$

Примечание. Технические данные установки:  $\varepsilon_3 = 1,02 \text{ В}$ .

### 4.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте правила Кирхгофа.
2. Выведите закон Ома для замкнутой цепи.
3. Почему нельзя измерить ЭДС источника тока вольтметром?
4. В чем сущность компенсационного метода измерения ЭДС?
5. В чем преимущество относительного компенсационного измерения ЭДС?

## 5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 «ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЕСОВ»

### 5.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение магнитной индукции магнитного поля постоянного магнита с помощью аналитических весов.

### 5.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Постоянный магнит; аналитические весы; амперметр; реостат; источник постоянного тока; ключ; соединительные провода.

### 5.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Согласно закону, установленному Ампером, на элемент проводника  $d\vec{l}$  с током  $I$ , помещенный в магнитное поле, действует сила

$$d\vec{F} = I \left[ d\vec{l} \times \vec{B} \right], \quad (1)$$

где  $d\vec{F}$  — вектор силы, действующей на элемент тока ( $I d\vec{l}$ );  $I$  — сила тока в проводнике;  $d\vec{l}$  — элемент длины проводника;  $\vec{B}$  — вектор магнитной индукции в месте расположения элемента  $d\vec{l}$ .

Сила  $d\vec{F}$  называется *силой Ампера*. Она направлена, согласно векторному произведению (1), перпендикулярно к плоскости, в которой лежат векторы  $d\vec{l}$  и  $\vec{B}$ , так, чтобы вращение от  $d\vec{l}$  к  $\vec{B}$  происходило против часовой стрелки на наименьший угол, если смотреть с конца результирующего вектора  $d\vec{F}$ . Величину силы Ампера можно вычислить по формуле

$$dF = I dl B \sin \alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{B}$ .

Направление силы  $d\vec{F}$  удобно определять с помощью так называемого *правила левой руки*: если расположить левую руку так, чтобы вектор  $\vec{B}$  входил в ладонь, а четыре сложенные вместе пальца были направлены вдоль тока, то отставленный в сторону большой палец укажет направление силы Ампера.

Если проводник с током прямолинейный, а магнитное поле однородно и линии вектора  $\vec{B}$  перпендикулярны к проводнику, то формула (2) приобретает следующий вид:

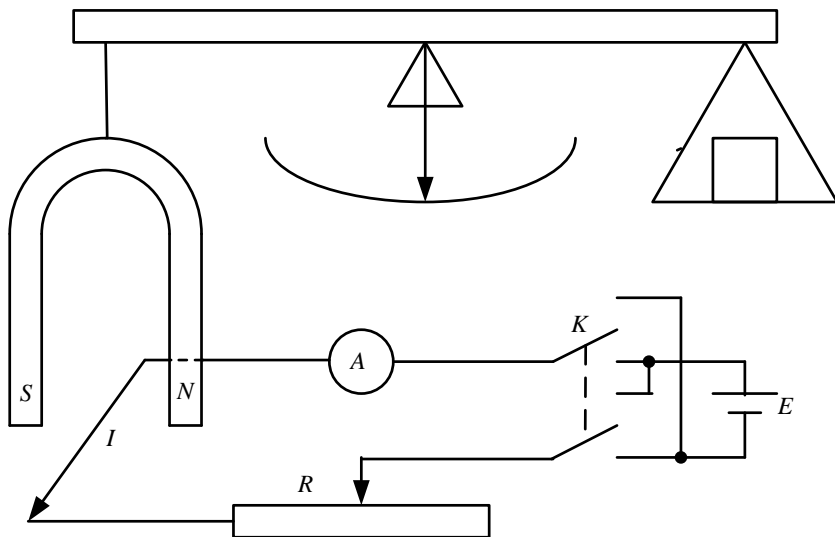
$$F = IlB. \quad (3)$$

Формулой (3) можно воспользоваться для определения магнитной индукции магнитного поля постоянного магнита.

## 5.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 4.1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Для нахождения силы  $F$  можно воспользоваться установкой, принципиальная схема которой показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Принципиальная схема установки

Одна из чашек аналитических весов заменена постоянным магнитом, между полюсами которого помещен прямолинейный проводник длиной  $l$ . При протекании по проводнику тока на проводник будет действовать сила Ампера. Равная и противоположная сила будет действовать на подковообразный магнит, как бы увеличивая его вес (при протекании тока в одном направлении) или уменьшая (при протекании тока в другом направлении).

Уравновесив весы, по величине уравновешивающего разновеса можно определить силу Ампера:

$$F_A = I_1 l B = \Delta m g. \quad (4)$$

На практике более удобно поместить на чашу весов известный разновес  $\Delta m$  и уравновесить весы регулировкой тока  $I_1$ , протекающего по проводнику. Для исключения возможной систематической погрешности тот же разновес помещается на другую чашу весов и снова весы уравновешиваются током  $I_2$ , протекающим в другом направлении:

$$F_A = I_2 l B = \Delta m g. \quad (5)$$

Сложив (4) и (5), получаем:

$$B = \frac{2\Delta m g}{(I_1 + I_2)l}. \quad (6)$$

## 4.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Аккуратно освободив арретир, проверьте, что аналитические весы находятся в равновесии при отсутствии тока в проводнике (в случае отсутствия равновесия обратитесь к лаборанту).
2. Положите на правую чашу весов разновес  $\Delta m_1 = 10$  мг, включите источник питания и уравновесьте весы регулировкой протекающего по проводнику тока  $I_1$ .

Повторите измерения для разновесов

$$\Delta m_2 = 20 \text{ мг}; \Delta m_3 = 30 \text{ мг}; \Delta m_4 = 40 \text{ мг}.$$

3. Эти же разновесы  $\Delta m_1, \Delta m_2, \Delta m_3, \Delta m_4$  последовательно уравновесьте на левой чаше весов регулировкой тока  $I_2$ , протекающего в обратном направлении по отношению к  $I_1$ . Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений

$\Delta m_i$ , мг	10	20	30	40
$I_1$				
$I_2$				
$B_i$				
$\Delta B_i$				

$\bar{B}$	
$\Delta B$	

### 4.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

По формуле (6) (где  $l = 2 \cdot 10^{-2}$  м) вычислить  $B_i$  для каждого значения  $\Delta m_i$ , а также среднее значение магнитной индукции  $\bar{B}$ .

Найти отклонения  $\Delta B_i$  результатов отдельных измерений от среднего и вычислить абсолютную погрешность результатов измерения:

$$\Delta B = t_{\alpha}(n) \cdot S,$$

где  $t_{\alpha}(n) = t_{0,95}(4) = 3,18$  — коэффициент Стьюдента;  $S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta B_i)^2}{n(n-1)}}$  —

средняя квадратичная погрешность серии измерений.

Записать окончательный результат в следующем виде:

$$B = (\bar{B} \pm \Delta B); \quad \varepsilon = \Delta B / \bar{B} \cdot 100\%.$$

### 5.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте закон Ампера.
2. Выведите формулу для вращательного момента, действующего на весы.
3. Почему не учитываются силы, действующие на вертикальные стороны рамки (если они будут находиться в поле магнита)?

## **6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ»**

### **6.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Ознакомление с принципом действия тангенс-гальванометра и методом измерения одного из важнейших параметров Земли — её магнитного поля.

### **6.2. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ**

Тангенс-гальванометр; амперметр; реостат; переключатель; источник постоянного тока; соединительные провода.

### **6.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

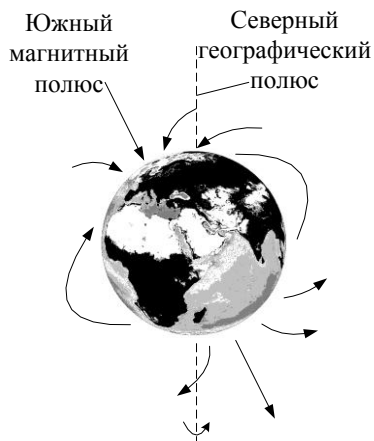
Земной шар представляет собой огромный постоянный магнит.

Магнитное поле Земли обнаруживается с помощью магнитной стрелки, которая может свободно вращаться вокруг своего центра тяжести. Такая стрелка располагается по направлению касательной к силовой линии магнитного поля в данном месте земной поверхности.

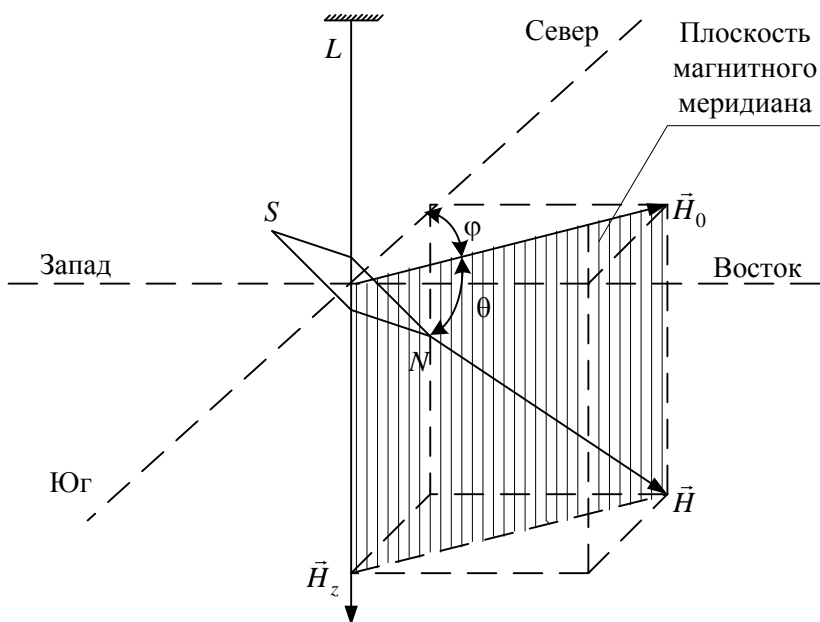
Изучение магнитного поля Земли с помощью магнитной стрелки показывает, что силовые линии поля имеют такой вид, как схематически показано на рис. 1.

Магнитные полюса Земли не совпадают с географическими полюсами, причем северный магнитный полюс находится недалеко от южного географического полюса, и наоборот. Плоскость, проходящая через магнитные полюса Земли и данную точку земной поверхности, называется *плоскостью магнитного меридиана*. В этой плоскости лежит вектор напряженности магнитного поля.

Если подвесить магнитную стрелку  $S\ N$  на нити  $L$  так, чтобы точка подвеса совпадала с центром тяжести стрелки и при этом не мешала вращению стрелки, то магнитная стрелка установится в плоскости магнитного меридиана по направлению вектора напряженности магнитного поля.



**Рис. 1.** Силовые линии магнитного поля Земли



**Рис. 2.** Магнитная стрелка в северном полушарии



На рис. 2 показано, как магнитная стрелка устанавливается в северном полушарии.

Видно, что географический меридиан не лежит в плоскости магнитного меридиана, а составляет с этой плоскостью угол  $\varphi$ , который называют *магнитным склонением*. Магнитное склонение для каждой точки земной поверхности указывается на топографических картах. Зная магнитное склонение, можно ввести поправку в показания компаса и найти точное направление географического меридиана.

Вектор напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  составляет в каждой точке земной поверхности угол  $\theta$  с горизонтом. Например, в северном полушарии северный конец магнитной стрелки всегда наклонен к Земле. Угол  $\theta$  называют *углом наклона*. Этот угол равен нулю на экваторе и возрастает до  $90^\circ$  при перемещении к магнитным полюсам.

Вектор напряженности магнитного поля Земли  $\vec{H}$  можно разложить на две составляющие: горизонтальную  $\vec{H}_0$  и вертикальную  $\vec{H}_z$ .

Горизонтальную составляющую магнитного поля Земли  $\vec{H}_0$ , магнитное склонение  $\varphi$  и наклонение  $\theta$  называют *элементами земного магнетизма*. Зная все элементы земного магнетизма, можно определить величину и направление вектора напряженности магнитного поля в данной точке земной поверхности.

Элементы земного магнетизма плавно изменяются при переходе от одной точки земной поверхности к другой. Если же наблюдаются нарушения в этом плавном изменении, то говорят, что в данной местности наблюдается *магнитная аномалия*. Аномалии связаны с большими залежами магнитных руд, например Курская магнитная аномалия.

Напряженность магнитного поля Земли сравнительно невелика, однако наличие земного магнетизма проявляется существенным образом в целом ряде географических и других явлений. К таким явлениям относятся полярные сияния и захват заряженных частиц из космического пространства в своеобразные ловушки, которые называют радиационными полями Земли. Некоторые биофизические эксперименты позволяют предполагать, что пространственная ориентация птиц при дальних сезонных перелетах связана с их способностью ощущать направление магнитных силовых линий.

## 6.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 4.1. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

В настоящей работе описан один из способов измерения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. Он основан на взаимодействии магнитных полей с магнитной стрелкой, которая может свободно вращаться только вокруг вертикальной оси. Поэтому такая стрелка будет устанавливаться в плоскости магнитного меридиана под действием только горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

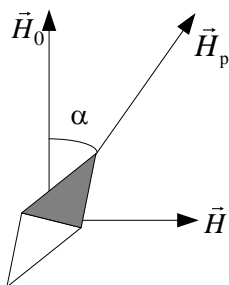


Рис. 3. К определению  $\vec{H}_0$

На рис. 3 схематически вектором  $\vec{H}_0$  обозначена горизонтальная составляющая магнитного поля Земли. В направлении этого вектора в данном месте Земли и устанавливается магнитная стрелка. Для определения величины  $\vec{H}_0$  в месте, где находится магнитная стрелка, необходимо создать искусственное дополнительное поле  $\vec{H}$ , перпендикулярное плоскости магнитного  $\vec{H}_0$  меридиана, напряженность которого должна быть известна. Векторы  $\vec{H}_0$  и  $\vec{H}$  при сложении дадут результирующую напряженность  $\vec{H}_p$ , по направлению которой и установится магнитная стрелка. Для краткости примем в дальнейшем  $H = |\vec{H}|$ ;  $H_0 = |\vec{H}_0|$ .

