

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физика»

# ФИЗИКА

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов всех специальностей и направлений подготовки  
очной и заочной форм обучения*

**ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК.  
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ**



Могилев 2021

УДК 535  
ББК 22.31  
Ф55

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физика» «9» апреля 2021 г., протокол № 7

Составители: ст. преподаватель Н. С. Манкевич;  
канд. физ.-мат. наук, доц. А. И. Ляпин;  
ст. преподаватель Е. В. Пивоварова;  
д-р физ.-мат. наук, доц. А. В. Хомченко

Рецензент канд. техн. наук, доц. Б. Б. Скарыно

В методических рекомендациях излагается порядок выполнения работ по разделам курса физики «Электростатика», «Постоянный ток», «Магнитное поле», приводится описание лабораторных установок, рассматриваются принципы их действия.

Учебно-методическое издание

## ФИЗИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2021

## Содержание

Меры безопасности при проведении лабораторных работ на кафедре «Физика».....	4
1 Лабораторная работа № 2. Изучение процессов заряда-разряда конденсатора.....	5
2 Лабораторная работа № 3. Измерение электродвижущей силы методом компенсации.....	9
3 Лабораторная работа № 4. Определение емкости конденсатора с помощью электростатического вольтметра.....	14
4 Лабораторная работа № 6. Изучение обобщенного закона Ома в интегральной форме для постоянного тока.....	18
5 Лабораторная работа № 9. Определение напряженности магнитного поля Земли.....	24
6 Лабораторная работа № 10. Определение температуры Кюри ферромагнетика.....	28
7 Лабораторная работа № 11. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона.....	34
8 Лабораторная работа № 12. Изучение магнитного поля соленоида с помощью датчика Холла.....	39
9 Лабораторная работа № 14. Изучение закона Ампера.....	43
Список литературы.....	47

## **Меры безопасности при проведении лабораторных работ на кафедре «Физика»**

Лабораторные работы составлены в соответствии с требованиями следующих государственных стандартов: ГОСТ 12.1.01.9–79 *ССБТ. Электробезопасность. Общие требования*; ГОСТ 12.1.030–81 *ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление*.

Перед выполнением лабораторных работ необходимо изучить инструкцию по технике безопасности при работе на установках в лаборатории и расписаться в журнале учета прохождения студентами инструкции по технике безопасности.

Перед началом выполнения лабораторной работы студенты должны ознакомиться со схемой, уяснить порядок включения и выключения аппаратуры, а также порядок выполнения лабораторной работы. В случае обнаруженных повреждений следует немедленно заявить об этом преподавателю, который проводит занятия.

Запрещается:

- производить соединение проводов, находящихся под напряжением;
- самостоятельно производить ремонт аппаратуры и макетов;
- оставлять без надзора включенные лабораторные установки;
- при отключении сетевого питания выдергивать питающий силовой шнур из розетки за провод (необходимо это делать, держась за вилку);
- класть сумки, а также другие личные вещи на приборы, лабораторные установки, устройства.

При возникновении аварийной ситуации или обнаружении искрения или запаха дыма следует немедленно отключить аппаратуру и сообщить преподавателю. После окончания лабораторной работы все схемы, макеты и аппаратура должны быть отключены от сети питания, рабочее место приведено в порядок.

## 1 Лабораторная работа № 2. Изучение процессов заряда-разряда конденсатора

**Цель работы:** экспериментально изучить процесс заряда-разряда конденсатора, определить время релаксации и емкость конденсатора.

### *Общие сведения*

Если заряженный конденсатор емкостью  $C$  замкнуть на сопротивление  $R$ , то в контуре возникнет электрический ток  $i$  и конденсатор будет разряжаться.

Получим закон разряда конденсатора.

Падение напряжения на сопротивлении определяется законом Ома

$$U = R \cdot i. \quad (1.1)$$

Сила тока определяется известной формулой

$$i = -\frac{dq}{dt}, \quad (1.2)$$

где знак  $(-)$  указывает на то, что заряд конденсатора уменьшается.

Так как  $q = C \cdot U$  и, при  $C = \text{const}$ ,  $dq = C \cdot dU$ , то подстановкой в (1.2) и затем в (1.1) получим

$$U = -R \cdot C \cdot \frac{dU}{dt}. \quad (1.3)$$

Разделением переменных в (1.3) и последующим интегрированием выражения, полученного в результате этого разделения, имеем формулу закона изменения напряжения на конденсаторе при его разряде

$$\ln \frac{U}{U_0} = -\frac{t}{R \cdot C}, \quad (1.4)$$

где  $U_0$  – напряжение в начальный момент времени (при  $t = 0$ ).

Потенцированием (1.4) можно получить другой вид формулы закона

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}. \quad (1.5)$$

Из формулы (1.5) следует, что быстрота убывания напряжения зависит от величины  $\tau = R \cdot C$ . Эта величина имеет размерность времени и называется временем релаксации или постоянной времени данного контура.

Время релаксации – это физическая величина, равная промежутку времени разряда, при котором напряжение на конденсаторе уменьшается в  $e$  раз.

Для определения времени релаксации можно определить промежуток времени разряда, в течение которого напряжение уменьшается в 2 раза. В этом

случае (1.4) примет такой вид:

$$\ln 2 = \frac{t_{1/2}}{\tau}.$$

Из последнего выражения получим следующую формулу для  $\tau$ :

$$\tau = \frac{t_{1/2}}{0,693}. \quad (1.6)$$

Таким образом, для вычисления времени релаксации достаточно на осциллограмме найти момент времени, когда значение напряжения  $U$  на конденсаторе равно половине начального значения  $U_0$ , и по формуле (1.6) найти  $\tau$ .

Из формулы (1.4) следует, что график функции  $\ln \frac{U_0}{U} = f(t)$  является линейным. Причем тангенс угла  $\varphi$  наклона графика к оси времени (оси  $x$ )

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{1}{R \cdot C}. \quad (1.7)$$

Таким образом, для определения емкости конденсатора достаточно построить график функции  $\ln \frac{U_0}{U} = f(t)$  и определить  $\operatorname{tg}\varphi$  по формуле

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\Delta \ln \frac{U_0}{U}}{\Delta t}. \quad (1.8)$$

Затем вычислить емкость конденсатора:

$$C = \frac{1}{R \cdot \operatorname{tg}\varphi}. \quad (1.9)$$

### ***Описание лабораторной установки***

Лабораторная установка состоит из измерительного стенда, показанного на рисунке 1.1, мультиметра и компьютера, используемого в качестве дисплея осциллографа.

При указанных на схеме соединениях переключение тумблера SA1 в положение «**заряд**» приводит к замыканию клемм SA1.1 и размыканию клемм SA1.2 – происходит заряд конденсатора. При переключении тумблера SA1 в положение «**разряд**» клеммы SA1.1 размыкаются, а SA1.2 замыкаются – происходит разряд конденсатора.

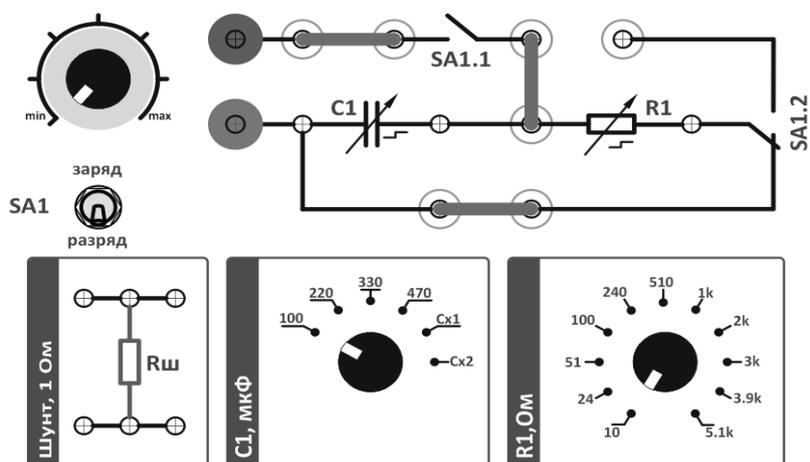


Рисунок 1.1 – Схема измерительного стенда

Если к клеммам конденсатора подключен осциллограф, то на его экране можно наблюдать осциллограмму процесса разряда.

Изменив схему соединений, можно исследовать процесс заряда конденсатора. Изучение процессов заряда-разряда можно проводить при различных значениях емкости и активного сопротивления.

### *Программа работы*

#### *Проверка закона разряда конденсатора.*

1 Установить регулятор напряжения в начальное положение (min), переключатель выбора емкости  $C1$  – в положение «330 мкФ», переключатель выбора сопротивления  $R1$  – в положение «100 Ом», тумблер SA1 – в положение «заряд».

2 Собрать схему, как показано на рисунке 1.2.

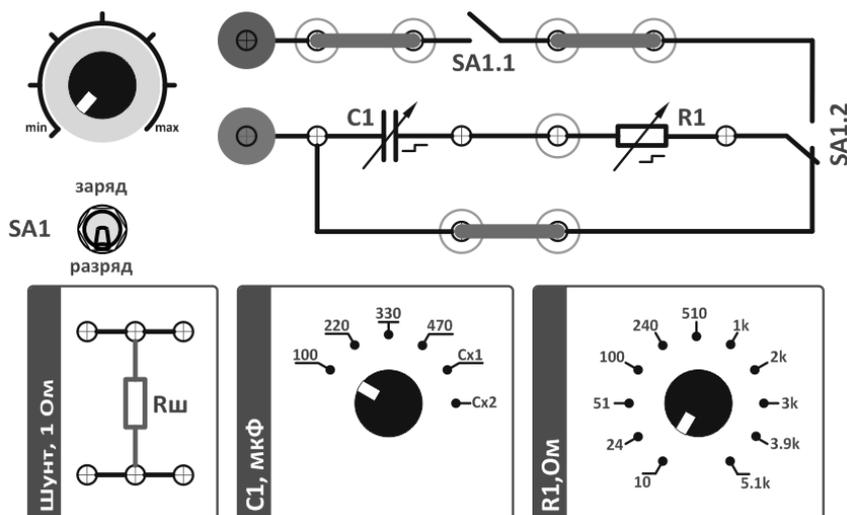


Рисунок 1.2 – Схема соединений для исследования процесса заряда конденсатора

3 Подключить установку к сети. Включить питание тумблером на задней стенке.

4 Установить регулятором значение напряжения  $U_0 = 20$  В, напряжение контролировать по мультиметру.

5 Включить компьютер, выбрать «Физика». В правом нижнем углу экрана нажатием ярлыка DISco запустить программу **DiScodigitalscope** для работы с осциллографом.

6 На верхней панели инструментов включить режим самописца.