Из рис. 3 следует, что угол  $\alpha$ , на который отклонится стрелка от плоскости магнитного меридиана, связан с напряженностью полей  $H_0$  и  $H$  следующим соотношением:

$$H/H_0 = \operatorname{tg} \alpha.$$

Так как напряженность поля  $H$  известна, то из этого соотношения можно найти величину горизонтальной составляющей магнитного поля Земли:

$$H_0 = \frac{H}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (1)$$

Поле  $\vec{H}$  создается с помощью катушки, витки которой расположены в плоскости магнитного меридиана, а магнитная стрелка помещается в центре такой катушки. Применение закона Био–Савара–Лапласа показывает, что если по катушке, состоящей из  $N$  витков провода, проходит ток  $I$ , то в центре, перпендикулярно виткам катушки, возникает магнитное поле, напряженность которого

$$H = \frac{NI}{2r}, \quad (2)$$

где  $r$  — радиус витков катушки.

Подставив в формулу (1) выражение для  $H$ , получим

$$H_0 = \frac{NI}{2r \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (3)$$

Формула (3) справедлива только в том случае, если катушка с током создает однородное магнитное поле в том месте, где расположена магнитная стрелка. Это условие приближенно выполняется, если радиус катушек велик по сравнению с размерами стрелки.

Для определения  $H_0$  на основе изложенных соображений применяют прибор, который называется *тангенс-гальванометром*.

В этом приборе на стойке жестко укреплено кольцо, на котором намотано несколько витков провода. В центре кольца помещена так называемая буссоль, представляющая собой компас с круговой шкалой, разделенной на угловые градусы. Отсчет угла поворота стрелки осуществляется с помощью визирного устройства.

Для создания дополнительного магнитного поля тангенс-гальванометр снабжен источником постоянного тока, реостатом с амперметром, с помощью которых через катушку прибора можно пропустить необходимый ток.

Если после установки прибора в плоскости магнитного меридиана через катушку пропустить ток известной величины, то магнитная стрелка отклонится на некоторый угол. Измерив этот угол и силу тока, по фор-

муле (3) можно вычислить горизонтальную составляющую вектора напряженности магнитного поля Земли. Значения  $N$  и  $r$  постоянны для каждого прибора и указаны на приборе.

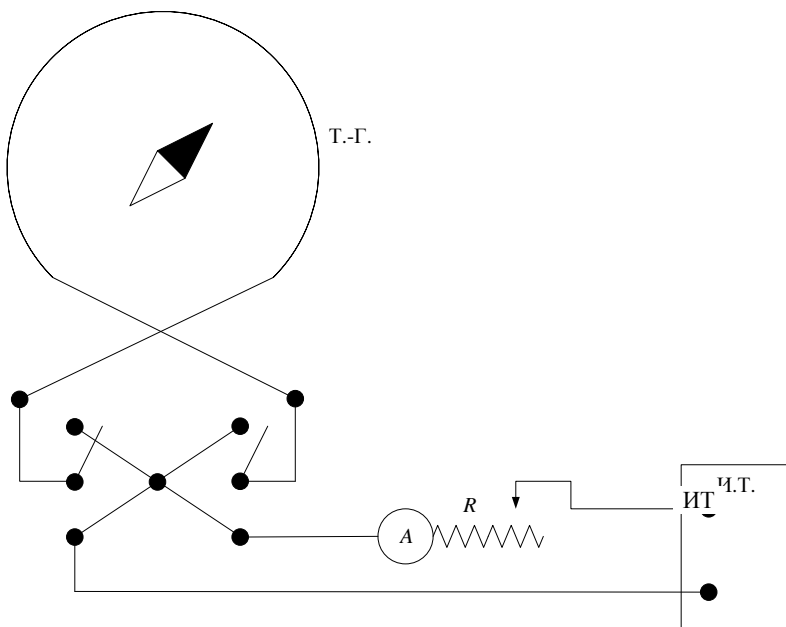
Анализ формулы (3) показывает, что наименьшая погрешность в определении  $H_0$  будет в том случае, если угол отклонения стрелки  $\alpha$  близок к  $45^\circ$ . Неточности в установке катушки прибора в плоскости магнитного меридиана и ошибки измерения, связанные с трением стрелки, можно устранить, изменив с помощью переключателя направление тока в катушке и беря среднее значение углов отклонения стрелки вправо и влево.

## 4.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать электрическую схему, как показано на рис. 4.  
В схеме приняты следующие обозначения: Т.-Г. — тангенс-гальванометр; П — переключатель, с помощью которого можно изменять направление тока в катушке прибора; А — амперметр;  $R$  — реостат; ИТ — источник постоянного тока.
2. Поворачивая тангенс-гальванометр и компас, устанавливают плоскость катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана так, чтобы один конец стрелки совпал с  $0^\circ$ .
3. Замыкают переключатель П и с помощью реостата  $R$  подбирают такую силу тока, чтобы стрелка компаса отклонилась на угол  $35\text{--}40^\circ$ . Значение силы тока и угла отклонения записывают в табл. 1.
4. Не меняя величины тока, изменяют переключателем его направление и измеряют величину отклонения стрелки — угол  $\alpha_2$ .
5. Указанные измерения повторяют еще два раза, подбирая с помощью реостата такую силу тока, чтобы при втором измерении угол отклонения стрелки составлял примерно  $45^\circ$ , а при третьем измерении — несколько более  $45^\circ$ .

## 4.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

По найденным значениям  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  вычисляют среднюю величину угла отклонения  $\alpha_{\text{ср}}$  каждого опыта и находят соответствующие значения  $\text{tg}\alpha$ . Пользуясь полученными данными, по формуле (3) вычисляют  $H_0$  для каждого опыта, а затем среднюю величину горизонтальной составляющей магнитного поля Земли  $\vec{H}_0$ .



**Рис. 4.** Принципиальная схема измерения  $\vec{H}_0$

Далее находят отклонения  $\Delta H_i$  результатов отдельных измерений от среднего и рассчитывают абсолютную погрешность измерения по формуле

$$\Delta H_0 = t_\alpha(n) \sqrt{\frac{\sum (\Delta H_{0i})^2}{n(n-1)}},$$

где  $n = 3$ ;  $t_\alpha(n) = t_{0,95}(3) = 4,3$  — коэффициент Стьюдента.

Окончательный результат измерения должен быть представлен в виде

$$H_0 = \bar{H}_0 \pm \Delta H_0 \text{ [А/м]}; \varepsilon = \frac{\Delta H_0}{\bar{H}_0}, \%$$

*Таблица 1*

**Результаты измерений**

№ измер.	Углы отклонения	$\alpha_{\text{ср.}}$	$\text{tg} \alpha$	$H_0$ , А/м	$\Delta H_{0i}$ , А/м	$\bar{H}_0$ , А/м
----------	-----------------	-----------------------	--------------------	-------------	-----------------------	-------------------

	$\alpha_1$ , град.	$\alpha_2$ , град.	град.				

## 6.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими величинами характеризуется магнитное поле Земли у её поверхности?
2. В чем состоит идея определения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли?
3. Как вычисляется напряженность магнитного поля в центре витка с током?

## 7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ»

### 7.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с принципом работы баллистического гальванометра и изучение баллистического метода магнитных измерений.

### 7.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Постоянный магнит; баллистический гальванометр; измерительная катушка.

### 7.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

**Принцип работы баллистического гальванометра.** Баллистический гальванометр является разновидностью гальванометра магнитоэлектрической системы. Схема гальванометра магнитоэлектрической системы приведена на рис. 1. Подвижная рамка 1, состоящая из  $N$  прямоугольных витков, подвешена на растяжках 2 между полюсами магнита 3. На одной из растяжек закреплено зеркальце 4. Полюсные наконечники 5 и цилиндр 6 (из мягкого железа) позволяют получить в зазоре между полюсами и цилиндром, где вращается рамка, практически радиальное магнитное поле. Измеряемый ток подводится к рамке через растяжки. Возникает вращающий момент

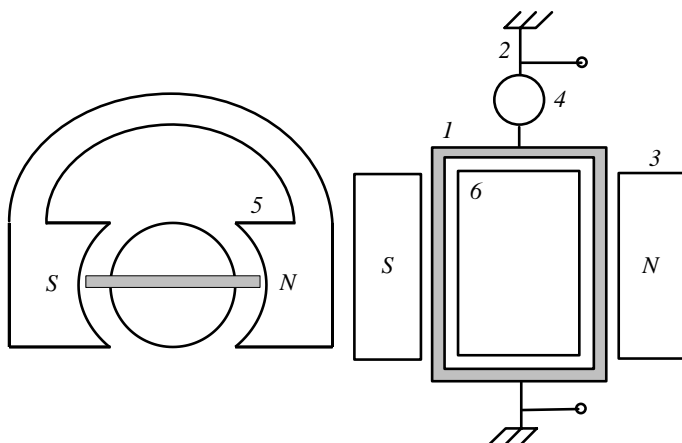
$$\vec{M} = N [\vec{P}_m \times \vec{B}], \quad (1)$$

где  $\vec{B}$  — индукция магнитного поля в воздушном зазоре;  $P_m = IS$  — магнитный момент рамки с током;  $S$  — площадь витка.

По модулю  $M = NISB \sin \alpha$  остается постоянным при повороте рамки, так как все величины, в том числе  $\sin \alpha = 1$ , постоянны. Рамка остановится в положении, когда вращающий момент будет уравновешен моментом упругих сил растяжек:

$$NISB = D\varphi, \quad (2)$$

где  $D$  — момент сил кручения на единицу угла поворота;  $\varphi$  — угловое отклонение рамки, определяемое по отклонению светового луча, падающего на зеркальце.



**Рис. 1.** Схема гальванометра магнитоэлектрической системы

Тогда

$$\varphi = \frac{NSB}{D} I = CI, \quad (3)$$

т. е. угол поворота пропорционален величине измеряемого тока, где  $C = NSB/D$  — чувствительность прибора.

При работе с гальванометром имеет значение не только его чувствительность, но и характер движения подвижной части. Рамка на растяжках — это механическая колебательная система. При разомкнутой рамке уравнение движения (2-й закон Ньютона) имеет следующий вид:

$$J\ddot{\varphi} = -D\varphi, \quad (4)$$

где  $J$  — момент инерции рамки.

Тогда период собственных колебаний

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{J}{D}}. \quad (5)$$

Баллистический гальванометр применяется для измерения количества электричества, протекающего по цепи, содержащей рамку, за промежуток времени  $\tau$ , малый по сравнению с периодом собственных колебаний рамки  $T_0$ . Момент инерции  $J$  баллистического гальванометра искусственно увеличивают так, чтобы период собственных колебаний  $T_0$  был порядка 10–15 с. Тогда за время протекания импульса тока  $t \leq \tau$  рамка не



успевает выйти из положения равновесия, и уравнение движения имеет вид

$$J\ddot{\phi} = NBSI, \quad (6)$$

откуда

$$NBS \int_0^{\tau} I dt = NBSq = J\dot{\phi}. \quad (7)$$

При этом рамка приобретает кинетическую энергию

$$W = \frac{1}{2} J\dot{\phi}^2. \quad (8)$$

Эта энергия тратится на закручивание подвеса на угол  $\phi$ :

$$\frac{1}{2} J\dot{\phi}^2 = \frac{1}{2} D\phi^2. \quad (9)$$

Из уравнения (9) с учетом (7) получаем:

$$\phi = \frac{NBS}{\sqrt{JD}} q = bq, \quad (10)$$

где  $b = \frac{NBS}{\sqrt{JD}}$  — баллистическая постоянная прибора.

То есть первый баллистический отброс рамки  $\phi$  пропорционален количеству электричества  $q$ , протекающего через нее. Название «баллистический отброс» произошло из электромеханической аналогии. Баллистика — наука о движении артиллерийских снарядов. Импульс тока, сообщая рамке угловую скорость  $\dot{\phi}$  (уравнение (7)), действует подобно взрыву пороха, сообщаящего снаряду скорость  $V$ . Далее снаряд движется по баллистической кривой, а рамка «баллистически» закручивается на угол  $\phi$ .

**Принцип баллистического метода измерений.** В данной работе используется предложенный А. Г. Столетовым и ставший классическим *баллистический метод*. Сущность метода заключается в следующем. Баллистический гальванометр включается в цепь катушки, помещенной в магнитное поле, индукция  $B$  которого подлежит измерению. Размеры измерительной катушки определяются степенью неоднородности поля. Чем неоднороднее поле, тем меньше должна быть катушка.

Магнитный поток через катушку

$$\Phi = BSN, \quad (11)$$

где  $S$  — площадь одного витка катушки;  $N$  — число витков;  $\alpha$  — угол между вектором  $\vec{B}$  и нормалью к плоскости витка.

При изменении магнитного потока через измерительную катушку в ней возникает ЭДС электромагнитной индукции

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (12)$$

Кроме того, поскольку сила тока не остается постоянной, в цепи катушки и гальванометра возникает ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_s = -\frac{LdI}{dt}, \quad (13)$$

где  $L$  — индуктивность цепи.

Запишем II правило Кирхгофа для цепи:

$$RI = -\frac{d\Phi}{dt} - L\frac{dI}{dt}, \quad (14)$$

где  $R$  — активное сопротивление измерительной катушки и рамки гальванометра.

Проинтегрируем выражение (14) за время  $\tau$  прохождения импульса индукционного тока:

$$R \int_0^{\tau} Idt = \Delta\Phi - L(I_{\text{кон}} - I_{\text{нач}}), \quad (15)$$

или

$$Rq = \Delta\Phi, \quad (16)$$

где учтено, что  $I_{\text{кон}} = I_{\text{нач}} = 0$ .

Отсюда следует, что при изменении магнитного потока через измерительную катушку на величину  $\Delta\Phi$  в цепи гальванометра пройдет количество электричества:

$$q = \frac{\Delta\Phi}{R}. \quad (17)$$

Отброс баллистического гальванометра пропорционален количеству протекающего через него электричества, если время протекания заряда мало по сравнению с периодом гальванометра (формула (10)). По измеренной величине отброса можно определить величину изменения магнитного потока (формула (17)), а затем — индукцию магнитного поля.

## 7.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 4.1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

Баллистический метод измерений применен для измерения индукции в зазоре между полюсами постоянного магнита 1. Плоскость измерительной катушки 2 параллельна плоскости полюсов магнита. Катушка соединена с баллистическим гальванометром 3.

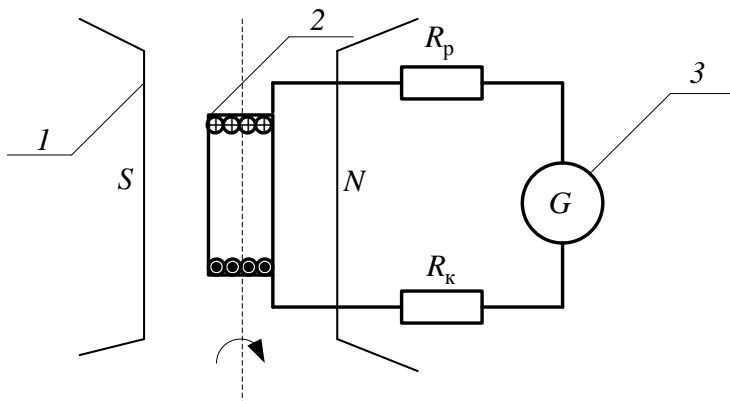


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Проще всего контролируемое изменение магнитного потока можно получить поворотом катушки на  $180^\circ$ . Тогда

$$\Delta\Phi = 2\Phi = 2BNS. \quad (18)$$

В соответствии с (17):

$$2BNS = qR; \quad (19)$$

$$B = \frac{qR}{2NS}. \quad (20)$$

Величина заряда  $q$  отсчитывается по баллистическому отбросу  $m$  в делениях шкалы:

$$q = m/b, \quad (21)$$

где  $b$  — баллистическая постоянная прибора.

Тогда

$$B = \frac{R}{2NSb} m. \quad (22)$$

Следует заметить, что измеренная индукция в зазоре равна индукции в веществе магнита, поскольку поле, пересекая границу раздела, имеет только нормальные составляющие, а нормальные составляющие индукции не изменяются.

## 4.2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Установить измерительную катушку посередине между полюсами магнита так, чтобы её плоскость была параллельна плоскости полюсов.
2. Быстро повернув катушку на  $180^\circ$ , визуально зафиксировать максимальный баллистический отброс «зайчика» гальванометра  $m$  (в делениях шкалы).
3. Повторить измерения 10 раз. Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений

$i$ (номер измерения)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m_i$ -й отброс в делениях шкалы										

## 4.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Определить среднее значение баллистического отброса:

$$\bar{m} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{i=10} m_i.$$

2. Вычислить среднее значение магнитной индукции:

$$\bar{B} = \frac{R}{2NSG} \bar{m}.$$

3. Определить относительную погрешность измерения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta m}{\bar{m}}.$$

В данном случае  $\Delta N = 0$  — число витков катушки точно известно;  $\Delta b = 0$  — постоянная гальванометра также точно известна;  $\Delta S / S = 2\Delta d / d$ ;  $\Delta d = 0,1$  мм — измерение диаметра катушки производит-

ся штангенциркулем;  $\Delta R/R \approx 0,01$  — определяется классом прибора для измерения сопротивления;  $\Delta m = 1$  — принимается равной цене деления шкалы прибора.

Тогда

$$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} \cong \frac{\Delta m}{\bar{m}},$$

так как  $\Delta m/\bar{m}$  более чем вдвое превышает суммарный вклад  $\Delta S/S$  и  $\Delta R/R$ .

4. Определить абсолютную погрешность

$$\Delta B = \varepsilon \bar{B}.$$

5. Записать окончательный результат, соблюдая правила округлений:

$$B = \bar{B} \pm \Delta B; \quad \varepsilon = \quad, \quad \%,$$

Примечание. Технические данные приведены на установке:  $N$  — число витков измерительной катушки;  $S$  — площадь витка;  $R = R_k + R_p$  — сопротивление измерительной катушки и рамки гальванометра;  $b$  — баллистическая постоянная гальванометра.

## 7.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Записать выражение для вращающего момента, действующего на контур с током в однородном магнитном поле. Как достигается радиальное магнитное поле в гальванометре магнитоэлектрической системы.
2. Условие равновесия рамки при протекании тока через гальванометр.
3. Главные особенности баллистического гальванометра.
4. Сущность баллистического метода измерения индукции.
5. Сформулировать закон электромагнитной индукции. Когда возникает взаимная индукция и когда самоиндукция в баллистическом методе?
6. Показать, что индукция  $B$  в средней части длинной и узкой щели, сделанной в твердом ферромагнетике, равна  $\mu_0 H$ , где  $H$  — напряженность поля в ферромагнетике, если эта щель параллельна полю, и что  $B$  равна индукции в ферромагнетике, если щель перпендикулярна  $\vec{B}$  ( $B = |\vec{B}|$ ;  $H = |\vec{H}|$ ).

## 8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ»

### 8.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение метода определения индукции магнитного поля измерительным генератором.

### 8.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Источник питания УИП; электромагнит; двигатель; миллиамперметр; вращающаяся рамка с коллектором.

### 8.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Изучение магнитного поля, создаваемого различными проводниками с током, является основной задачей магнитостатики. Главная характеристика магнитного поля — это магнитная индукция  $\vec{B}$ , определяющая силу, действующую на помещаемые в магнитное поле проводники с током. Поэтому  $\vec{B}$  называют *силовой характеристикой магнитного поля*. Существует несколько методов определения  $\vec{B}$ . В данной работе изучается метод измерительного генератора и применяется к определению магнитного поля электромагнита и его зависимости от тока электромагнита.

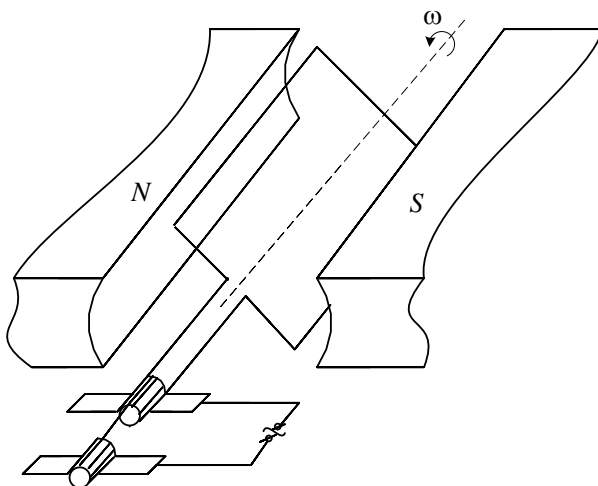
На рис. 1 приведена схема индукционного генератора. Проводник в форме прямоугольной рамки помещен в магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  и вращается двигателем с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . В рамке возникает ЭДС электромагнитной индукции, по закону Фарадея пропорциональная скорости изменения потока магнитной индукции через плоскость рамки:

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Величина потока магнитной индукции

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}, \quad (2)$$

где  $S$  — площадь рамки.



**Рис. 1.** Схема индукционного генератора

В простейшем случае однородного поля

$$\Phi = \vec{B}\vec{S} = BS \cos(\vec{B}, \vec{n}). \quad (3)$$

Здесь  $\vec{n}$  — нормаль к плоскости рамки. Так как угол  $(\vec{B}, \vec{n})$  есть угол  $\varphi$  поворота рамки, то

$$\Phi = BS \cos \varphi = BS \cos \omega t. \quad (4)$$

Подставим (4) в (1):

$$\varepsilon_1 = -d(BS \cos \omega t)/dt = BS\omega \sin \omega t.$$

Поскольку рамка состоит из  $N$  витков, то ЭДС индукции будет складываться из электродвижущих сил, возникающих в отдельных витках:

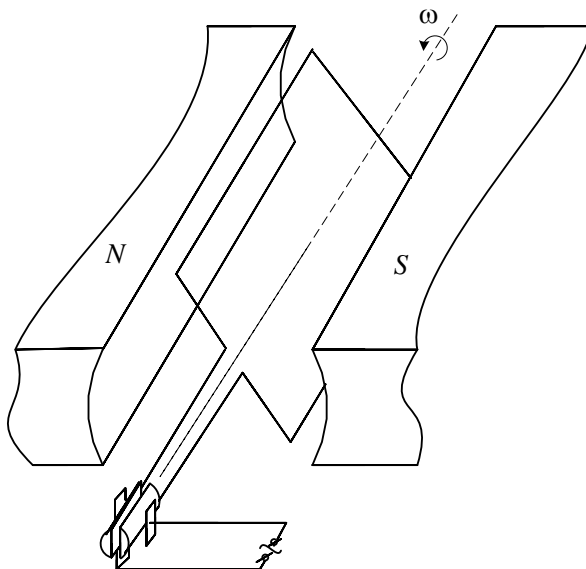
$$\varepsilon = \varepsilon_1 N = NBS\omega \sin \omega t = \varepsilon_{\max} \sin \omega t,$$

где

$$\varepsilon_{\max} = NBS\omega. \quad (5)$$

По данному принципу строятся достаточно мощные генераторы переменного и постоянного тока, используемые в качестве источников электрической энергии. В нашем случае преследуется другая цель. Из (5) следует, что, зная параметры рамки  $N$  и  $S$ , угловую скорость её вращения  $\omega$  и измерив  $\varepsilon_{\max}$ , можно определить индукцию  $B$  в том месте, ку-

да помещена рамка. Чем меньше будут размеры рамки, тем точнее с её помощью можно исследовать структуру неоднородного магнитного поля. Ясно, что такой генератор будет давать незначительную мощность, и в этом случае называется *измерительным генератором*.



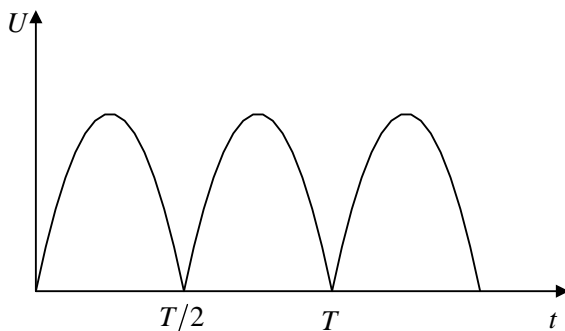
**Рис. 2.** Схема индукционного генератора с двумя полукольцами

Для измерения  $\varepsilon_{\max}$  в работе применен прибор магнитоэлектрической системы. Приборы этой системы не имеют себе равных по чувствительности и малому собственному потреблению мощности, что важно в случае измерительного генератора. Но приборы этой системы измеряют постоянный ток, поэтому ЭДС генератора необходимо выпрямить.

Если концы обмотки (многовитковой рамки) соединить не с отдельными кольцами, как на рис. 1, а с двумя полукольцами, как на рис. 2, то получим схему генератора постоянного тока, коллектор (полукольца) которого выполняет роль двухполупериодного выпрямителя. Форма напряжения на зажимах (полукольцах) приведена на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что напряжение не постоянно, и поэтому магнитоэлектрический прибор будет измерять среднее значение выпрямленного напряжения.





**Рис. 3.** Форма напряжения на полукольцах

Среднее значение  $\bar{A}$  любой изменяющейся во времени физической величины  $A(t)$  определяется так:

$$\bar{A} = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt,$$

где  $T$  — время усреднения.

В данном случае

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= NBS\omega \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \sin \omega t dt = NBS\omega \frac{2}{T} \frac{1}{\omega} [-\cos \omega t]_0^{T/2} = \\ &= NBS \frac{4}{T} = 4NBSn, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $n = 1/T$  — частота вращения рамки.

В качестве магнитоэлектрического прибора выбран микроамперметр, показывающий

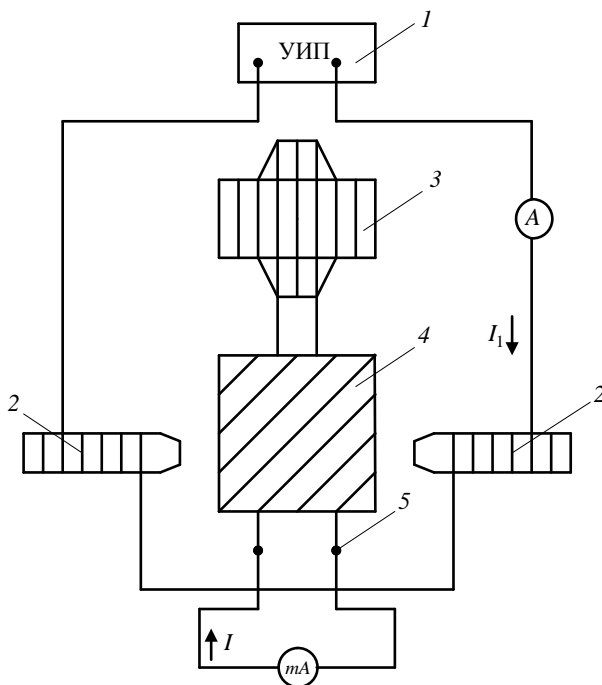
$$I = \bar{I} = \bar{\varepsilon}/r, \quad (7)$$

где  $r$  — эквивалентное сопротивление электрической цепи (параметр, указанный в технических данных установки).