7 На нижней панели инструментов настроить используемый канал  $B$  осциллографа: напряжение  $U = 20$  В; период  $T = 10$  мс. В правом нижнем углу установить 3 с и включить кнопку автоматической остановки самописца.

8 Нажатием кнопки «Запуск» в правом нижнем углу экрана запустить самописец и сразу перевести тумблер SA1 в положение «разряд».

9 Установить мышкой компьютера вертикальные маркеры в начале и конце разряда (смотреть по постоянству  $U_{B2}$ ). Полученный интервал разделить на десять частей. Уменьшить шаг временной оси можно с помощью кнопки «Период» на панели инструментов. Перемещая маркер « $\Delta$ » вдоль полученной осциллограммы процесса разряда, определить значения напряжений при десяти значениях времени (по шкале  $x$ ). Значения напряжения и времени брать на панели управления под заголовком «Параметры сигнала под маркером».

10 Полученные данные занести в таблицу 1.1.

11 По выбранным ранее значениям  $R$ ,  $C$  и  $U_0$  рассчитать по формуле (1.5) теоретические значения  $U$ , результаты занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Проверка закона разряда конденсатора

Номер измерения	Заданное значение			Результат измерений		Результат вычислений
	$C_1, \Phi$	$U_0, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$t, \text{с}$	$U, \text{В}$	$U, \text{В}$
1						
2						
3						

12 Построить графики теоретической и экспериментальной зависимостей напряжения на конденсаторе при его разряде как функции времени. Сравнить полученные графики и сделать вывод.

#### *Определение времени релаксации.*

1 По полученной в первом упражнении осциллограмме процесса разряда определить момент времени  $t_{1/2}$ , когда значение напряжения  $U$  на конденсаторе равно половине его начального значения  $U_0$ .

При необходимости определить значения  $U_{1/2}$  и  $t_{1/2}$  при других величинах  $C_1, R_1, U_0$ . Данные занести в таблицу 1.2.

2 Вычислить время релаксации по формуле (1.7) и занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Определение времени релаксации

Номер измерения	Заданное значение			Результат измерений		Результат вычислений	
	$C_1, \Phi$	$U_0, В$	$R_1, Ом$	$t/2, с$	$U/2, В$	$\tau, с$	$\tau_{cp}, с$
1							
2							
3							

*Определение емкости конденсатора.*

1 По данным таблицы 1.1 вычислить значения  $\ln \frac{U_0}{U_i}$ .

2 Построить график функции  $\ln \frac{U_0}{U_i} = f(t)$  и по формуле (1.8) определить значение  $\text{tg} \varphi$  (угла наклона графика к оси времени).

3 По формуле (1.9) вычислить емкость конденсатора  $C_x$ .

### **Контрольные вопросы**

1 Выведите формулу закона разряда конденсатора через резистор.

2 Дайте определение времени релаксации.

3 Как экспериментально определяется время релаксации?

4 Как экспериментально определяется емкость конденсатора?

## **2 Лабораторная работа № 3. Измерение электродвижущей силы методом компенсации**

**Цель работы:** изучить метод компенсации и экспериментально измерить ЭДС гальванических элементов.

### **Общие сведения**

Одним из условий возникновения упорядоченного движения электрических зарядов в проводнике является наличие в нём электрического поля, способного перемещать заряды.

Потенциальные силы электростатического поля не могут поддерживать постоянный ток в цепи, т. к. протекание тока неизбежно приводит к выравниванию потенциалов между заряженными проводниками. Для поддержания электрического тока в цепи необходимо наличие источника энергии (источника тока) не электростатической природы. Основной величиной, характеризующей такой источник тока, является его электродвижущая сила (сокращённо ЭДС).

*Электродвижущей силой называют физическую величину, численно равную работе сторонних (непотенциальных) сил по перемещению положительного*

единичного заряда на отдельном участке или по всей цепи.

Сторонние силы приводят в движение заряженные частицы внутри генераторов, гальванических элементов, аккумуляторов и других источников. Природа сторонних сил может быть различной: в генераторах это силы со стороны вихревого электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля, или сила Лоренца, действующая со стороны магнитного поля на электроны в движущемся проводнике; в гальванических элементах это силы, возникающие за счёт энергии химических реакций между электродами и электролитами.

По закону Ома для замкнутой неразветвленной цепи сила тока

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (2.1)$$

откуда для ЭДС получим

$$\varepsilon = IR + Ir, \quad (2.2)$$

где  $IR$  – напряжение на внешнем участке цепи (на нагрузке);

$Ir$  – напряжение на внутреннем участке цепи (на электролите).

При подключении вольтметра к клеммам источника тока он показывает напряжение  $U$  на внешнем участке цепи:

$$U = \varepsilon - Ir. \quad (2.3)$$

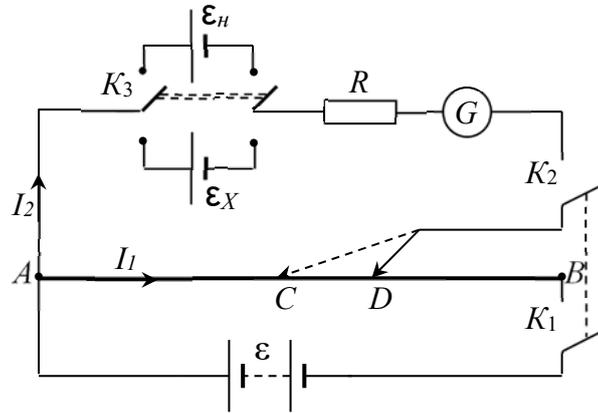
Из формулы (2.3) видно, что напряжение  $U$ , измеряемое вольтметром, может быть равно ЭДС только в том случае, если  $r = 0$  или  $I = 0$ . Однако внутреннее сопротивление источника тока всегда отлично от нуля ( $r \neq 0$ ). Следовательно, в момент измерения ЭДС с помощью вольтметра ток через элемент должен быть равен нулю ( $I = 0$ ). Но в этом случае и вольтметр ничего не покажет. Поэтому ЭДС источников тока измеряют не вольтметрами, а методом компенсации. Сущность метода компенсации при измерении ЭДС заключается в подборе на участке электрической цепи такого напряжения, которое равно ЭДС исследуемого источника тока. Далее поясняется метод компенсации.

Схема электрической цепи для определения ЭДС методом компенсации изображена на рисунке 2.1. При замыкании ключа  $K_1$  по проволоке  $AB$  потечет ток  $I_1$ , и вдоль нее возникнет равномерное падение потенциала от значения  $\varphi_A$  (в точке  $A$ ) до значения  $\varphi_B$  (в точке  $B$ ). Если теперь замкнуть ключ  $K_2$  и ключом  $K_3$  подключить источник  $\varepsilon_x$ , то в цепи  $A-\varepsilon_x-R-G-D$  пойдет ток  $I_2$ . В этой цепи действуют ЭДС источника  $\varepsilon_x$  и напряжение  $U_{AD} = \varphi_A - \varphi_D$  на участке  $AD$ , обусловленное током  $I_1$ . Поэтому ток  $I_2$  определяется законом Ома в интегральной форме для неоднородной цепи:

$$I_2 = \frac{U_{AD} - \varepsilon_x}{r_x + R + r_G}, \quad (2.4)$$

где  $r_x$  – внутреннее сопротивление гальванического элемента с неизвестной ЭДС;  
 $r_G$  – сопротивление гальванометра  $G$ ;  
 $R$  – ограничительное сопротивление.

В формуле (2.4) величина  $\varepsilon_x$  взята со знаком  $(-)$ , т. к. источники  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon$  включены навстречу друг другу и ЭДС источника  $\varepsilon_x$  препятствует протеканию тока  $I_2$ . Из формулы видно, что в зависимости от соотношения величин  $U_{AD}$  и  $\varepsilon_x$  ток  $I_2$  может протекать в одном и в другом направлениях.



$G$  – нуль-гальванометр;  $AB$  – реохорд с подвижным контактом  $D$  (ползунком);  
 $\varepsilon_x$  – исследуемый элемент;  $\varepsilon_n$  – нормальный элемент Вестона

Рисунок 2.1 – Схема лабораторной установки

Значение  $U_{AD}$  зависит от положения ползунка реохорда. Поэтому, перемещая ползунок реохорда, можно добиться совпадения значений  $U_{AD}$  и  $\varepsilon_x$ , т. е. компенсации  $\varepsilon_x$ . В этом случае ток  $I_2$  будет равен нулю, и при замкнутых ключах  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  стрелка гальванометра установится на нуле.

Равенство  $U_{AD} = \varepsilon_x$  может быть достигнуто лишь при условии, когда величина ЭДС основного источника  $\varepsilon$  будет больше ЭДС исследуемого источника  $\varepsilon_x$ . В противном случае максимальное напряжение на реохорде  $U_{AB}$  будет меньше  $\varepsilon_x$  и компенсация не будет достигнута.

Получим формулу для определения ЭДС методом компенсации.

Напряжение на участке  $AD$  реохорда определяется сопротивлением  $R_{AD}$  и значением силы тока  $I_1$ , текущего по этому участку:

$$U_{AD} = I_1 \cdot R_{AD}. \quad (2.5)$$

Поэтому при  $U_{AD} = \varepsilon_x$ ,  $I_2 = 0$  из формулы (2.5) следует, что

$$I_1 \cdot R_{AD} = \varepsilon_x. \quad (2.6)$$

Это значит, что напряжение  $U_{AD}$  на участке  $AD$  компенсирует ЭДС исследуемого элемента  $\varepsilon_x$ .

Заменив исследуемый элемент эталонным  $\varepsilon_n$  (с известной ЭДС) и перемещая ползунок реохорда, можно найти новое значение напряжения  $U_{AC}$  на участ-

ке  $AC$ , которое будет компенсировать  $\varepsilon_n$ . В этом случае условие компенсации будет иметь вид:

$$I_1 \cdot R_{AC} = \varepsilon_n. \quad (2.7)$$

Сила тока на участке  $AB$  остаётся прежней, т. к. в ветви  $AGC$  тока нет. Разделив почленно (2.6) на (2.7), получим

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{R_{AD}}{R_{AC}}. \quad (2.8)$$

Для калиброванной проволоки реохорда сопротивление участков  $AD$  и  $AC$  пропорционально их длинам. Поэтому

$$\frac{R_{AD}}{R_{AC}} = \frac{l_1}{l_2}, \quad (2.9)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – длины участков  $AD$  и  $AC$  в делениях линейки реохорда.

Подставив (2.9) в (2.8), получим искомую формулу для  $\varepsilon_x$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{l_1}{l_2}. \quad (2.10)$$

### Описание лабораторной установки

На рисунке 2.2 показан внешний вид лабораторной установки.