Из (6) с учетом (7) получаем:

$$B = \frac{Ir}{4NSn} = \gamma I, \quad (8)$$

где  $\gamma = \frac{r}{4NSn}$  — постоянная измерительного генератора.



**Рис. 4.** Схема установки:

$I$  — УИП (универсальный источник питания), амперметр на 10 А расположен на лицевой панели УИПа; 2 — электромагнит; 3 — электрический двигатель; 4 — измерительная рамка; 5 — коллектор

## 8.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 4.1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки приведена на рис. 4.

### 4.2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Изменяя величину напряжения источника, питающего электромагнит, установить величину тока, равную 0,5 А.
2. Измерить и записать в табл. 1 значение тока в цепи измерительного генератора.
3. Равномерно (через 0,5 А) увеличивать ток электромагнита до значений, приводящих к насыщению тока измерительного генератора.
4. Соответствующие значения токов занести в табл. 1.

Результаты измерений

$I_1, \text{A}$	0,5	1,0	1,5	2
$I \cdot 10^{-3}, \text{A}$				
$B, \text{Тл}$				

### 4.3. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

По формуле (8) рассчитать значение магнитной индукции для экспериментальных точек и занести в таблицу.

Построить график зависимости магнитной индукции от величины тока электромагнита.

Примечание. Технические данные приведены на установке:  $N$  — число витков рамки генератора;  $S$  — площадь витка;  $n$  — частота вращения рамки;  $r$  — эквивалентное сопротивление электрической цепи.

### 8.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте закон электромагнитной индукции Фарадея.
2. Определение потока магнитной индукции.
3. Принцип работы индукционного генератора.
4. Назначение коллектора в генераторе.
5. Назначение измерительного генератора и его особенности.
6. Особенности измерительных приборов электромагнитной системы.
7. Как определяется среднее значение физической величины?

## 9. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 «СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧЕНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА»

### 9.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение динамической петли магнитного гистерезиса; снятие кривой намагничения и определение основных характеристик ферромагнетика — остаточной индукции, коэрцитивной силы, максимальной магнитной проницаемости, потерь энергии при перемагничении.

### 9.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Источник питания переменного тока; осциллограф; исследуемый материал.

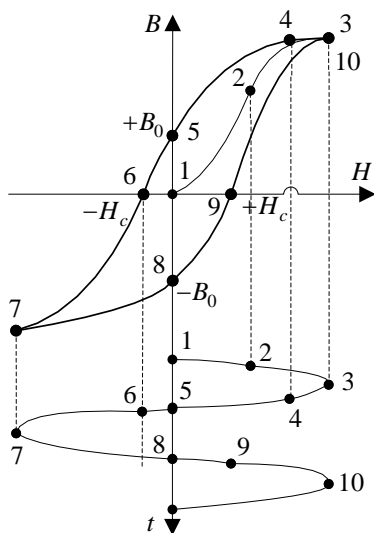
### 9.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Зависимость магнитной индукции  $B$  в ферромагнетике от напряженности  $H$  периодически меняющегося во времени внешнего магнитного поля представляет собой замкнутую кривую, которую называют *динамической петлей магнитного гистерезиса*, представленную на рис. 1.

В начале первого цикла, при увеличении поля  $H$  от нуля до максимума, индукция  $B$  изменяется по кривой 1–2–3, называемой *основной кривой намагничения*. Затем, при уменьшении поля от максимума до нуля, индукция  $B$  уменьшается не по основной кривой намагничения, а по кривой 3–4–5, как бы запаздывая (отставая) от уменьшающегося поля. Это явление запаздывания называется *магнитным гистерезисом*.

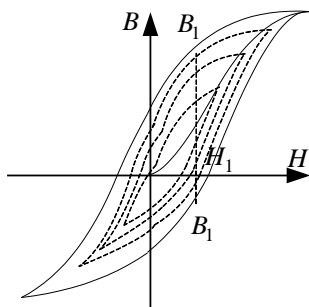
При поле равном нулю намагничение не исчезает и характеризуется величиной  $B_0$ , называемой *остаточной индукцией*.

Индукция  $B$  обращается в нуль лишь под действием поля  $H_c$ , направленного противоположно начальному. Напряженность  $H_c$  называется *коэрцитивной силой*. При периодическом изменении поля  $H$  индукция  $B$  изменяется в соответствии с кривой 3–4–5–6–7–8–9–3, т. е. описывает петлю гистерезиса.



**Рис. 1.** Динамическая петля магнитного гистерезиса

Основную кривую намагничения можно получить, уменьшая амплитуду переменного поля  $H$  до нуля. При этом вершины частичных петель гистерезиса лежат на основной кривой намагничения (рис. 2).



**Рис. 2.** Уменьшение частичных петель гистерезиса при уменьшении напряженности магнитного поля

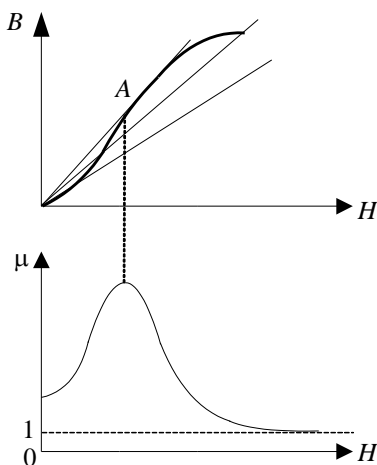
Гистерезис приводит к тому, что намагничение ферромагнетика не является однозначной функцией  $H$ ; оно в сильной степени зависит от предыстории образца — от того, в каких полях он побывал прежде. На-

пример, в поле напряженности  $H_1$  индукция может иметь любые значения от  $B'_1$  до  $B''_1$ .

В связи с неоднозначностью зависимости  $B$  от  $H$  понятие магнитной проницаемости в соотношении

$$B = \mu_0 \mu H \quad (1)$$

применяется лишь к основной кривой намагничения, но и в этом случае магнитная проницаемость ферромагнетика не является постоянной величиной, а сильно зависит от напряженности поля  $H$  (рис. 3).



**Рис. 3.** Основная кривая намагничения и зависимость магнитной проницаемости от напряжения магнитного поля

На верхнем рисунке приведена основная кривая намагничения. Тангенс угла наклона прямых пропорционален отношению  $B/H$ , т. е. магнитной проницаемости  $\mu$ . При увеличении  $H$  угол наклона растет до точки  $A$ , а затем убывает. Соответствующее изменение  $\mu$  приведено на нижнем рисунке. При неограниченном возрастании  $H$  проницаемость асимптотически приближается к единице.

Явление гистерезиса, связанное со своеобразным внутренним трением в перемагничиваемом веществе, сопровождается выделением тепла. Применение первого начала термодинамики ( $Q = \Delta U + A$ ) к замкнутому процессу цикла намагничения ( $\Delta U = 0$ , так как ферромагнетик воз-

вращается в исходное состояние) показывает, что в единице объема за счет работы ферромагнетика выделяется тепло

$$Q = \oint_B H dB. \quad (2)$$

Откуда следует, что тепло гистерезиса численно равно площади петли гистерезиса.

Для электрических машин, особенно трансформаторов, выгодны материалы с очень малой площадью петли гистерезиса, ибо они меньше всего нагреваются при перемагничивании.

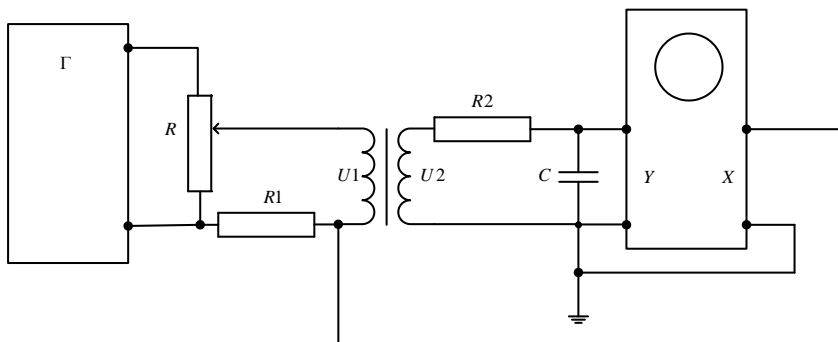
Форма и площадь петли зависят от быстроты изменения  $H$  — чем больше частота намагничивающего поля, тем сильнее отставание индукции и тем больше тепловые потери.

В работе изучается гистерезис трансформаторной стали при её перемагничивании в магнитном поле промышленной частоты 50 Гц.

## 9.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 4.1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.



**Рис. 4.** Схема экспериментальной установки

Исследуемый материал представляет собой кольцевой сердечник, навитый из тонкой трансформаторной стали. Это позволяет исключить влияние размагничивающего фактора. Размагничивающий фактор уменьшает поле  $H$  внутри образца по сравнению с внешним, возбуждающим. Размагничивающий фактор уменьшается с увеличением длины образца и уменьшением его сечения.

На сердечнике намотаны две катушки (возбуждающая и индикаторная) с числами витков  $N_1$  и  $N_2$  соответственно.

Для наблюдения петли гистерезиса на горизонтальный вход осциллографа необходимо подать напряжение, пропорциональное напряженности поля в веществе:

$$U_x = k_1 H, \quad (3)$$

а на вертикальный вход — напряжение, пропорциональное индукции:

$$U_y = k_2 B. \quad (4)$$

Возбуждающая катушка на кольцевом сердечнике — это тороид. Напряженность магнитного поля тороида находится по четвертому уравнению Максвелла:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = N_1 I_1, \quad (5)$$

где  $L$  — длина окружности сердечника по средней линии.

Тогда

$$H = \frac{N_1 I_1}{L}. \quad (6)$$

С резистора  $R_1$  на  $X$ -вход осциллографа подается напряжение  $U_x$ , пропорциональное напряженности поля:

$$U_x = R_1 I_1 = \frac{R_1 L}{N_1} H. \quad (7)$$

В индикаторной катушке индуцируется ЭДС электромагнитной индукции. Для одного витка в соответствии с законом Фарадея (вторым уравнением Максвелла)

$$\varepsilon_i = \oint_l \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S} = -\frac{d}{dt} (BS) = -S \frac{dB}{dt}, \quad (8)$$

где  $l$  — длина окружности поперечного сечения сердечника;  $S$  — площадь поперечного сечения.

Для катушки из  $N_2$  витков

$$\varepsilon_2 = N_2 \varepsilon_i = -N_2 S \frac{dB}{dt}. \quad (9)$$



Параметры индикаторной цепи выбраны так, что  $R_2$  много больше индуктивного сопротивления катушки и емкостного сопротивления конденсатора, которыми можно пренебречь, тогда

$$I_2 = \varepsilon_2 / R_2. \quad (10)$$

Ток  $I_2$  создает на конденсаторе  $C$  напряжение

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{1}{C} \int \left( -\frac{N_2 S}{R_2} \right) \frac{dB}{dt} dt = -\frac{N_2 S}{R_2 C} B, \quad (11)$$

пропорциональное  $B$ , которое подается на вход  $Y$  осциллографа.

В соответствии с напряжениями на входах осциллографа на его экране возникает кривая, воспроизводящая в некотором масштабе петлю гистерезиса.

## 4.2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Собрать схему.
2. Включить осциллограф. Дать прибору прогреться в течение 2–3 мин. Ручками «Смещение  $X$ » и «Смещение  $Y$ » установить светящуюся точку на середину экрана.
3. Включить источник питания. С помощью ручек «Усиление по горизонтали», «Усиление по вертикали» и регулятора источника питания получить максимальную петлю гистерезиса. Петля должна быть похожа на изображенную на рис. 1 (соотношение размеров вертикаль–горизонталь — примерно 3/4) и занимать значительную часть экрана по вертикали. Критерием максимальной петли служит практическая независимость  $H_C$  и  $B_0$  от дальнейшего увеличения напряжения источника питания. При этом смещается только вершина петли по линейной зависимости  $B$  от  $H$ , характеризующей область насыщения. Установить петлю на начале этой зависимости. Положение ручек осциллографа не менять до конца измерений.
4. Перевести на кальку наблюдаемую петлю гистерезиса и отметить оси координат и масштабную сетку. Определить  $Y_{\max}$  и  $X_{\max}$ , соответствующие вершине петли в делениях масштабной сетки, а также  $Y_0$  и  $X_C$  соответствующие  $B_0$  и  $H_C$ . Полученные значения занести в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты измерений**

	$Y_{\max}$	$X_{\max}$	$Y_0$	$X_C$
Деления масштабной сетки				

5. Уменьшая ток через возбуждающую катушку до нуля, получить на экране семейство из 5–6 петель гистерезиса. Для каждой последующей петли  $B_0$  должно уменьшаться на 15–20%. Результаты измерений  $X_C$  занести в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты измерений**

Вершины петель		1	2	3	4	5	6
$X$	Делений сетки						
$Y$	Делений сетки						

**4.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

1. По данным табл. 1 рассчитать коэффициент

$$k_1 = \frac{R_1 L}{N_1}$$

(формулы (3) и (7)) и величину

$$H_{C \max} = \frac{X_C U_x}{k_1},$$

где  $U_x = 1$  В/дел. — цена деления масштабной сетки по оси  $X$ .