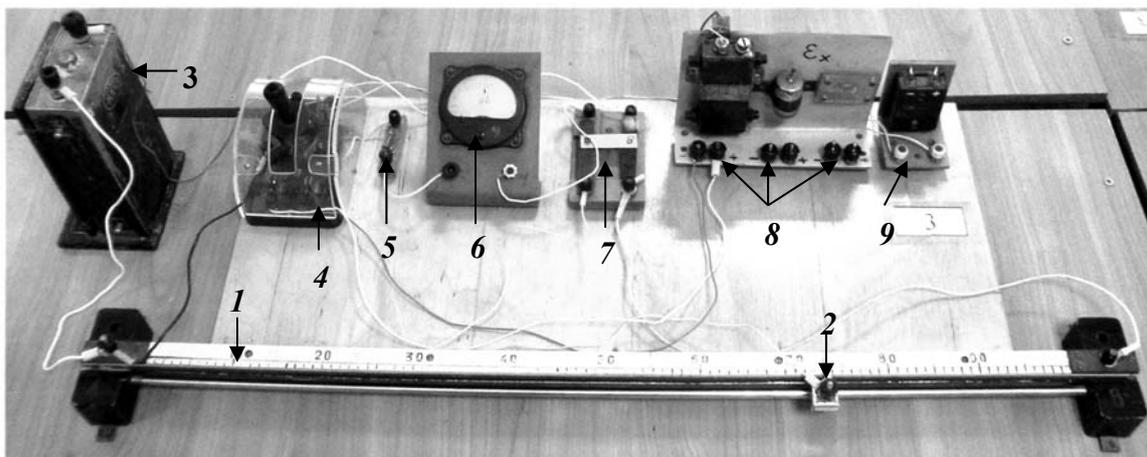


Рисунок 2.2 – Лабораторная установка

Проволока реохорда  $AB$  натянута на масштабную линейку (позиция 1), что позволяет непосредственно отсчитывать длины  $l_1$  и  $l_2$ . Ключи  $K_1$  и  $K_2$  объединены (позиция 7), поэтому возможно одновременно замыкать и размыкать обе цепи на короткое время во избежание быстрого разряда батареи  $\varepsilon$  (позиция 3)

и поляризации элементов  $\varepsilon_x$  (позиция 8),  $\varepsilon_n$  (позиция 9). С этой же целью защиты элемента и гальванометра от сильных токов в момент измерения последовательно с гальванометром (позиция 6) включено ограничивающее сопротивление  $R$  (позиция 5). Исследуемый  $\varepsilon_x$  и нормальный  $\varepsilon_n$  элементы включаются в цепь с помощью ключа  $K_3$  (позиция 4). Компенсация достигается перемещением ползунка реохорда (позиция 2).

В работе применяется высокочувствительный гальванометр с нулевой отметкой, находящейся посередине шкалы. В качестве эталонного источника ЭДС используется нормальный ртутно-кадмиевый элемент Вестона. ЭДС нормального элемента малочувствительна к изменениям температуры и очень мало изменяется со временем, т. к. мала поляризация. Ввиду постоянства ЭДС нормальный элемент удобно использовать в качестве эталона. Сила тока через элемент Вестона не должна превышать  $10^{-6} \dots 10^{-5}$  А. Этот элемент применяется исключительно в компенсационных схемах.

### **Программа работы**

1 Ознакомиться с приборами и собрать цепь по схеме рисунка 2.1. До проверки схемы лаборантом или преподавателем ключи не замыкать.

2 Расположить ползунок реохорда примерно на середине линейки и с помощью переключателя  $K_3$  включить в цепь испытуемый элемент  $\varepsilon_{x1}$ .

3 Замкнуть на короткое время цепь сдвоенным ключом  $K_1-K_2$  и, передвигая ползунок реохорда, найти такое его положение, при котором стрелка гальванометра устанавливается на нуль.

4 Измерить длину плеча  $l_1$  реохорда между точками  $A$  и  $D$ . На линейке реохорда одно деление не равно 1 см, поэтому отсчёт следует вести в делениях. Опыт повторить 4–5 раз и найти среднее значение  $\langle l_1 \rangle$ .

5 С помощью переключателя  $K_3$  включить в цепь нормальный элемент  $\varepsilon_n$  и, следуя пп. 3 и 4, определить длину плеча  $\langle l_2 \rangle$  реохорда.

6 Вычислить ЭДС исследуемого элемента  $\varepsilon_{x1}$  по формуле (2.10) по средним значениям  $\langle l_1 \rangle$  и  $\langle l_2 \rangle$ . Значение  $\varepsilon_n$  указано на лабораторном стенде.

7 Повторить пп. 2–6 для элементов  $\varepsilon_{x2}$  и  $\varepsilon_{x3}$ .

8 Все измеренные и вычисленные значения величин занести в таблицу 2.1, продолжив её ещё для двух неизвестных элементов.

Таблица 2.1 – Результаты измерений электродвижущей силы гальванических элементов

Номер элемента	$l_1$ , дел.	$l_2$ , дел.	$\langle l_1 \rangle$ , дел.	$\langle l_2 \rangle$ , дел.	$\varepsilon_n$ , В	$\varepsilon_x$ , В

### **Контрольные вопросы**

1 Что такое ЭДС?

2 Какова природа сторонних сил в источниках тока?

3 Можно ли измерить ЭДС с помощью вольтметра?

4 В чём заключается метод компенсации?

5 Запишите и поясните закон Ома в дифференциальной форме.

6 Запишите и поясните закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме.

7 Выведите формулу для нахождения  $\varepsilon_x$ .

8 Можно ли измерить  $\varepsilon_x$ , если  $\varepsilon_x > \varepsilon$ ?

### 3 Лабораторная работа № 4. Определение емкости конденсатора с помощью электростатического вольтметра

**Цель работы:** экспериментально определить электрические емкости конденсаторов и проверить законы их параллельного и последовательного соединения.

#### *Общие сведения*

Конденсатором называется система двух близкорасположенных проводников. При этом проводники имеют такие формы, что при сообщении им равных по значению, но противоположных по знаку зарядов поле, создаваемое этой системой, сосредоточено в области пространства, ограниченной проводниками. Эти проводники называются обкладками (или пластинами) конденсатора.

Электрической емкостью называется физическая величина, равная отношению заряда  $Q$ , накопленного в конденсаторе, и разности потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) между его обкладками:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U}. \quad (3.1)$$

Из формулы (3.1) следует физический смысл величины: *электрическая емкость численно равна заряду, который нужно сообщить конденсатору, чтобы его разность потенциалов увеличить на 1 В.*

Емкость плоского конденсатора определяется площадью его обкладок  $S$  и величиной зазора  $d$  между ними, а также диэлектрической проницаемостью среды  $\varepsilon$  между обкладками:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d}.$$

Один из способов определения емкости конденсатора основан на законе сохранения электрического заряда: *алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы не изменяется со временем.*

Рассматривая конденсатор как изолированную систему, получим формулу для определения его емкости.

Эталонный конденсатор с известной емкостью  $C_0$  зарядим до разности

потенциалов  $U_0$  (рисунок 3.1). Затем, отключив его от источника напряжения, быстро подключим к нему параллельно конденсатор неизвестной емкости  $C_x$ . Тогда первоначальный заряд  $Q_0$  эталонного конденсатора распределится между обоими конденсаторами и разность потенциалов между обкладками конденсаторов станет равной  $U_1$ . Пренебрегая потерями в момент соединения конденсаторов, закон сохранения заряда можно записать в виде

$$Q_0 = Q_1 + Q_2, \quad (3.2)$$

где  $Q_1$  – заряд, оставшийся на эталонном конденсаторе  $C_0$  после подключения к нему конденсатора  $C_x$ ;

$Q_2$  – заряд, перешедший на конденсатор  $C_x$ .

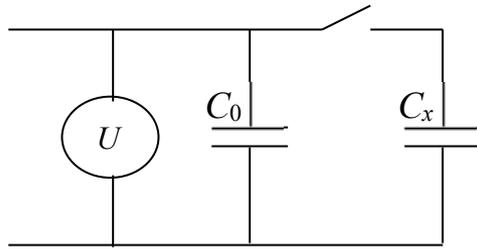


Рисунок 3.1 – Пояснение сущности метода измерения электроёмкости

Выразим заряды в формуле (3.2) через емкости и разности потенциалов с помощью формулы (3.1):

$$Q_0 = C_0 \cdot U_0; \quad Q_1 = C_0 \cdot U_1; \quad Q_2 = C_x \cdot U_1.$$

Подставив их в формулу (3.2), получим

$$C_0 \cdot U_0 = C_0 \cdot U_1 + C_x \cdot U_1. \quad (3.3)$$

Из (3.3) выразим емкость неизвестного конденсатора и получим расчетную формулу

$$C_x = \frac{C_0 \cdot (U_0 - U_1)}{U_1}. \quad (3.4)$$

### **Описание лабораторной установки**

Разность потенциалов между обкладками конденсаторов измеряется с помощью электростатического вольтметра. Измерительный механизм электростатического вольтметра состоит из подвижного и неподвижного электродов, изолированных друг от друга. Поэтому при измерениях постоянного напряжения ток через вольтметр не протекает. Так как емкость вольтметра по сравнению с емкостями, используемыми в работе, ничтожно мала, то погрешностью, вносимой вольтметром, можно пренебречь. На рисунке 3.2 показана электрическая схема установки.

На рисунке 3.3 представлен внешний вид лабораторной установки.

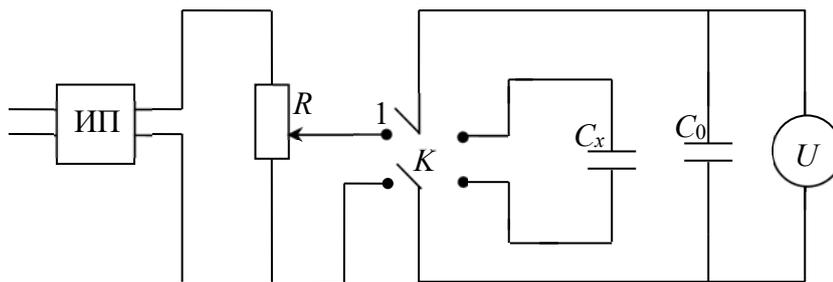
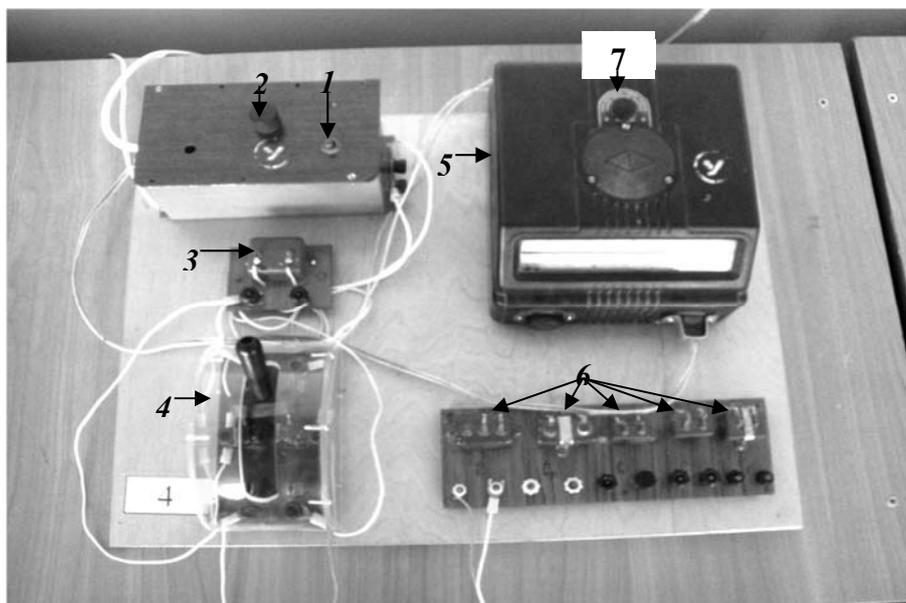


Рисунок 3.2 – Схема лабораторной установки



1 – тумблер источника питания; 2 – потенциометр  $R$ ; 3 – эталонный конденсатор; 4 – ключ  $K$ ; 5 – электростатический вольтметр; 6 – набор исследуемых конденсаторов; 7 – корректор

Рисунок 3.3 – Лабораторная установка

### ***Программа работы***

Собрать схему согласно рисунку 3.2. Номера исследуемых конденсаторов выбираются по указанию преподавателя. Включить освещение шкалы вольтметра. Проверить, находится ли «световой зайчик» на нуле. Если нет, то вместе с лаборантом или преподавателем установить его корректором на нулевую отметку шкалы. До проверки собранной цепи преподавателем или лаборантом источник питания не включать.

#### ***Определение емкости конденсаторов.***

1 Рукоятку потенциометра поставить в левое крайнее положение. Замкнуть ключ  $K$  на источник (на рисунке 3.3 положение от себя).

2 Включить выпрямитель в сеть и с помощью потенциометра  $R$  увеличить напряжение на эталонном конденсаторе до 90 В. Снять показания вольтметра  $U_0$ .

3 Перевести ключ  $K$  в противоположное положение, тем самым отключив конденсатор  $C_0$  от источника питания и подключив его к конденсатору с неизвестной емкостью  $C_x$ . Снять показания вольтметра  $U_1$ . Измерения проделать не менее трех раз, подавая различные напряжения (90, 100, 110 В) на эталонный конденсатор. При этом после каждого измерения конденсатор неизвестной емкости обязательно разряжать. Данные занести в таблицу 3.1.

4 По формуле (3.4) подсчитать емкость  $C_x$ . Найти среднее значение  $\langle C_x \rangle$ . Данные занести в таблицу 3.1.

5 Повторить пп. 3 и 4 для других конденсаторов по указанию преподавателя. Данные занести в таблицу 3.1, которую продолжить для других конденсаторов.

Таблица 3.1 – Результаты измерения емкости отдельных конденсаторов

Номер конденсатора	Номер измерения	$U_0$ , В	$U_1$ , В	$C_x$ , мкФ	$\langle C_x \rangle$ , мкФ

*Определение емкости батареи конденсаторов.*

1 Соединить два любых из заданных конденсаторов параллельно (рисунок 3.4, а). Определить емкость батареи  $C_{БАТ}$  по методике, описанной ранее. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.2.

2 Вычислить емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов по формуле

$$C'_{БАТ} = C_{1x} + C_{2x},$$

где значения  $C_{1x}$  и  $C_{2x}$  берутся из таблицы 3.1.

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.2.

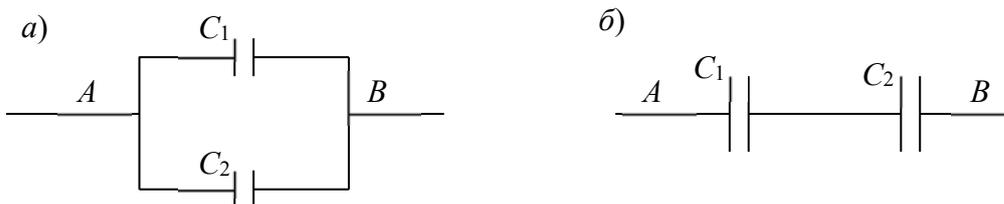


Рисунок 3.4 – Схемы параллельного и последовательного соединений

Таблица 3.2 – Результаты измерений емкости параллельно соединенных конденсаторов

Вид соединения	Номер измерения	$U_0$ , В	$U_1$ , В	$C_{БАТ}$ , мкФ	$\langle C_{БАТ} \rangle$ , мкФ	$C'_{БАТ}$ , мкФ

3 Соединить два любых из заданных конденсаторов последовательно (рисунок 3.4, б). Определить емкость батареи  $C_{БАТ}$  по методике, описанной ранее. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.2.

4 Вычислить емкость батареи последовательно соединенных конденсаторов по формуле

$$\frac{1}{C'_{БАТ}} = \frac{1}{C_{1x}} + \frac{1}{C_{2x}}.$$

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.2.

5 Соединить три конденсатора последовательно и определить емкость батареи. Сравнить полученный результат с емкостью батареи, вычисленной по формуле

$$\frac{1}{C'_{БАТ}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_{ix}}.$$

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.2.

6 Сравнить полученные экспериментальное и теоретическое значения емкостей различных соединений конденсаторов.

### ***Контрольные вопросы***

1 Что такое электрическая емкость конденсатора? От чего она зависит и в каких единицах измеряется?

2 В чем заключается сущность метода измерения, использованного в данной лабораторной работе?

3 Какой закон положен в основу вывода рабочей формулы? Выведите рабочую формулу.

4 Выведите формулы емкости батареи параллельно и последовательно соединенных конденсаторов.

## **4 Лабораторная работа № 6. Изучение обобщенного закона Ома в интегральной форме для постоянного тока**

**Цель работы:** изучить закон Ома в интегральной форме и экспериментально определить ЭДС и внутреннее сопротивление гальванического элемента.

### ***Общие сведения***

Если в проводнике действует только *электростатическое поле*, то в нем может возникнуть только *кратковременный электрический ток*. Действительно, если обкладки конденсатора, заряженного до некоторой разности потенциалов  $\Delta\phi$ , соединить проводником, то по мере протекания тока конденсатор будет

разряжаться, с течением времени потенциал во всех точках системы уравнивается и ток прекратится.

Для поддержания электрического тока достаточно длительное время необходим источник энергии, в котором за счет сил *нэлектростатического происхождения* осуществлялся бы перенос носителей тока в исходную точку с большим потенциалом. Указанные силы называются *сторонними*.

Сторонние силы могут быть химической, электромагнитной природы и др. Например, в большинстве аккумуляторов роль сторонних сил играют силы химического взаимодействия, приводящие к разделению молекул электролитов на разноименные заряды. В этом случае разность потенциалов на электродах аккумулятора поддерживается за счет энергии химической реакции. Основными характеристиками такого источника тока являются его электродвижущая сила (сокращённо ЭДС) и внутреннее сопротивление.

*Электродвижущей силой* называют физическую величину  $\varepsilon$ , численно равную работе сторонних (непотенциальных) сил по перемещению положительного единичного заряда на рассматриваемом участке цепи.

*Однородным участком цепи* называется такой участок, который **не** содержит источник ЭДС.

*Неоднородный участок цепи* содержит источник ЭДС.

На рисунке 4.1 показан неоднородный участок цепи, на котором электрический ток  $I$  поддерживается и разностью потенциалов  $(\varphi_1 - \varphi_2)$ , и электродвижущей силой  $\varepsilon$ .

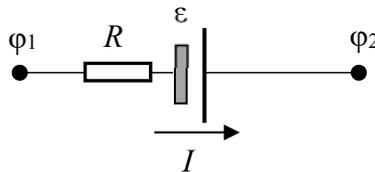


Рисунок 4.1 – Неоднородный участок электрической цепи

Математическое выражение *закона Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме* записывается в виде

$$I \cdot R_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon_{12}, \quad (4.1)$$

где  $R_{12}$  – электрическое сопротивление участка, которое содержит внешнее сопротивление  $R$  цепи и внутреннее сопротивление  $r$  источника,  $R_{12} = R + r$ .

ЭДС, так же как и сила тока, является алгебраической величиной, поэтому следует учитывать ее знак. Если ЭДС *способствует* перемещению положительных зарядов в данном направлении, то она считается *положительной*. Если ЭДС *препятствует* перемещению положительных зарядов в данном направлении, то она считается *отрицательной*.

Произведение сопротивления  $R_{12}$  участка цепи и силы тока  $I$  в нем называется напряжением. Из формулы (4.1) следует физический смысл напряжения: *напряжением на участке цепи называется физическая величина, численно*

равная алгебраической сумме работ электростатических и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль этого участка.

Формула (4.1) называется также формулой обобщенного закона Ома, т. к. она справедлива для различных цепей.

Если на рисунке 4.1 концы участка замкнуть проводником, то получим неразветвленную замкнутую цепь (рисунок 4.2). В этом случае  $\varphi_1 = \varphi_2$  и из формулы (4.1) получим закон Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (4.2)$$

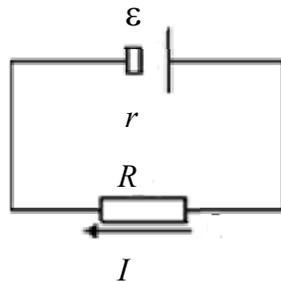


Рисунок 4.2 – Неразветвленная замкнутая цепь

В случае неразветвленной замкнутой цепи ЭДС равна работе по перемещению единичного положительного заряда по всей цепи.

Из формулы (4.2) следует

$$\varepsilon = IR + Ir, \quad (4.3)$$

где  $IR$  – напряжение на внешнем участке цепи (на нагрузке);

$Ir$  – напряжение на внутреннем участке цепи (между электродами).

При подключении к клеммам источника тока вольтметра его сопротивление является нагрузкой для источника. Поэтому вольтметр покажет не ЭДС источника, а напряжение  $U_B$  на внутреннем сопротивлении вольтметра:

$$I \cdot R_B = \varepsilon - I \cdot r. \quad (4.4)$$

Из формулы (4.4) следует, что напряжение  $U_B$ , измеряемое вольтметром, может быть равно ЭДС только в том случае, если  $r = 0$  или  $I = 0$ . Так как внутреннее сопротивление источника тока всегда отлично от нуля ( $r \neq 0$ ), то в момент измерения ЭДС ток через элемент должен быть равен нулю. Однако в этом случае и вольтметр ничего не покажет. Поэтому ЭДС источников тока измеряют, как правило, методом компенсации, когда  $I = 0$ .