2. Рассчитать коэффициент

$$k_2 = \frac{N_2 S}{R_2 C}$$

(формулы 4 и 11) и величину

$$B_{0 \max} = \frac{Y_0 U_y}{k_2},$$

где  $U_y = 0,1$  В/дел. — цена деления масштабной сетки по оси  $Y$ .

3. По данным табл. 2 построить основную кривую намагничения. По точке, соответствующей максимальному углу (точка  $A$  на рис. 3), определить максимальную магнитную проницаемость

$$\mu_{\max} = \frac{B_A}{\mu_0 H_A} = \frac{Y_A U_y / k_2}{\mu_0 X_A U_x / k_1}.$$

4. Определить величину потерь энергии в единице объема ферромагнетика за цикл перемагничивания

$$Q = \frac{S_{\Gamma} U_x U_y}{k_1 k_2},$$

где  $S_{\Gamma}$  — площадь петли гистерезиса в единицах масштабной сетки.

5. Сравнить полученные величины  $H_{C \max}$ ,  $B_{0 \max}$ ,  $\mu_{\max}$ ,  $Q$  со справочными данными.

Примечание. Технические параметры приведены на экспериментальной установке:  $N_1$  — число витков возбужденной обмотки (200);  $N_2$  — число витков измерительной обмотки (17);  $S$  — площадь поперечного сечения сердечника ( $25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ );  $L$  — длина окружности сердечника ( $4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ );  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 27 \text{ кОм}$ ;  $C = 47 \text{ нФ}$ .

Справочные данные основных характеристик электротехнической стали:  $H_C = 10 \text{ А/м}$ ;  $B_0 = 0,3 \text{ Тл}$ ;  $\mu_{\max} = 10\,000$ ;  $Q = 0,1 \div 6 \text{ Вт/кг}$ .

## 9.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятия магнитного гистерезиса, остаточной индукции, коэрцитивной силы.
2. Как экспериментально получить основную кривую намагничения?
3. Понятие магнитной проницаемости для ферромагнетика. Методика определения её максимального значения.
4. Причины возникновения тепловых потерь при перемагничивании. Методика их определения.
5. Какие напряжения нужно подавать на входы  $X$  и  $Y$  осциллографа для наблюдения петли гистерезиса?
6. Сформулируйте и запишите второе уравнение Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Как оно применяется в работе?
7. Сформулируйте и запишите четвертое уравнение Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Как оно применяется в работе?

# 10. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА»

## 10.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с наиболее распространенными методами определения важнейшей характеристики элементарных частиц — удельного заряда.

## 10.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Электронная лампа; электромагнит; лабораторный блок питания.

## 10.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В настоящей работе отношение  $e/m$  (удельный заряд электрона) определяется при помощи метода, получившего название *метод магнетрона*. Это название связано с тем, что применяемая в работе конфигурация электрического и магнитного полей напоминает конфигурацию полей в магнетронах — генераторах электромагнитных колебаний в области сверхвысоких частот.

На рис. 1 приведена схема опыта.

Нить накала (катод) К двухэлектродной лампы Л располагается вдоль оси цилиндрического анода А так, что электрическое поле направлено по радиусу  $r$ . Лампа помещена внутри соленоида С, создающего магнитного поле  $B$ , параллельное катоду.

На рис. 1 показано сечение витков соленоида и направление циркулирующего по виткам постоянного тока. Величина индукции магнитного поля, создаваемого соленоидом, пропорциональна току и может изменяться при питании соленоида от регулируемого источника постоянного тока.

Рассмотрим траекторию электрона, вылетевшего из катода при потенциале анода  $U_A$ .

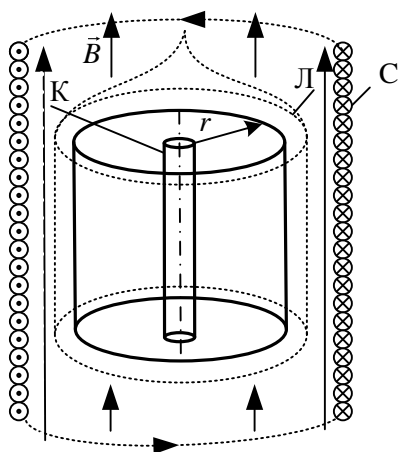


Рис. 1. Схема опыта

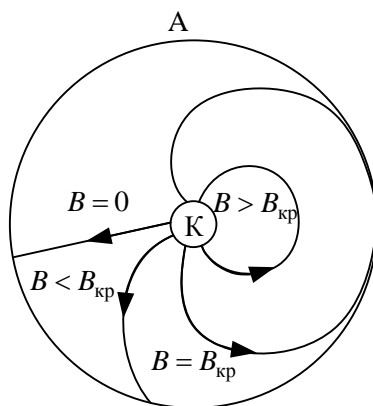


Рис. 2. Траектории электрона, вылетевшего из катода

В отсутствии магнитного поля (рис. 2) траектория электрона прямолинейна и направлена вдоль радиуса. При включении магнитного поля на движущиеся электроны будет действовать сила Лоренца

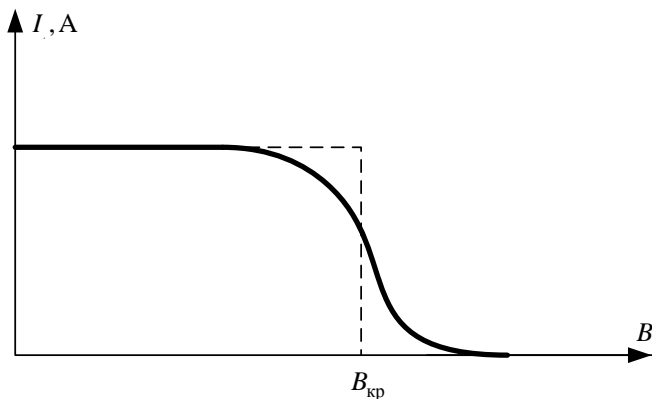
$$\vec{F}_л = -e[\vec{V} \times \vec{B}], \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $\vec{V}$  — скорость электрона;  $\vec{B}$  — индукция магнитного поля.

Сила Лоренца отклоняет электроны перпендикулярно направлению вектора скорости в каждый данный момент времени. При слабом магнитном поле траектория несколько искривляется, но электроны все же попадают на анод.

При некотором критическом значении индукции магнитного поля траектория искривляется настолько, что касается анода. Наконец, при  $B \geq B_{\text{кр}}$  электроны вовсе не попадают на анод и возвращаются к катоду.

Анодный ток  $I_A$  при увеличении магнитного поля изменялся бы при этом так, как показано на рис. 3 пунктирной линией, т. е. по исчезновению анодного тока можно определить  $B_{\text{кр}}$ , а  $B_{\text{кр}}$ , в свою очередь, связано с удельным зарядом  $e/m$  и параметрами лампы.



**Рис. 3.** График анодного тока

Выведем зависимости  $e/m$  от  $B_{\text{кр}}$ .

Найдем радиус кривизны траектории в момент касания анода. Векторы  $\vec{V}$  и  $\vec{B}$  перпендикулярны, и сила Лоренца  $F_{\text{л}} = eVB_{\text{кр}}$ , направленная к центру кривизны, играет роль центростремительной силы.

Тогда по второму закону Ньютона:

$$eVB_{\text{кр}} = m \frac{V^2}{R}, \quad (2)$$

и соответственно

$$\frac{e}{m} = \frac{V}{RB_{\text{кр}}}. \quad (3)$$

Скорость электрона найдем из закона сохранения энергии (начальной скоростью электрона пренебрегаем):

$$eU_A = \frac{mV^2}{2}. \quad (4)$$

Подставим найденное из формулы (4)

$$V = \sqrt{2eU_A/m} \quad (5)$$

в формулу (3):

$$\frac{e}{m} = \frac{\sqrt{2eU_A/m}}{RB_{\text{кр}}}. \quad (6)$$

После возведения обеих частей уравнения (6) в квадрат получаем:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U_A}{R^2 B_{\text{кр}}^2}. \quad (7)$$

Из конструкции схемы следует:

$$R = \frac{(b - d_K)}{2},$$

где  $b$  — диаметр цилиндра анода;  $d_K$  — диаметр катода.

Поскольку  $d_K \ll b$ , то  $R = b/2$ . Тогда

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_A}{b^2 B_{\text{кр}}^2}. \quad (8)$$

Формула (8) позволяет вычислить  $e/m$ , если при заданном значении  $U_A$  найдено  $B_{\text{кр}}$ .

Экспериментальная зависимость анодного тока  $I_A$  от индукции магнитного поля показана на рис. 3 сплошной линией. Пунктирная линия соответствует одинаковой начальной скорости электронов. На самом деле электроны, испускаемые нагретым катодом, обладают различными начальными скоростями, поэтому критические условия достигаются для разных электронов при различных значениях индукции  $B$ .

В этом случае  $B_{\text{кр}}$  определяется серединой участка наиболее крутого спада (точкой перегиба) экспериментальной зависимости.

В лабораторной работе снимается зависимость анодного тока  $I_A$  от тока соленоида  $I_C$ . Для достаточно длинного соленоида, применяемого в работе, индукцию в месте расположения лампы можно определить по формуле бесконечно длинного соленоида:

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I_C, \quad (9)$$

где  $N$  — число витков соленоида;  $L$  — длина соленоида. Следовательно,

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_A L^2}{b^2 \mu_0^2 N^2 I_{C_{\text{кр}}}^2}. \quad (10)$$

## 10.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 4.1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

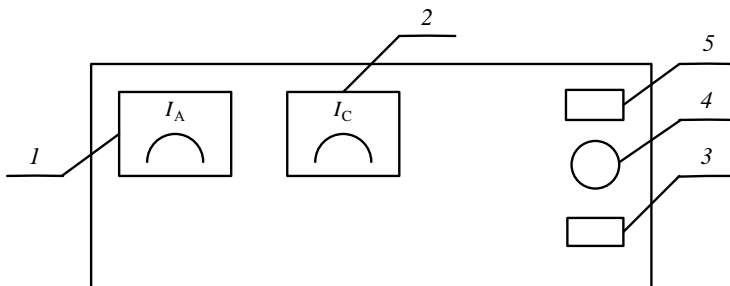
Лицевая панель установки представлена на рис. 4.

На лицевой панели имеются: миллиамперметр 1 для измерения анодного тока лампы, миллиамперметр 2 для измерения тока соленоида, индикатор сетевого питания 3 и кнопка включения питания 5. Для регулирования тока соленоида имеется ручка регулятора 4.

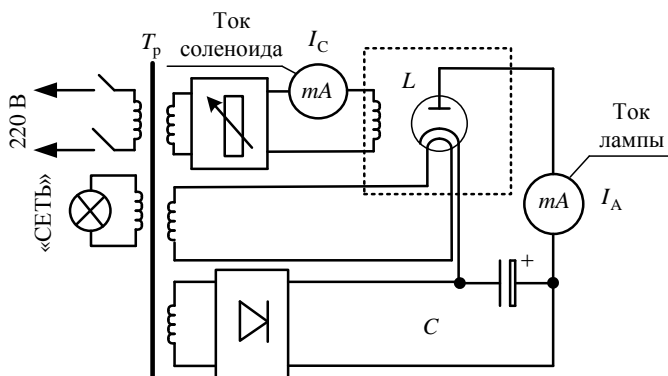
Питание установки осуществляется от сети  $220 \text{ В} \pm 10\%$ . Через разделительный трансформатор получает питание регулятор тока соленоида, накал лампы и цепь анода лампы. Измерение тока соленоида и тока лампы осуществляется миллиамперметрами.

Принципиальная схема приведена на рис. 5.





**Рис. 4.** Лицевая панель установки



**Рис. 5.** Принципиальная схема

## 4.2. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Для проведения измерений включить установку и прогреть в течение 5 минут до прекращения роста анодного тока лампы.
2. После прогрева снять зависимость тока анода  $I_A$  от тока соленоида  $I_C$ . Регулировку тока соленоида осуществлять с помощью ручки регулятора тока на лицевой панели. Результаты измерений занести в табл. 1.

## 4.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Построить график зависимости  $I_A(I_C)$ . График строится на миллиметровке размером не менее формата А5. По графику определить критическое значение тока соленоида  $I_{кр}$  (точка наиболее крутого спада  $I_A$ ).

Вычислить значение удельного заряда электрона по формуле (10). Технические параметры установки приведены в табл. 2.

Таблица 1

**Результаты измерений**

$I_C, A$									
$I_A, mA$									

Таблица 2

**Технические параметры установки**

$U_A, B$	$L, м$	$N$	$b, м$
10	0,04	1000	0,02

Вычислить относительную погрешность измерений

$$\varepsilon = \frac{\Delta(e/m)}{e/m} = \frac{\Delta U_A}{U_A} + 2 \frac{\Delta L}{L} + 2 \frac{\Delta b}{b} + 2 \frac{\Delta \mu_0}{\mu_0} + 2 \frac{\Delta I_{кр}}{I_{кр}} + 2 \frac{\Delta N}{N},$$

где  $\Delta U_A / U_A = 0,01$  — соответственно классу вольтметра;  $\Delta L = 1 \text{ мм}$  — измерение проводилось миллиметровой линейкой;  $\Delta b = 0,1 \text{ мм}$  — измерение проводилось штангенциркулем;  $\Delta \mu_0 = 0$ , так как  $\mu_0$  — табличная величина;  $\Delta N = 0$  — число витков точно известно ( $N = 1000$  витков);  $2 \Delta I_{кр} / I_{кр} \approx 0,2$ , если при построении графика выбран рекомендованный масштаб.