В случае *однородного* участка цепи (рисунок 4.3) с током  $I$   $\varepsilon = 0$ ,  $r = 0$  и формула (4.1) принимает следующий вид:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \quad \text{или} \quad I = \frac{U}{R}. \quad (4.5)$$

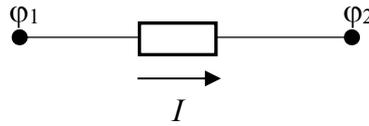


Рисунок 4.3 – Однородный участок цепи

### Описание лабораторной установки и метода измерений

Электрическая схема установки показана на рисунке 4.4.

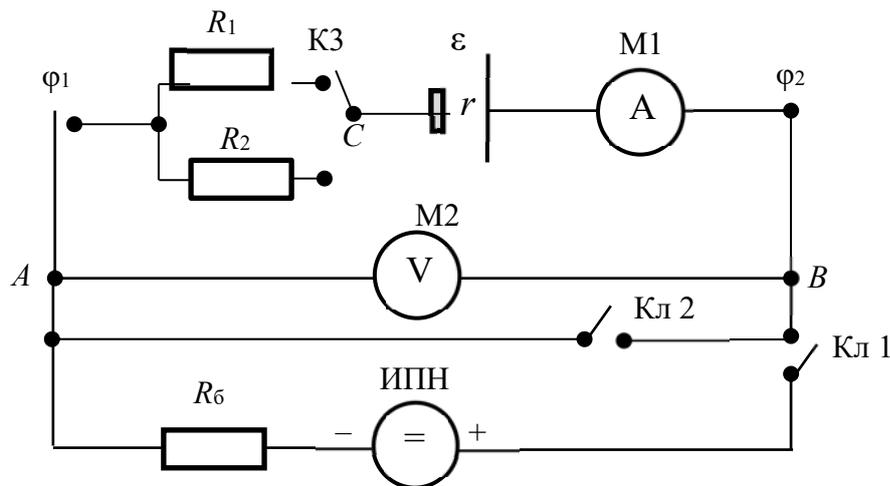


Рисунок 4.4 – Электрическая схема лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из неоднородного участка цепи, который содержит сопротивления нагрузки  $R_1$ ,  $R_2$  и источник ЭДС с внутренним сопротивлением  $r$ . Сила тока на рассматриваемом участке измеряется мультиметром М1. Разность потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) создается внешним источником постоянного напряжения ИПН. Коммутация цепи осуществляется ключами КЛ1, КЛ2 и коммутатором КЗ.

Так как участок  $A-B$  не содержит исследуемый источник, то  $\varepsilon = 0$ ,  $r = 0$  и формула (4.1) принимает следующий вид:

$$IR_B = U_B = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (4.6)$$

Из формулы (4.6) следует, что напряжение на вольтметре М2 равно разности потенциалов на изучаемом неоднородном участке цепи, т. е. вольтметр показывает разность потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ).

Преобразуем формулу (4.1) с учетом (4.6) к следующему виду:

$$I = \frac{U_B}{R + r} \pm \frac{\varepsilon_{12}}{R + r}. \quad (4.7)$$

В формуле (4.7) величины  $U_B$  и  $\varepsilon$  могут иметь как одинаковые, так и противоположные знаки. Измерения предпочтительно проводить при условии, когда  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  и  $\varepsilon$  имеют разные знаки и  $|(\varphi_1 - \varphi_2)| > |\varepsilon|$ . При постоянных значениях величин  $R$ ,  $r$  и  $\varepsilon_{12}$  формула (4.7) дает прямо пропорциональную зависимость силы тока от разности потенциалов  $U_B$  на участке. Второй член правой части определяет положение графика относительно оси тока  $I$ .

На рисунке 4.5 показан пример графика, когда «плюс» внешнего источника ИПН подключен к «плюсу» источника ЭДС (зарядка аккумулятора).

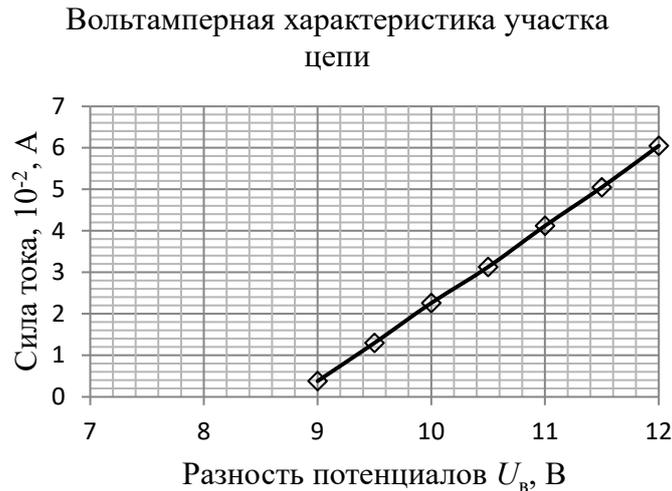


Рисунок 4.5 – График зависимости силы тока от разности потенциалов на участке цепи

Тангенс угла наклона графика к оси  $U_B$  равен коэффициенту пропорциональности  $1/(R + r)$ :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta I}{\Delta U_B} = \frac{1}{R + r}. \quad (4.8)$$

По вычисленному значению  $\operatorname{tg}\alpha$  и известному значению  $R_{12}$  можно по формуле (4.8) определить внутреннее сопротивление исследуемого источника. Затем, выбрав любую пару значений  $I$  и  $U_B$ , по формуле (4.7) определить ЭДС. Также ЭДС можно определить графически, продлив полученный график до пересечения с осью  $U_B$ . Точка пересечения будет соответствовать значению  $\varepsilon$ .

Таким образом, экспериментальная часть работы по определению внутреннего сопротивления и ЭДС исследуемого источника сводится к измерению значения силы тока на неоднородном участке цепи при различных значениях разности потенциалов и построению вольтамперной характеристики.

Если при замкнутом ключе Кл1 дополнительно замкнуть ключ Кл2, то разность потенциалов на исследуемом участке цепи будет равна нулю и получим замкнутую неразветвленную цепь, которая описывается формулой (4.2). Для изучения такой цепи вольтметр следует подключить между точками  $B-C$ , т. е. к сопротивлению нагрузки  $R_1$  или  $R_2$ . Поочередно включая  $R_1$  и  $R_2$  и измеряя

соответствующие им значения  $U_1, I_1$  и  $U_2, I_2$ , можно определить ЭДС источника по формуле

$$\varepsilon = (R_2 - R_1) \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{I_1 - I_2}. \quad (4.9)$$

### ***Программа работы***

*Изучение обобщенного закона Ома.*

1 Электрическая цепь по схеме рисунка 4.4 дается собранной.

Убедиться, что исследуемый элемент и внешний источник соединены одноимёнными полюсами. Ключи Кл1, Кл2 и коммутатор К3 должны быть отключены. До проверки схемы лаборантом или преподавателем установку не включать.

2 На источнике ИПН регулировочную ручку поставить в крайнее левое положение. На амперметре М1 установить предел измерения 200 мА для постоянного тока, а на вольтметре М2 предел измерения 20 В. Подключить вольтметр М2 к точкам А–В.

3 Подключить исследуемый источник в цепь. Включить источник ИПН. Коммутатором К3 подключить сопротивление  $R_1$  и замкнуть ключ Кл1.

4 Вращая регулировочную рукоятку источника ИПН, по индикатору вольтметра М2 установить  $U_B = 15$  В и дождаться установления постоянного значения тока на амперметре М1.

5 Уменьшая разность потенциалов от 15 до 10 В с шагом 1 В, для каждого значения  $U_B$  измерить силу тока по амперметру М1. Результаты измерения занести в таблицу 4.1.

6 Установить  $U_B = 15$  В по индикатору вольтметра М2. Коммутатором К3 подключить сопротивление  $R_2$  и дождаться установления постоянного значения силы тока на амперметре М1. Затем п. 5 повторить для сопротивления  $R_2$ .

7 По данным таблицы 4.1 построить вольтамперные характеристики исследуемого участка цепи в одной системе координат  $I$  и  $U_B$ .

8 По формуле (4.8) определить тангенсы углов наклона прямых и вычислить значения внутреннего сопротивления  $r_1$  и  $r_2$ . Вычислить среднее значение.

Значения сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  указаны на лабораторном стенде.

9 Выбрать из таблицы 4.1 любую пару значений  $I$  и  $U_B$  при  $R_1$  и  $R_2$  и по формуле (4.7) определить  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Вычислить среднее арифметическое значение  $\langle \varepsilon \rangle$ .

10 На графике, полученном в п. 7, продлить экспериментальные прямые до пересечения с осью  $U_B$  и по точке пересечения определить  $\varepsilon_{гр}$ .

Все полученные значения занести в таблицу 4.1.

*Закон Ома для неразветвленной замкнутой цепи.*

1 При замкнутом ключе Кл1 дополнительно замкнуть ключ Кл2. По показанию вольтметра М2 убедиться, что  $U_B = 0$ , т. е. разность потенциалов на участке А–В равна нулю.

2 Вольтметр М2 подключить к точкам В–С. Коммутатором К3 выбрать сопротивление  $R_1$  и измерить напряжение  $U_1$  и силу тока  $I_1$ .

3 П. 3 повторить для сопротивления  $R_2$ , измерив значения  $U_2$  и  $I_2$ . Значе-

ния  $U_1, I_1$  и  $U_2, I_2$  занести в таблицу 4.1.

4 По формуле (4.9) вычислить значение  $\varepsilon_{замк}$  и сравнить его с  $\langle \varepsilon \rangle$  и  $\varepsilon_{гр}$ .

5 Результат анализа значений  $\varepsilon_{замк}$ ,  $\langle \varepsilon \rangle$  и  $\varepsilon_{гр}$  отразить в выводе.

Таблица 4.1 – Результаты измерений и вычислений

$R, \text{ Ом}$	$U_B, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$\text{tg}\alpha$	$r_i, \text{ Ом}$	$\langle r \rangle, \text{ Ом}$	$\varepsilon_i, \text{ В}$	$\langle \varepsilon \rangle, \text{ В}$	$\varepsilon_2, \text{ В}$	$U_i, \text{ В}$	$I_i, \text{ А}$	$\varepsilon_{замк}, \text{ В}$
$R_1$											
$R_2$											

### **Контрольные вопросы**

1 Какова природа сторонних сил в источниках тока?

2 Запишите и поясните закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме.

3 Поясните, как в работе определяются внутреннее сопротивление и ЭДС.

4 Можно ли измерить ЭДС, если изменить полярность его подключения?

5 Можно ли определить ЭДС, если  $\varepsilon > (\varphi_1 - \varphi_2)$ ?

## **5 Лабораторная работа № 9. Определение напряженности магнитного поля Земли**

**Цель работы:** определить значение и направление напряженности магнитного поля Земли.

### **Общие сведения**

Земля в целом представляет собой огромный шаровой магнит, полюса которого лежат вблизи географических полюсов: вблизи северного географического полюса расположен южный полюс  $S$ , а вблизи южного географического – северный полюс  $N$ . Магнитное поле Земли на экваторе направлено горизонтально (точка  $B$ ), а у магнитных полюсов – вертикально (точки  $S$  и  $N$ ) (рисунок 5.1). В остальных точках земной поверхности магнитное поле Земли направлено под некоторым углом к плоскости горизонта.

Для определения направления вектора напряженности земного магнитного поля в данной точке надо укрепить магнитную стрелку так, чтобы она могла

свободно вращаться вокруг вертикальной и горизонтальной осей. Это можно сделать, закрепив стрелку на тонкой нити. Стрелка установится при этом по направлению поля Земли. В северном полушарии северный конец будет наклонен к Земле, и стрелка составит с горизонтом угол  $i$  (рисунок 5.2, *a*).

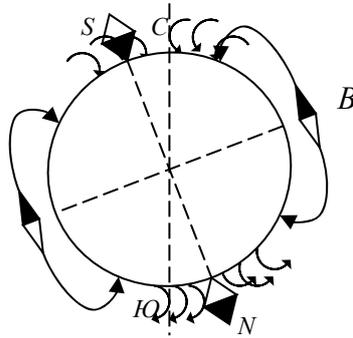


Рисунок 5.1 – Магнитное поле Земли



Рисунок 5.2 – Магнитная стрелка в вертикальной (*a*) и горизонтальной (*б*) плоскостях

Вертикальная плоскость, в которой расположится стрелка, будет составлять с плоскостью географического меридиана угол  $\beta$ . Величину проекции напряженности земного магнитного поля на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей поля Земли  $H_0$ .

Направление горизонтальной составляющей принимается за направление магнитного меридиана, а вертикальная плоскость, в которой устанавливается магнитная стрелка, называется плоскостью магнитного меридиана. Угол  $i$  между направлением магнитного поля Земли и горизонтальной плоскостью называется углом магнитного наклона (см. рисунок 5.2, *a*). Угол  $\beta$  между направлениями магнитного и географического меридианов (рисунок 5.2, *б*) называется углом магнитного склонения.

Горизонтальная составляющая  $H_0$ , угол  $i$  магнитного наклона и угол  $\beta$  магнитного склонения называются элементами земного магнетизма. Зная элементы земного магнетизма, можно определить величину и направление полной напряженности магнитного поля Земли в данной точке по формуле

$$H = \frac{H_0}{\cos i}.$$

Наклонение называется северным, когда ниже оси вращения магнитной стрелки лежит северный полюс, и южным, когда ниже оси вращения стрелки

находится южный полюс.

Угол магнитного наклона можно найти с помощью инклинометра. Он представляет собой магнитную стрелку, укрепленную на горизонтальной оси и снабженную вертикальной шкалой для отсчета углов наклона. Если установить прибор так, чтобы плоскость вращения стрелки совпадала с плоскостью магнитного меридиана, то стрелка установится по направлению магнитных силовых линий. Угол наклона отсчитывается по шкале прибора от горизонтального направления до направления магнитных силовых линий. Зная величину магнитного наклона и величину  $H_0$ , можно определить полную напряженность  $H$  и индукцию  $B$  магнитного поля на данной географической широте:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H .$$

### **Описание лабораторной установки и метода измерения**

В лабораторной работе напряженность магнитного поля определяется с помощью тангенс-гальванометра. Тангенс-гальванометр представляет собой плоскую вертикальную катушку радиусом  $R$  с числом витков  $n$ . В центре катушки, в горизонтальной плоскости, расположен компас. Магнитная стрелка компаса при отсутствии тока в катушке располагается вдоль магнитного меридиана  $NS$  Земли. Поворотом катушки вокруг вертикальной оси можно добиться совмещения плоскости катушки с плоскостью магнитного меридиана. Если после этого по катушке пропускать ток, то магнитная стрелка повернется на некоторый угол  $\alpha$ . При этом на магнитную стрелку будут действовать два поля: горизонтальная составляющая  $H_0$  напряженности магнитного поля Земли и напряженность  $H_1$  поля, созданного током в катушке (рисунок 5.3). В результате магнитная стрелка установится вдоль равнодействующей указанных полей.

На рисунке 5.3 представлены:  $NS$  – направление магнитного меридиана Земли;  $A$  и  $B$  – сечения катушки горизонтальной плоскостью;  $N_1S_1$  – магнитная стрелка компаса, помещенная в центре катушки.

На рисунке 5.4 показана схема лабораторной установки. Ключ  $SA_1$  позволяет изменять направление тока через катушку тангенс-гальванометра  $G$ .

Из рисунка 5.3 видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_1}{H_0}$$

и, следовательно,

$$H_0 = \frac{H_1}{\operatorname{tg} \alpha} . \quad (5.1)$$

Напряженность  $H_1$  поля, созданного током с силой  $I$  в центре катушки, вычисляется по закону Био–Савара–Лапласа для случая кругового тока:

$$H_1 = \frac{I \cdot n}{2 \cdot r}, \quad (5.2)$$

где  $I$  – сила тока в витке;  
 $r$  – радиус витка катушки;  
 $n$  – число витков.

Подставляя значение  $H_1$  в формулу (5.1), получим

$$H_0 = \frac{I \cdot n}{2 \cdot r \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (5.3)$$

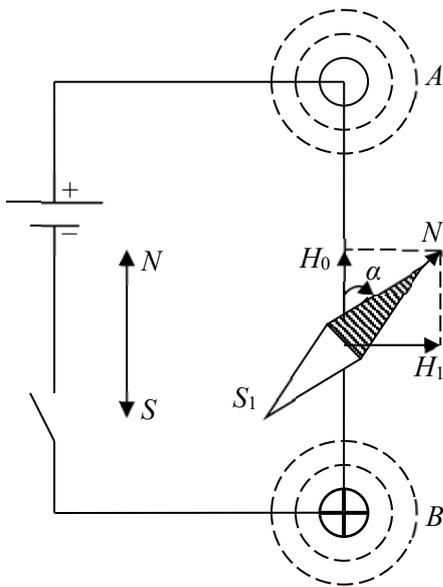


Рисунок 5.3 – Устройство тангенс-гальванометра

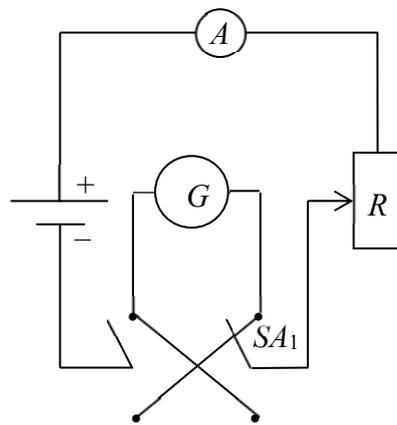


Рисунок 5.4 – Схема лабораторной установки

### Программа работы

- 1 Собрать цепь по схеме (см. рисунок 5.4).
- 2 Собранный схему дать проверить преподавателю или лаборанту.
- 3 Поворачивая тангенс-гальванометр, установить плоскость катушки в плоскости магнитного меридиана.
- 4 Реостатом установить в цепи ток такой величины, чтобы угол  $\alpha$  поворота стрелки компаса был в пределах  $35^\circ \dots 55^\circ$ .
- 5 После успокоения стрелки компаса отсчитать по круговой шкале компаса угол  $\alpha_1$ , на который повернулась магнитная стрелка.
- 6 Не изменяя силу тока  $I$ , изменить его направление, поставив ключ  $SA1$  в другое положение, и измерить угол  $\alpha_2$  отклонения стрелки. Вычислить среднее арифметическое значение угла  $\alpha$ .
- 7 Опыт повторить ещё 3 раза при различных значениях силы тока. Вычислить  $H_0$  по формуле (5.3) и найти среднее значение  $\bar{H}_0$ . Параметры контура указаны на лабораторной установке. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 5.1.

8 Определить абсолютную погрешность измерения  $\Delta H_0$  по формуле

$$\frac{\Delta H}{\bar{H}_0} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{\Delta \alpha}{\sin(2\alpha)}\right)^2}. \quad (5.5)$$

Таблица 5.1 – Результаты измерений и вычислений

Номер измерения	I, А	$\alpha$	$\langle \alpha \rangle$	$H_0$ , А/м	$\bar{H}_0$ , А/м	$\Delta H_0$ , А/м
1						
2						
3						

9 Записать ответ в виде

$$H_0 = (\bar{H}_0 \pm \Delta H_0). \quad (5.6)$$

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Охарактеризуйте магнитное поле Земли. Дайте определения элементов земного магнетизма.
- 2 Как устанавливается магнитная стрелка в магнитном поле?
- 3 Сформулируйте и запишите принцип суперпозиции магнитных полей. Как этот закон применяется в работе?
- 4 Чему равна напряженность магнитного поля в центре кругового контура с током?
- 5 Объясните устройство и принцип действия тангенс-гальванометра.
- 6 Что такое северное и южное наклонения?

## **6 Лабораторная работа № 10. Определение температуры Кюри ферромагнетика**

**Цель работы:** определить точку Кюри образца из ферромагнетика.

### ***Общие сведения***

*Ферромагнетики – это вещества, которые обладают самопроизвольной намагниченностью.*

Собственное магнитное поле ферромагнетика может намного превышать вызвавшее его внешнее магнитное поле. Например, для железа это превышение может составлять  $5 \cdot 10^3$ .

К ферромагнетикам относятся железо, никель, кобальт, гадолиний, ряд их сплавов, а также некоторые металлические стекла.

Ферромагнетики обладают следующими *отличительными свойствами*:

- нелинейная зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля. В переменном поле эта зависимость имеет вид замкнутой кривой (петли гистерезиса);
- большое значение магнитной проницаемости  $\mu$  (для супермаллоя  $\mu = 8 \cdot 10^5$ ) и ее сложная зависимость от напряженности магнитного поля;
- большое положительное значение магнитной восприимчивости  $\chi \sim 10^3 \dots 10^5$  и её сложная зависимость от напряженности  $H$  магнитного поля;
- наличие остаточной намагниченности;
- наличие температуры Кюри (точки Кюри), при которой исчезают ферромагнитные свойства;
- изменение линейных размеров и объема при намагничивании (магнито-стрикция).