Поскольку в данном эксперименте относительная погрешность  $2 \Delta I_{кр} / I_{кр}$  значительно больше других слагаемых, то можно положить

$$\varepsilon = 2 \frac{\Delta I_{кр}}{I_{кр}} = 0,2.$$

Определить абсолютную погрешность

$$\Delta(e/m) = \varepsilon(e/m).$$

Записать окончательный результат:

$$e/m = e/m \pm \Delta(e/m); \quad \varepsilon = \quad, \%,$$

соблюдая правила округления.

## **10.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что называется удельным зарядом частицы?
2. Выведите формулу определения удельного заряда электрона по методу магнетрона.
3. Как определить скорость электрона в данной работе?
4. В чем состоит метод определения критической индукции магнитного поля?
5. Что является источником магнитного поля и как оно определяется?

## 11. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10 «ЭФФЕКТ ХОЛЛА. ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ»

### 11.1. Цель работы

Ознакомление с важнейшими величинами, характеризующими свойства полупроводников, и методиками их измерения с помощью эффекта Холла.

### 11.2. Приборы и оборудование

Постоянный магнит; датчик Холла; миллиамперметр; гальванометр; резисторы.

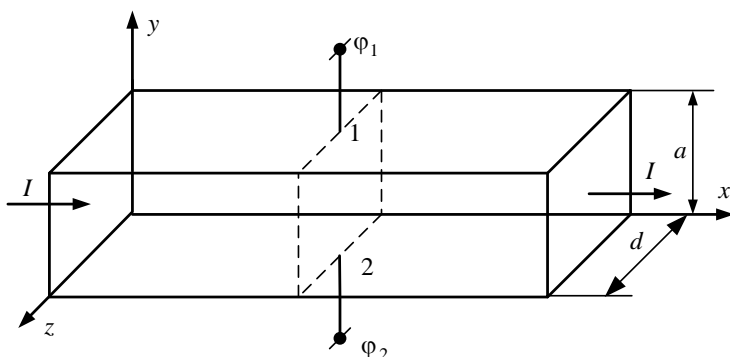
### 11.3. Теоретическая часть

Важнейшими величинами, характеризующими свойства полупроводников, являются концентрация носителей зарядов и их подвижность. *Концентрация носителей заряда* определяет силовые свойства (силу тока) полупроводниковых приборов, *подвижность* — их частотные свойства (транзисторы бывают низкой, средней и высокой частоты). Эти параметры измеряются на заводах-изготовителях полупроводниковых материалов как «выходные» и на заводах-изготовителях полупроводниковых приборов как «входные». Существенно также знать тип проводимости, т. е. знак носителей заряда. В полупроводниках одновременно осуществляются оба типа проводимости. В лабораториях, при разработке новых полупроводниковых материалов, важно уметь определить, какой из них является преобладающим.

Один из наиболее распространенных методов измерения указанных величин основан на *эффекте Холла*. Холл пропускал постоянный ток через пластинку, изготовленную из золота, и измерял разность потенциалов  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  между противоположащими точками 1 и 2 на верхней и нижней гранях (рис. 1). Эти точки лежат в одном и том же поперечном сечении проводника. В отсутствии магнитного поля ток в пластинке обусловливается электрическим полем  $\vec{E}_0$ , направленным вдоль пластинки.

Эквипотенциальные поверхности образуют систему перпендикулярных к  $\vec{E}_0$  плоскостей.

Следовательно, потенциал точек 1 и 2 одинаков и  $\Delta\varphi = 0$ .



**Рис. 1.** Схема эффекта Холла

При помещении пластинки в однородное магнитное поле  $\vec{B}$ , перпендикулярное её боковым граням, Холлом была обнаружена разность потенциалов

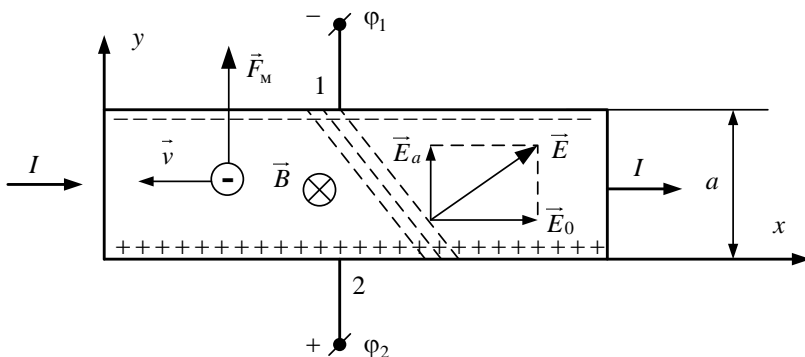
$$\Delta\varphi = R_x j a B, \quad (1)$$

где  $j$  — плотность тока;  $a$  — высота пластины;  $R_x$  — коэффициент пропорциональности (постоянная Холла).

Дальнейшие исследования показали, что эффект Холла наблюдается во всех проводниках и полупроводниках независимо от их материала.

Эффект Холла можно объяснить следующим образом. При включении магнитного поля носители тока (электроны для металлов и полупроводников  $n$ -типа) оказываются под действием магнитной составляющей силы Лоренца:

$$\vec{F}_M = -e[\vec{v} \times \vec{B}]. \quad (2)$$



**Рис. 2.** Сечение пластинки плоскостью, перпендикулярной  $\vec{B}$

На рис. 2 приведено сечение пластинки плоскостью, перпендикулярной  $\vec{B}$ . При указанных на рисунке направлениях тока  $I$  и индукции  $\vec{B}$ , сила  $\vec{F}_M$  направлена вверх (правило правой руки для отрицательных зарядов). Под действием силы  $\vec{F}_M$  электроны отклоняются к верхней грани пластинки, так что у верхней грани возникает избыток, а у нижней — недостаток электронов. В результате этого в пластинке возникает поперечное электрическое поле  $\vec{E}_a$ , препятствующее дальнейшему переносу электронов вдоль  $a$ . Когда напряженность этого поля достигнет такого значения, что действие электрической составляющей лоренцевой силы

$$\vec{F}_э = -e\vec{E}_a \quad (3)$$

уравновесит магнитную, установится стационарное распределение зарядов в поперечном направлении.

В этом случае

$$F_э = F_M$$

или

$$e\vec{E}_a = evB \text{ и } \vec{E}_a = vB. \quad (4)$$

Поле  $\vec{E}_a$  складывается с полем  $\vec{E}_0$ :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_a.$$

Эквипотенциальные поверхности перпендикулярны к  $\vec{E}$ , т. е. они повернутся и займут положения, отмеченные пунктиром. Точки 1 и 2 теперь имеют разные потенциалы:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_0^a \vec{E}_a d\vec{l} = E_a a = avB.$$

Найдем  $v$  из  $j = n_0 ev$ , т. е.  $v = j/n_0 e$ , где  $n_0$  — концентрация носителей тока.

Тогда

$$\Delta\varphi = \frac{1}{n_0 e} ajB. \quad (5)$$

Сравнивая (5) и (1), получаем

$$R_x = \frac{1}{n_0 e}. \quad (6)$$

Подставим в (5)  $j = I/S$ , где  $S = ad$  — площадь поперечного сечения пластины;  $d$  — толщина пластины.

Тогда

$$\Delta\varphi = R_x \frac{IB}{d}. \quad (7)$$

Определив постоянную Холла (все остальные величины в выражении (7) измеряются стандартными измерительными приборами), можно найти концентрацию носителей тока.

Подвижность носителей

$$v_0 = \frac{U}{E_0}, \quad (8)$$

т. е. среднюю скорость, приобретаемую носителями тока при напряженности электрического поля, равной единице, можно определить на основе двух измерений постоянной Холла и удельного сопротивления.

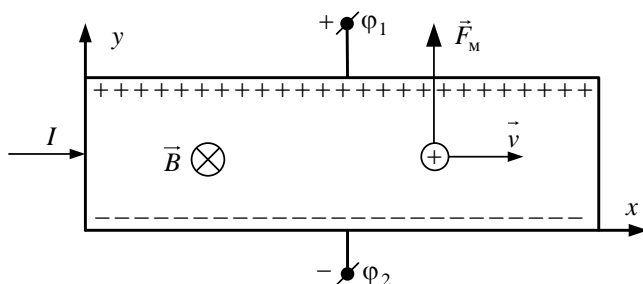
Действительно,  $j = n_0 ev$  — определение плотности тока;  $j = E_0/\rho$  — закон Ома в дифференциальной форме, где  $\rho$  — удельное сопротивление.

Приравняв правые части, имеем:

$$v_0 = \frac{v}{E_0} = \frac{R_x}{\rho}. \quad (9)$$

Тип проводимости полупроводника ( $n$  или  $p$ ) можно определить по знаку эффекта Холла.

На рис. 2 для полупроводника  $n$ -типа верхняя грань заряжается отрицательно, а нижняя — положительно. Если в те же условия (протекание тока по оси  $x$ , индукция  $\vec{B}$  против оси  $z$ ) поместить пластинку полупроводника  $p$ -типа (рис. 3), то теперь положительные носители тока под действием магнитной составляющей силы Лоренца отклонятся к верхней грани, образуя там избыток, а на нижней — недостаток положительных зарядов, т. е. знак ЭДС Холла поменялся.



**Рис. 3.** Схема эффекта Холла для полупроводника  $p$ -типа

Концентрация носителей тока в полупроводниках на несколько порядков меньше, чем у металлов. Следовательно, эффект Холла во столько же раз больше, и ЭДС Холла может быть измерена обычными, средней чувствительности приборами.

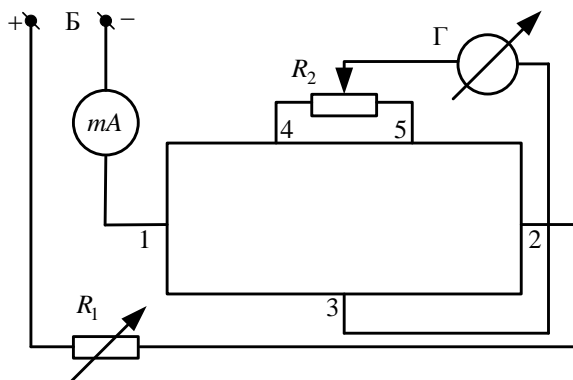
Поэтому в нашей лабораторной работе эффект Холла изучается на полупроводниковом материале.

## 11.4. Экспериментальная часть

### 4.1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.





**Рис. 4.** Схема экспериментальной установки

К контактам 1 и 2 образца подводится ток от батареи Б. Ток устанавливается резистором  $R_1$  и измеряется миллиамперметром  $mA$ . ЭДС Холла измеряется гальванометром Г. На практике бывает трудно установить электроды Холла строго в эквипотенциальной плоскости. Поэтому на верхней грани расположены два контакта 4 и 5. С помощью резистора  $R_2$  при отсутствии магнитного поля устанавливается потенциал верхней грани, равный потенциалу контакта 3 нижней грани (по отсутствию тока через гальванометр).

При включении магнитного поля гальванометр показывает ток, обусловленный возникающей ЭДС Холла:

$$I = \frac{\Delta\varphi}{R},$$

где  $R$  — полное сопротивление цепи гальванометра.

В свою очередь,

$$I = C_I \cdot N,$$

где  $C_I$  — чувствительность гальванометра;  $N$  — число делений по шкале гальванометра.

Таким образом,

$$\Delta\varphi = C_I \cdot R \cdot N. \quad (10)$$

Численные значения  $C_I$  и  $R$  приведены в примечании.

## 4.2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Снять зависимость показаний гальванометра от величины тока в образце. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений

№	$I$ , мА	$N$	$\Delta\varphi$ , В	$\bar{n}_0$
1				
2				
3				
4				
5				

## 4.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По формуле (10) рассчитать значение  $\Delta\varphi$  и занести в таблицу.

2. Построить график зависимости ЭДС Холла от тока  $I$ .

По графику определить значение  $\Delta\varphi$ , соответствующее хорошо отсчитываемому значению тока  $I$  в последней четверти графика.

3. По формулам (7) и (6) рассчитать концентрацию носителей тока в полупроводнике:

$$\bar{n}_0 = \frac{IB}{ed\Delta\varphi}.$$

Определить относительную погрешность измерения

$$\varepsilon = \frac{\Delta n_0}{\bar{n}_0} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta S_I}{S_I} + \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta R}{R} \cong \frac{\Delta N}{N},$$

где  $\Delta N$  — одно деление шкалы гальванометра;  $N$  — число делений, соответствующее  $\Delta\varphi$ , определенному в п. 2, а также определить абсолютную погрешность

$$\Delta n_0 = \bar{n}_0 \cdot \varepsilon.$$

Записать окончательный результат в следующем виде:

$$n_0 = \bar{n}_0 \pm \Delta n_0.$$

4. По формуле (9) рассчитать подвижность носителей тока в полупроводнике:

$$\bar{v}_0 = \frac{1}{en_0\rho}.$$

Записать окончательный результат в следующем виде:

$$v_0 = \bar{v}_0 \pm \Delta v_0,$$

приняв относительную погрешность, равной ранее вычисленной относительной погрешности измерения  $n_0$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta n_0}{\bar{n}_0} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \approx \frac{\Delta n_0}{\bar{n}_0}.$$

Примечание. Технические данные (приведены для конкретной установки): индукция магнитного поля —  $B = 0,02$  Тл; чувствительность гальванометра —  $C_I = 4 \cdot 10^{-7}$  А/дел.; сопротивление цепи гальванометра —  $R = 57$  Ом; удельное сопротивление образца —  $\rho = 3,3 \cdot 10^{-3}$  Ом·м; толщина образца —  $d = 1,2$  мм.

## 11.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Запишите постулат Лоренца. Поясните сущность описываемых явлений.
2. В чем состоит эффект Холла?
3. Какие основные свойства полупроводников можно определить с помощью эффекта Холла?
4. Какие типы проводимости существуют в полупроводниках? Как определяется преобладающее влияние одного из них?
5. Почему эффект Холла в полупроводниках гораздо сильнее, чем в металлах?

## 12. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА»

### 12.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с физическими принципами работы и конструкцией рефрактометра.

## 12.2. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Рефрактометр; набор исследуемых жидкостей.

## 12.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Показатель преломления вещества  $n$  есть физическая величина, показывающая, во сколько раз скорость света в данном веществе меньше скорости света в вакууме:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Скорость света  $c$  в вакууме одинакова для любой длины волны; скорость света в веществе зависит не только от свойств вещества, но и от длины волны.

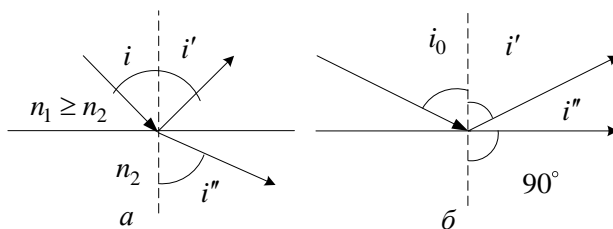
*Абсолютный показатель преломления вещества* (или просто показатель преломления) является важной оптической характеристикой вещества. Величина показателя преломления вещества непосредственно связана с электрическими свойствами молекул, из которых состоит данное вещество. Поэтому измерение показателя преломления вещества может дать сведения о его строении на молекулярном уровне. Показатель преломления растворов зависит от концентрации растворенных веществ. Следовательно, измерение показателя преломления можно применять в аналитических целях, т. е. для количественного анализа сложных веществ с известным качественным составом.

Один из способов измерения показателя преломления вещества основан на явлении полного внутреннего отражения, которое заключается в следующем: при падении луча света на границу раздела сред выполняется закон преломления:

$$\frac{\sin i}{\sin i''} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (1)$$

где  $i$  — угол падения;  $i''$  — угол преломления;  $n_{21}$  — относительный показатель преломления.

Вещество с большим показателем преломления называется *оптически более плотным*, а вещество с меньшим показателем преломления — *оптически менее плотным*. На рис. 1 свет падает из оптически более плотной среды в оптически менее плотную.



**Рис. 1.** Преломление света при падении из оптически более плотной среды

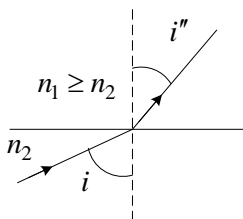
Поскольку  $n_1 > n_2$ , то в этом случае угол преломления  $i''$  больше угла падения  $i$ . Если увеличивать угол падения  $i$ , то будет увеличиваться угол преломления, и при некотором значении угла падения  $i_0$  угол преломления достигает  $90^\circ$ , и преломленный луч будет скользить по поверхности раздела сред. Угол падения  $i_0$  называется *предельным углом падения*. При углах падения, равных и больших  $i_0$ , преломленного луча не существует, вся световая энергия отражается от границы раздела двух сред и попадает снова в первую среду. Это явление называется *полным внутренним отражением*.

Для предельного угла падения имеем:

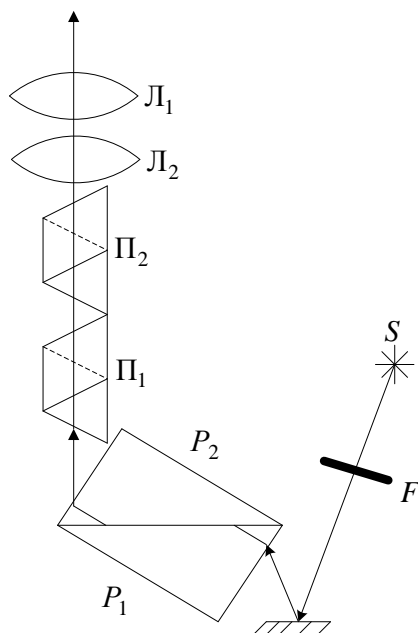
$$\sin i_0 = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2)$$

Таким образом, измерив предельный угол полного внутреннего отражения и зная абсолютный показатель преломления одного из веществ, по равенству (2) можно найти показатель преломления другого вещества.

Пусть теперь свет падает на границу раздела со стороны оптически менее плотной среды (рис. 2).



**Рис. 2.** Преломление света при падении из оптически менее плотной среды



**Рис. 3.** Оптическая схема рефрактометра, построенного по методу скользящего луча

В зависимости от угла падения луч во второй среде может составить с нормалью углы, расположенные в интервале от 0 до  $i_0$ . Предельный угол преломления  $i_0$  соответствует углу падения  $i = 90^\circ$  (скользящему лучу). Величина предельного угла и в этом случае определяется формулой (2).

В рефрактометрах — приборах для измерения показателя преломления вещества — используется как метод полного внутреннего отражения, так и метод скользящего луча.

Оптическая схема рефрактометра, построенного по методу скользящего луча, приведена на рис. 3.

Основной частью являются две стеклянные прямоугольные призмы  $P_1$  и  $P_2$ , изготовленные из стекла с большим показателем преломления.

В разрезе призмы имеют вид прямоугольных треугольников, обращенных друг к другу гипотенузами; зазор между призмами имеет ширину 0,1 мм и служит для помещения исследуемой жидкости. Ход лучей в призмах приведен на рис. 4.

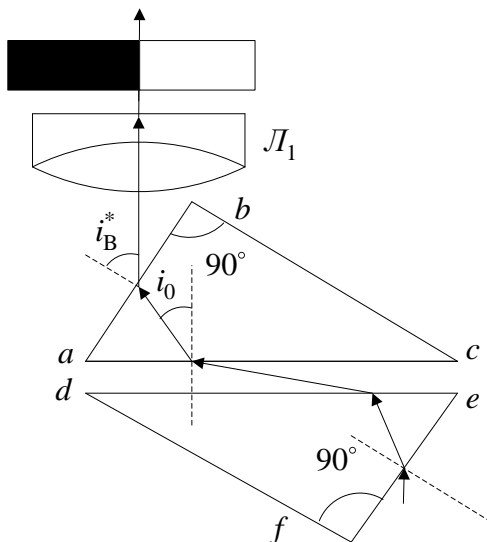


Рис. 4. Ход лучей в призмах

Свет проникает в осветительную призму  $P_1$  через грань  $ef$  и попадает в жидкость через матовую поверхность  $ed$ . Свет, рассеянный матовой поверхностью, проходит слой жидкости и под всевозможными углами ( $0^\circ < i < 90^\circ$ ) попадает на поверхность  $ac$  измерительной призмы  $P_2$ . Скользящему лучу в жидкости ( $i = 90^\circ$ ) соответствует предельный угол преломления  $i_0$ . Преломленные лучи с углами больше  $i_0$  не возникают. В связи с этим угол выхода  $i_B$  лучей из грани  $ab$  может изменяться в интервале от некоторого значения  $i_B^*$  до  $90^\circ$ .

Если свет, выходящий из грани  $ab$ , пропустить через собирающую линзу  $L_1$ , то в её фокальной плоскости наблюдается резкая граница света и темноты.

Граница рассматривается с помощью линзы  $L_2$  (рис. 3). Линзы  $L_1$  и  $L_2$  образуют зрительную трубу, установленную на бесконечность. В их общей фокальной плоскости расположен крест, образованный тонкими линиями. Поворачивая оправу с призмами относительно зрительной трубы (в плоскости рисунка), совмещают границу раздела света и тени с

центром креста. В этом случае измерение показателя преломления сводится к измерению угла  $i_b$ . Лимб градуируется непосредственно в значениях показателя преломления.

При определении показателя преломления твердых веществ исследуемое вещество должно выполнять роль призмы  $P_1$ . В зазор между призмами вводится тонкий слой жидкости с известным показателем преломления.

В отличие от метода скользящего луча, метод полного внутреннего отражения позволяет измерять показатель преломления непрозрачных веществ.

Изложенная теория рефрактометра справедлива для монохроматического света. Зависимость показателя преломления от длины волны (дисперсия исследуемого вещества) приводит к тому, что при работе с белым светом наблюдаемая в поле зрения граница света и тени бывает размытой и окрашенной. Для того чтобы получить в этом случае резкое изображение, перед объективом трубы помещают компенсатор с переменной дисперсией. Компенсатор содержит две одинаковые дисперсионные призмы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , каждая из которых состоит из трех склеенных призм, обладающих различными показателями преломления и различной дисперсией. Призмы рассчитывают так, чтобы монохроматический луч с длиной волны  $\lambda_D = 0,589$  мкм (среднее значение длины волны желтого дублета натрия) не испытывал отклонения. Показатель преломления для желтой спектральной линзы натрия является одной из стандартных оптических характеристик вещества и обозначается  $n_D$ . Лучи с другими длинами волн отклоняются призмами в ту или иную сторону. Если положение призмы соответствует рис. 3, то дисперсия двух призм равна удвоенной дисперсии каждой из них. При повороте одной из призм на  $180^\circ$  относительно другой полная дисперсия компенсатора оказывается равной нулю. Вращая ручку компенсатора, следует добиться того, чтобы граница света и тени в поле зрения стала достаточно резкой. Положение границы при этом соответствует длине волны  $\lambda_D$ , для которой приводится значение  $n_D$  на лимбе.

## 12.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

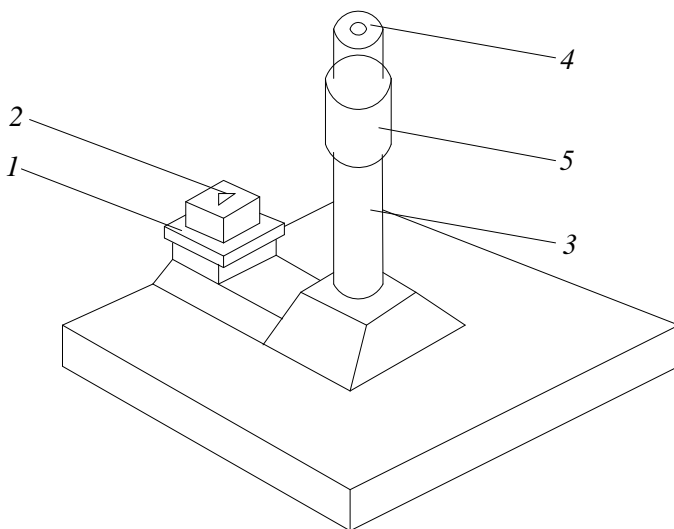
### 4.1. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Измерения производятся с помощью рефрактометра ИРФ-464. Внешний вид прибора приведен на рис. 5.



## 4.2. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Перед выполнением каждого измерения необходимо промыть призмы рефрактометрического блока дистиллированной водой. Для этого необходимо откинуть осветительную призму, нанести пипеткой 2–3 капли воды на измерительную призму, закрыть её осветительной, снова открыть осветительную призму и протереть поверхность призмы мягкой салфеткой или ватой.
2. Начинают с измерения показателя преломления  $n_D$  дистиллированной воды. Для этого одну или две капли воды наносят на чистую поверхность измерительной призмы, опускают осветительную призму, совмещают границу света и тени с перекрестием нитей или указательным штрихом, поворотом компенсационных призм устраняют дисперсию света. При окончательной настройке прибора должна быть получена резкая неокрашенная граница света и тени, с которой совмещены перекрестие или штрих. (Поворотом окуляра 4 можно установить резкость по глазу в пределах  $\pm 5$  диоптрий.) По шкале прибора определяют значение показателя преломления  $n_D$  воды. Измерения повторяют еще два раза, сбивая перед повторными измерениями наводку прибора.



**Рис. 5.** Внешний вид рефрактометра ИРФ-464:

1 — рефрактометрический блок (осветительная и измерительная призмы);

2 — рукоятка откидной осветительной призмы; 3 — зрительная труба;  
4 — окуляр трубы; 5 — поворотное кольцо компенсационных призм

3. Аналогично измеряют показатель преломления раствора глицерина в воде, начиная с раствора наименьшей концентрации.
4. Полученные результаты измерений занести в табл. 1.

### 4.3. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Подсчитать среднеарифметические значения  $\bar{n}_D$ .
2. Построить график зависимости  $\bar{n}_D$  от концентрации раствора.
3. По графику сделать вывод о характере изменения показателя преломления раствора глицерина в воде от концентрации глицерина.

Таблица 1

Результаты измерений

% глицерина		10	15	20	25
$n_{Di}$	1				
	2				
	3				
$\bar{n}_D$					

## 12.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое показатель преломления веществ?
2. В чем заключается явление полного внутреннего отражения света?
3. Как связан предельный угол полного внутреннего отражения с относительным показателем преломления граничащих друг с другом сред?
4. В чем заключается метод скользящего луча?
5. Как используется метод скользящего луча в рефрактометре?
6. Как устраняется дисперсионное явление?