Экспериментальное изучение магнитных свойств железа было начато российским ученым А. Г. Столетовым (1872). Он исследовал зависимость намагниченности *предварительно размагниченого образца* от напряженности магнитного поля. Такая зависимость называется *основной кривой намагничивания ферромагнетика* (рисунок 6.1). В результате опытов Столетов установил зависимости намагниченности  $J$  (рисунок 6.1, а), магнитной индукции  $B$  (рисунок 6.1, б) и магнитной проницаемости  $\mu$  (рисунок 6.1, в) от напряженности магнитного поля. Начиная с некоторого значения напряженности  $H_{нас}$  (см. рисунок 6.1, а) намагниченность достигает насыщения  $J_{нас}$  и дальше не изменяется.

Так как  $B = \mu_0 \cdot (H + J)$ , то после достижения насыщения  $H_{нас}$  магнитная индукция  $B$  (см. рисунок 6.1, б) увеличивается прямо пропорционально напряженности.

Нелинейная зависимость  $\mu$  от  $H$  (см. рисунок 6.1, в) объясняется следующим образом. Магнитная проницаемость определяется формулой

$$\mu = 1 + \frac{J}{H}. \quad (6.1)$$

При малых напряженностях намагничивающего поля магнитная проницаемость резко возрастает, т. к.  $J \gg H$ . При насыщении ( $J_{нас} = \text{const}$ ) в ходе дальнейшего

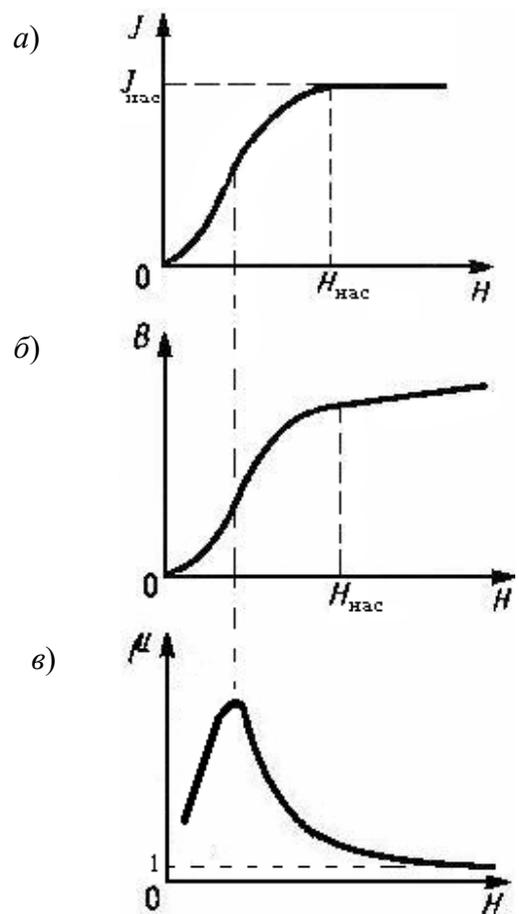


Рисунок 6.1 – Основные кривые намагничивания

увеличения напряженности второе слагаемое в формуле (6.1) становится малым, и магнитная проницаемость стремится к единице.

Рассмотренные особенности намагничивания ферромагнетика показывают, что использование ферромагнетиков для получения сильных магнитных полей эффективно при значениях намагниченности, далеких от насыщения ( $H_{нас} \sim 10^5$  А/м).

По современным представлениям ферромагнитные свойства связаны со спиновым магнитным моментом электрона, т. е. *ферромагнетизм имеет спиновую природу*.

Природа ферромагнетизма объясняется следующим образом.

В атомах ферромагнетиков имеются неустоявшиеся электронные оболочки с некомпенсированными спиновыми магнитными моментами.

За счет обменного взаимодействия указанные моменты электронов соседних атомов в пределах областей  $10^{-6} \dots 10^{-4}$  м выстраиваются параллельно. Поэтому в пределах этих областей вещество оказывается самопроизвольно намагниченным до насыщения (возникновение сил обменного взаимодействия между элементарными частицами обсуждается в квантовой механике).

*Области самопроизвольной намагниченности называются доменами.*

В результате многочисленных исследований была установлена следующая общая картина процесса намагничивания ферромагнетика.

В отсутствие намагничивающего поля (рисунок 6.2, а) ферромагнетик «разбивается» на домены таким образом, что его результирующая намагниченность близка к нулю. С увеличением напряженности  $H_1$  внешнего поля (рисунок 6.2, б) объем доменов типа 1 и 4, векторы  $J$  которых составляет меньший угол с вектором  $H$ , увеличивается за счет доменов типа 2 и 3, для которых указанный угол больше. На этой стадии намагничивание является обратимым.

При дальнейшем увеличении напряженности  $H_2$  поля (рисунок 6.2, в) домены типа 2 и 3 исчезают вовсе. На этой стадии процесс становится необратимым. При последующем росте напряженности  $H_{нас}$  происходит вращение векторов намагниченности доменов, они устанавливаются вдоль вектора  $H$  (рисунок 6.2, г), и наступает магнитное насыщение.

На участке наиболее крутого увеличения намагниченности наблюдается эффект Г. Баркгаузена (1919), проявляющийся в скачкообразном изменении  $J$  при монотонном изменении  $H$ . Эффект Баркгаузена объясняется тем, что дефекты строения кристаллов препятствуют плавному смещению границ доменов при увеличении напряженности поля.

При выключении внешнего поля по достижении насыщения единственным фактором, влияющим на намагниченность  $J$ , остается тепловое движение

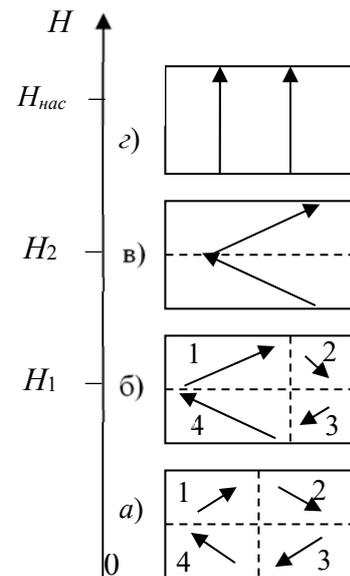


Рисунок 6.2 – Домены

атомов. Однако для «поворота» домена (совокупности атомов) требуется значительная энергия. Поэтому процесс размагничивания при обычных температурах затруднен. Размагничивание наступает при достаточно высокой температуре (точке Кюри).

Если намагниченность довести до насыщения (рисунок 6.3), а затем уменьшать напряженность намагничивающего поля, то намагниченность будет изменяться не по первоначальной кривой 1–0, а по кривой 1–2. То есть при  $H = 0$  в ферромагнетике будет остаточная намагниченность  $J_{ост}$ .

Чтобы снять остаточную намагниченность, необходимо изменить направление напряженности на противоположное. Остаточная намагниченность снимается при некотором значении напряженности  $H_c$ , которое называется *коэрцитивной силой*.

*Коэрцитивная сила характеризует способность ферромагнетика сохранять намагниченное состояние.*

При дальнейшем изменении напряженности намагничивающего поля до  $-H_{нас}$  и далее до  $+H_{нас}$  получится замкнутая кривая, называемая *максимальной петлей гистерезиса*. Аналогичная петля гистерезиса имеет место и для зависимости  $B$  от  $H$ .

Существование остаточной намагниченности делает возможным изготовление постоянных магнитов.

Если ферромагнетик поместить внутрь катушки, питаемой переменным током, и амплитуду силы тока постепенно увеличивать, то будут происходить многократные циклические перемагничивания, соответствующие различным петлям гистерезиса (*частные циклы*). Все частные циклы 1, 2 (рисунок 6.4) лежат внутри *максимальной петли*. При этом значения  $B_{max}$  и  $H_{max}$  частных циклов лежат на основной кривой намагничивания.

Для намагничивания любого магнетика затрачивается определенная энергия. Можно показать, что для увеличения индукции на величину  $dB$  в единице объема магнетика необходима энергия  $dW$ , определяемая формулой

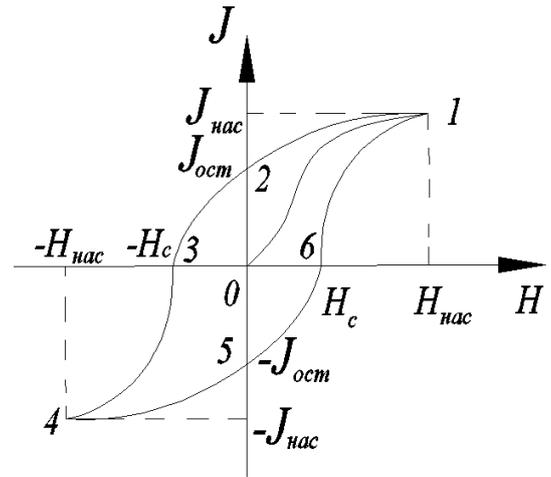


Рисунок 6.3 – Петля гистерезиса

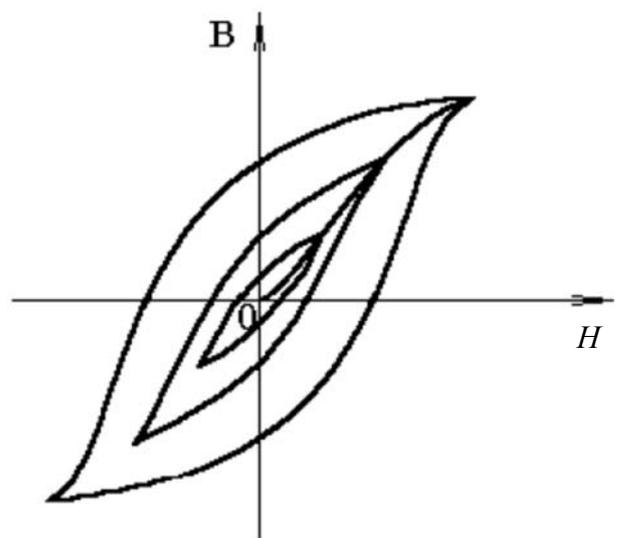


Рисунок 6.4 – Петли гистерезиса

$$dW_n = H \cdot dB. \quad (6.2)$$

Энергия, затрачиваемая на один полный цикл перемагничивания единицы объема ферромагнетика, определится интегрированием выражения (6.2):

$$W_n = \oint H \cdot dB. \quad (6.3)$$

Численно эта энергия равна площади, ограниченной петлей гистерезиса в координатах  $B-H$ . Указанная энергия расходуется на совершение работы против коэрцитивных сил в магнетике и в конечном счете превращается в тепло. Поэтому ферромагнетики при циклическом перемагничивании нагреваются. Причем чем сильнее выражен гистерезис, тем больше происходит нагрев.