## 13. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ КОЛЕЦ НЬЮТОНА»

### 13.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение волновых свойств света, определение длины световой волны при помощи колец Ньютона.

## 13.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

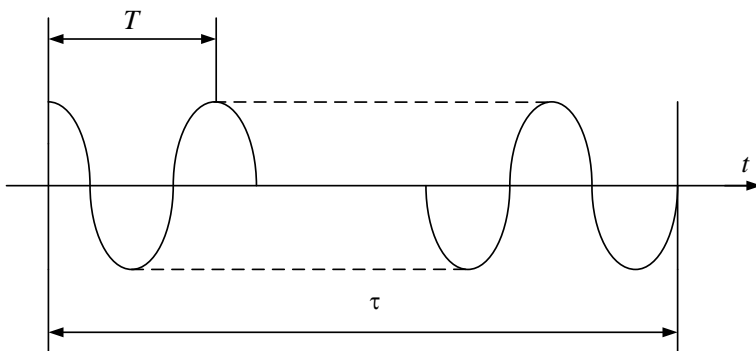
Микроскоп МБИ-1; стеклянные пластины; осветитель ОИ-18.

## 13.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Кольца Ньютона являются частным случаем интерференции в тонких пленках и пластинках. Явление усиления амплитуды волны в одних точках пространства и ослабления в других, при наложении двух или более когерентных волн, называется *интерференцией волн*. Две волны одной частоты называются *когерентными*, если разность фаз колебаний, возбуждаемых в данной точке пространства, не меняется с течением времени. Свет, излучаемый естественными источниками, является *некогерентным*. Причина заключается в механизме испускания света атомами источника. Продолжительность излучения света атомом  $\tau \approx 10^{-8}$  с. За это время возбужденный атом затрачивает избыточную энергию и возвращается в невозбужденное (нормальное) состояние. Через некоторый промежуток времени атом может снова возбудиться и опять излучить порцию света (квант света). Такое прерывистое излучение в виде отдельных кратковременных импульсов — цугов волн — характерно для любого источника света (рис. 1).

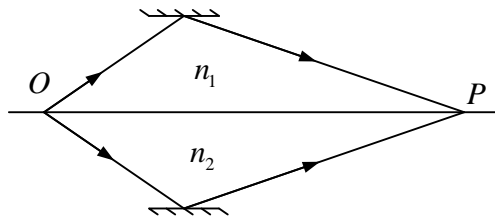
В среднем число колебаний в цуге  $N = \tau/T = 5 \cdot 10^6$ , т. е. цуг представляет собой практически монохроматическую волну. При спонтанном (самопроизвольном) излучении атомы излучают независимо друг от друга, т. е. даже для одного атома:

- ◆ начальные фазы цугов волн не связаны между собой;
- ◆ значения  $\omega$  для цугов могут несколько различаться;
- ◆ каждый цуг плоскополяризован, однако плоскости поляризации различных цугов ориентированы по-разному.



**Рис. 1.** Квант света в волновом представлении — кратковременный цуг волн

Получить когерентные волны оказывается возможным, если волну, излучаемую одним источником, разделить на две части, заставить их пройти разные оптические пути, а затем снова наложить друг на друга (рис. 2). Причем оптическая разность хода  $\Delta$  должна быть меньше длины цуга  $L = c \cdot \tau$ . В противном случае наложатся колебания, принадлежащие разным цугам, и разность фаз между ними будет меняться хаотическим образом, т. е. волны будут некогерентными.



**Рис. 2.** Схема получения когерентных волн

Пусть волна возбуждает в точке  $O$ , на границе раздела двух сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , колебание

$$x = A \cos(\omega t + \alpha).$$

Пусть в этой же точке волна разбивается на две, и первая до точки  $P$  проходит путь  $l_1$  в среде с показателем преломления  $n_1$ , а вторая — путь  $l_2$  в среде с показателем преломления  $n_2$ . В точке  $P$  две волны возбуждают колебания:

$$x_1 = A \cos(\omega(t - \tau_1) + \alpha); \quad x_2 = A \cos(\omega(t - \tau_2) + \alpha).$$

Разность фаз колебаний в точке  $P$  будет равна

$$\delta = [(\omega(t - \tau_1) + \alpha) - (\omega(t - \tau_2) + \alpha)] = \omega(\tau_2 - \tau_1) = \omega \left( \frac{l_2}{V_2} - \frac{l_1}{V_1} \right).$$

Учитывая, что

$$n_1 = \frac{c}{V_1}; \quad n_2 = \frac{c}{V_2},$$

получим:

$$\delta = \frac{\omega}{c} (n_2 l_2 - n_1 l_1) = \frac{2\pi\nu}{c} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta,$$

где  $\Delta = (n_2 l_2 - n_1 l_1)$  — оптическая разность хода двух когерентных волн;  
 $\lambda_0 = c/\nu$  — длина волны в вакууме.

Если  $\delta = \pm 2\pi k$  ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ), то волны усиливают друг друга, т. е.

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta = \pm 2\pi k; \quad \Delta = \pm 2k \frac{\lambda_0}{2} \quad (1)$$

— условие максимума (оптическая разность хода равна четному числу полуволен).

Если  $\delta = \pm(2k + 1)\pi$  ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ), то волны ослабляют друг друга, т. е.

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta = \pm(2k + 1)\pi; \quad \Delta = \pm(2k + 1) \frac{\lambda_0}{2} \quad (2)$$

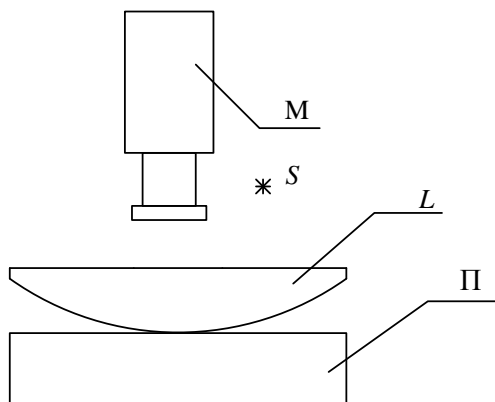
— условие минимума (оптическая разность хода равна нечетному числу полуволен).

Для определения длины световой волны можно использовать интерференционную картину, известную под названием колец Ньютона.

## 13.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 4.1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На столик микроскопа (рис. 3) помещают толстую плоскопараллельную стеклянную пластину  $\Pi$  и на нее линзу  $L$  с большим радиусом кривизны.



**Рис. 3.** Схема экспериментальной установки

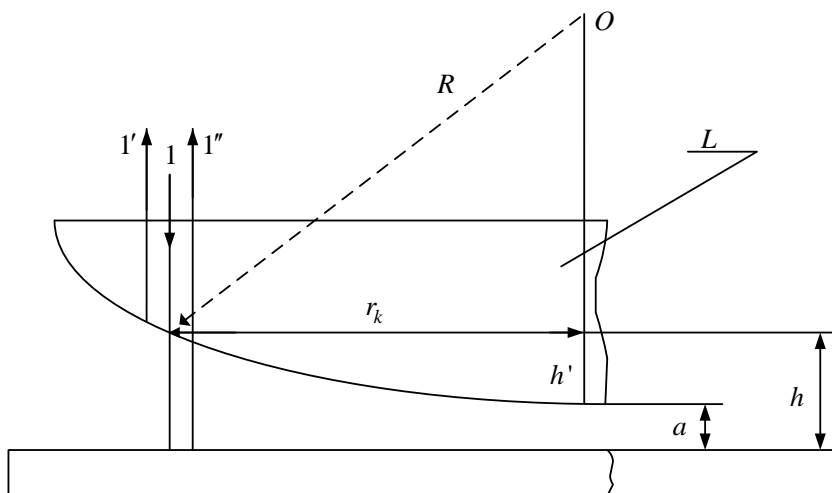
Точка соприкосновения линзы с пластиной должна находиться приблизительно на оптической оси микроскопа М.

Осветим эту систему монохроматическим светом (красным) от источника  $S$ . Изменяя расстояние от объектива до линзы, т. е. перемещая вверх и вниз тубус микроскопа, наблюдаем резкую интерференционную картину в виде концентрических колец с темным кружком в центре.

Эта картина, называемая *кольцами Ньютона в отраженном свете*, является результатом наложений световых волн, получившихся из падающей волны (луч 1) при отражении её от сферической поверхности линзы (луч 1') и от поверхности стеклянной пластины (луч 1'') (рис. 4).

Найдем длину волны падающего света, если радиус  $R$  сферической поверхности линзы известен, радиус  $r_k$  светлого или темного кольца можно измерить, а угол падения света на линзу и пластину принять за  $0^\circ$  (рис. 4).

Пусть  $r_k$  — радиус темного кольца, имеющего номер  $k$ ;  $h$  — расстояние от линзы до пластины, соответствующее этому радиусу;  $a$  — величина зазора между вершиной линзы и стеклянной пластиной (из-за наличия пылинок).



**Рис. 4.** К определению разности хода интерферирующих волн

Из рис. 4 следует:

$$\Delta = 2hn + \frac{\lambda_0}{2}, \quad (3)$$

где  $2h$  — геометрическая разность хода волн;  $n$  — показатель преломления среды в зазоре (для воздуха  $n = 1$ );  $\lambda_0/2$  — слагаемое, появившееся из-за изменения фазы колебаний волны при отражении от оптически более плотной среды (луч  $1''$ ).

Приравняв правые части (2) и (3), получим:

$$k\lambda_0 = 2h. \quad (4)$$

Выразим  $h$  через известные величины (см. рис. 4):

$$h = h' + a,$$

но

$$(R - h')^2 = R^2 - r_k^2,$$

или

$$r_k^2 = 2Rh' - (h')^2.$$

Так как  $R \gg h'$ , то можно принять:  $r_k^2 = 2Rh'$ , т. е.

$$h' = \frac{r_k^2}{2R}.$$

Тогда

$$h = \frac{r_k^2}{2R} + a. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим:

$$k\lambda_0 = \frac{r_k^2}{R} + 2a. \quad (6)$$

Определить  $\lambda_0$  из (6) не представляется возможным, так как кроме  $\lambda_0$  неизвестна и величина  $a$ .

Поэтому проводят еще одно измерение для кольца с номером  $m$ :

$$m\lambda_0 = \frac{r_m^2}{R} + 2a. \quad (7)$$

Решая совместно (6) и (7), получим рабочую форму для определения  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \frac{r_k^2 - r_m^2}{R(k - m)},$$

или

$$\lambda_0 = \frac{d_k^2 - d_m^2}{4R(k - m)}, \quad (8)$$

где  $d_k$  и  $d_m$  — диаметры соответствующих темных колец.

## 4.2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Включить источник монохроматического света и, наблюдая в окуляр микроскопа, медленно перемещать тубус вверх и вниз, чтобы уловить интерференционную картину.
2. С помощью миллиметровой шкалы, находящейся на кронштейне микроскопа, и микрометрического винта, находящегося сбоку, измерить диаметр 2-го темного интерференционного кольца Ньютона  $d_2$ .  
Для этого:
  - а) установить перекрестие на 2-м кольце слева от его центра;
  - б) записать показания линейки и микрометра.



- в) передвинуть перекрестие на правую сторону этого же кольца и снять показания; разность показаний, равную диаметру 2-го кольца, записать в табл. 1.

3. Аналогично измерить диаметры 4-го и 6-го темных колец.

Таблица 1

Результаты измерений

Номер кольца	Диаметр кольца, мм	$\lambda$ , мкм	$\bar{\lambda}$ , мкм	$\Delta\lambda_i$ , мкм	$\Delta\lambda_i$ , мкм	$\bar{\lambda} \pm \Delta\lambda$ , мкм	$\varepsilon$
2							
4							
6							

### 4.3. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. По формуле (8) вычислить значение длины волны света  $\lambda$ . При вычислениях использовать три парных комбинации диаметров колец Ньютона:

$$d_2 \text{ и } d_4; d_2 \text{ и } d_6; d_4 \text{ и } d_6.$$

2. Определить среднюю величину  $\bar{\lambda}$ ,  $\Delta\lambda_i$  и абсолютную погрешность

$$\Delta\lambda = t_\alpha(n)S,$$

где  $t_\alpha(n)$  — коэффициент Стьюдента;  $S$  — средняя квадратичная погрешность серии измерений:

$$t_\alpha(n) = t_{0,95}(3) = 4,3; S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta\lambda_i)^2}{n(n-1)}}.$$

3. Определить относительную погрешность

$$\varepsilon = \Delta\lambda/\lambda.$$

4. Записать окончательный результат

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda \text{ мкм}; \varepsilon = \%,$$

соблюдая правила округлений.

## 13.5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие волны называются когерентными?

2. Что такое интерференция волн?
3. Что называют оптической разностью хода?
4. Соотношение между разностью фаз и оптической разностью хода.
5. Почему не возникают интерференционные полосы при отражении от других поверхностей линзы и пластины?
6. Какая картина будет наблюдаться, если свет, падающий на линзу, не будет монохромным?
7. Чем отличается от наблюдаемой в работе интерференционная картина колец Ньютона в проходящем свете?

## **14. ЛИТЕРАТУРА**

1. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 2. Электричество. Магнетизм. оптика. [Электронный ресурс]: учеб. пособие / И.В. Савельев. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2016. — 436 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71760>
2. Алешкевич, В.А. Курс общей физики. Оптика. [Электронный ресурс]: учебник / В.А. Алешкевич. — Электрон. дан. — М. : Физматлит, 2011. — 320 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2098>
3. Грабовский, Р.И. Курс физики. [Электронный курс]: учеб. пособие / Р.И. Грабовский. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2012. — 608 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/3718>