В зависимости от значения коэрцитивной силы ферромагнетики делятся на магнитно-мягкие и магнитно-твердые. К магнитно-мягким относятся материалы с малыми значениями коэрцитивной силы ( $H_k \sim 0,8 \dots 80$  А/м). Такие ферромагнетики используются в качестве сердечников трансформаторов и т. д. Магнитно-твердые материалы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы ( $H_k \sim 10^3 \dots 10^5$  А/м) и используются для изготовления постоянных магнитов.

При достаточно высокой температуре ферромагнитные свойства исчезают вовсе, и ферромагнетик превращается в парамагнетик. Значение температуры  $T_k$ , при котором вещество переходит из ферромагнитного в парамагнитное состояние, называется точкой Кюри. При охлаждении ниже точки Кюри ферромагнитное состояние вещества восстанавливается.

Каждый ферромагнетик имеет свою точку Кюри (например, кобальт –  $T_k = 1423$  К, железо –  $T_k = 1043$  К, никель –  $T_k = 633$  К, 30-процентный пермаллой –  $T_k = 343$  К).

Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость ферромагнетиков сложным образом зависят от температуры, достигая максимума вблизи точки Кюри. Первоначальное увеличение магнитной восприимчивости обусловлено тем, что с ростом температуры облегчаются смещение границ между доменами и рост объема доменов с магнитными моментами, ориентированными параллельно внешнему полю. Увеличение магнитной восприимчивости происходит до температуры Кюри, а затем ее значение падает. Отсюда следует, что, сняв зависимость магнитной восприимчивости (или магнитной проницаемости) от температуры, можно определить температуру Кюри по резкому спаду кривой.

### **Описание лабораторной установки**

Для определения точки Кюри в данной работе применяется установка, изображенная на рисунке 6.4. В этой установке образец играет роль сердечника трансформатора. При протекании переменного тока по первичной обмотке трансформатора в его вторичной обмотке возбуждается ЭДС взаимной индукции  $E_2$ . В результате этого во вторичной обмотке возникнет ток, сила которого  $I_2$  будет пропорциональна  $E_2$ .

Значение  $E_2$  определяется законом электромагнитной индукции

$$E_2 = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (6.4)$$

Магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий все витки катушки 4, прямо пропорционален магнитной проницаемости  $\mu$  сердечника (образца) и силе тока  $I_1$  в первичной обмотке:

$$\Phi = c \cdot \mu \cdot I_1, \quad (6.5)$$

где  $c$  – величина, постоянная для данной установки.

Подставив (6.5) в (6.4), получим, что  $E_2$  пропорциональна производной по времени от силы тока в первичной обмотке:

$$E_2 = -c \cdot \mu \cdot \frac{dI_1}{dt}. \quad (6.6)$$



1 – трансформатор; 2 – индикатор температуры сердечника трансформатора; 3 – индикатор напряжения во вторичной обмотке трансформатора; 4 – переключатель режима измерения

Рисунок 6.4 – Лабораторная установка

Из формулы (6.6) следует, что значение  $E_2 = U_2$  определяется магнитной проницаемостью  $\mu$  материала сердечника (исследуемого образца), которая зависит от температуры. Следовательно, если изменять температуру  $T$  сердечника и при этом регистрировать напряжение  $U_2$  на вторичной обмотке, то можно получить зависимость  $U_2 = f(T)$ , которая качественно будет повторять график  $\mu = f(T)$ .

Нагревателем исследуемого образца является первичная обмотка.

### ***Программа работы***

Подключить установку к сети переменного напряжения 220 В. Переключателем на задней стенке включить установку.

1 Включить тумблер «Нагрев» и, нагревая образец до 105 °С, через каж-

дые 10 °С (по индикатору 2) записывать соответствующее значение напряжения  $U_2$  по показаниям индикатора 3. Начиная с 90 °С измерения произвести через 5 °С. При достижении температуры 105 °С ...110 °С выключить «Нагрев» и отключить установку. Данные опыта занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты измерения температуры и напряжения  $U_2$

$T, ^\circ\text{C}$									
$U_2, \text{мВ}$									

2 По экспериментальным данным таблицы 6.1 построить график зависимости напряжения  $U_2$  от температуры  $U_2 = f(T)$ .

3 Провести касательные к двум участкам графика: горизонтальному и участку наиболее крутого падения кривой. Затем из точки пересечения касательных опустить перпендикуляр на ось  $X$ . Точка пересечения перпендикуляра с осью температур будет близка к точке Кюри.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Какие типы магнетиков Вы знаете?
- 2 Что такое домены?
- 3 Перечислите основные свойства ферромагнетиков и объясните их.
- 4 Почему значение  $\mu$  для ферромагнетиков велико?
- 5 Почему при определенной температуре ферромагнетики теряют свои магнитные свойства?
- 6 Что такое точка Кюри?
- 7 Объясните принцип работы установки.
- 8 Почему ЭДС индукции во вторичной обмотке резко уменьшается при достижении образцом точки Кюри?

## **7 Лабораторная работа № 11. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона**

**Цель работы:** экспериментально определить удельный заряд электрона и его массу.

### **Общие сведения**

При движении электрона в электрических и магнитных полях траектория электрона определяется конфигурацией этих полей и отношением заряда электрона к его массе ( $e/m$  – удельный заряд электрона).

Одним из простых методов определения величины  $e/m$  является метод магнетрона. В магнетроне электрон движется в скрещенных магнитном и электрическом полях. В качестве магнетрона можно использовать двухэлектродную

лампу с цилиндрическим анодом, помещенную в аксиальное магнитное поле (внутри соленоида).

Без учета начальной скорости электрона, испускаемого нагретым катодом, для его движения в рассматриваемой комбинации электрического и магнитного полей можно записать следующее:

$$e \cdot U_a = \frac{m}{2} \cdot \left[ \dot{r}^2 + \left( \frac{r \cdot e \cdot B}{2 \cdot m} \right)^2 \right], \quad (7.1)$$

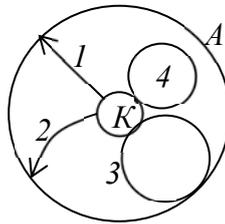
где  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона соответственно;

$r$  – расстояние от оси катода до исследуемой точки с потенциалом  $U_a$ ;

$\dot{r}$  – радиальная скорость электрона;

$B$  – индукция магнитного поля.

Рассмотрим траекторию электронов, вылетевших из катода при наличии на аноде потенциала  $U_a$ . В отсутствие магнитного поля траектория электрона прямолинейна и направлена вдоль радиуса (рисунок 7.1, кривая 1). При слабом поле траектория несколько искривляется, но электрон все же попадает на анод (см. рисунок 7.1, кривая 2). При критическом значении индукции магнитного поля  $B_{кр}$  траектория искривляется настолько, что начинает касаться анода (см. рисунок 7.1, кривая 3). Наконец, при  $B > B_{кр}$  электрон вовсе не попадает на анод и возвращается к катоду (см. рисунок 7.1, кривая 4).



1 –  $B = 0$ ; 2 –  $B < B_{кр}$ ; 3 –  $B = B_{кр}$ ; 4 –  $B > B_{кр}$

Рисунок 7.1 – Траектория электронов, вылетающих из катода  $K$  при разных значениях индукции магнитного поля

При  $B = B_{кр}$  и  $r = r_a$  радиальная скорость электрона обращается в нуль, и из выражения (7.1) получим

$$U_a = \frac{e \cdot B_{кр}^2 \cdot (r_a)^2}{8m}, \quad (7.2)$$

где  $U_a$  – разность потенциалов между анодом и катодом;

$r_a$  – радиус анода.

Преобразуя (7.2), для удельного заряда получим

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 \cdot (r_a)^2}. \quad (7.3)$$

С учетом радиуса катода  $r_k$  формула (7.3) принимает следующий вид:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 \cdot (r_a)^2 \cdot (1 - r_k^2 / r_a^2)^2}. \quad (7.4)$$

До сих пор предполагалось, что все электроны покидают катод с нулевой скоростью. В этом случае при  $B < B_{кр}$  все электроны без исключения попали бы на анод, а при  $B > B_{кр}$  все они возвращались бы на катод, не достигнув анода. Тогда сила анодного тока  $I_a$  с увеличением индукции магнитного поля изменялась бы так, как это изображено на рисунке 7.2 пунктирной линией.

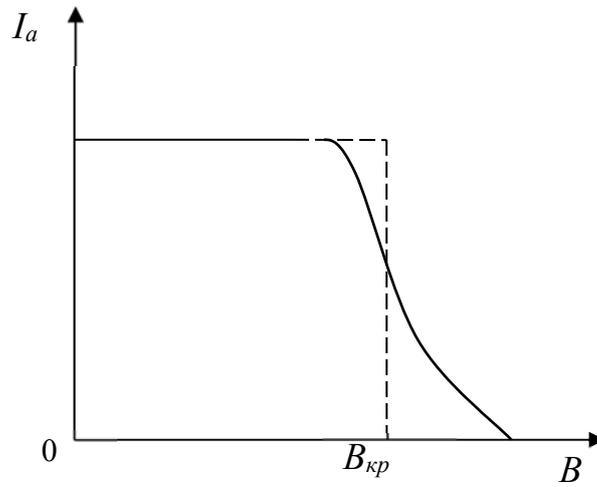


Рисунок 7.2 – Зависимость силы анодного тока от индукции магнитного поля соленоида

На самом деле электроны покидают катод с различными начальными скоростями. Поэтому критические условия для разных электронов достигаются при разных значениях  $B$ , и кривая  $I = f(B)$  приобретает вид сплошной линии на рисунке 7.2. Критическому значению индукции соответствует участок наиболее крутого падения кривой.

В рассматриваемой работе лампа расположена в центральной части катушки, где индукцию магнитного поля можно определить по формуле

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot I_k \cdot N}{\sqrt{L^2 + 4 \cdot R^2}}, \quad (7.5)$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость среды (в условиях данной задачи  $\mu = 1$ );

$\mu_0$  — магнитная постоянная;

$I_k$  — сила тока в цепи катушки;

$N$ ,  $L$  и  $R$  — число витков, длина и радиус катушки соответственно.

## Описание лабораторной установки

На рисунке 7.3 изображена лабораторная установка. Основным элементом установки является двухэлектродная электронная лампа с цилиндрическим анодом. Лампа помещена внутрь соленоида 3, в котором создается магнитное поле. Электронная лампа с цилиндрическим анодом, помещенная в магнитное поле соленоида, образует магнетрон. Катод лампы накаливается переменным током от стабилизированного источника 1. На анод лампы подается постоянное напряжение. Сила анодного тока  $I_a$  измеряется миллиамперметром на лицевой панели измерительного модуля 2. Регулирование магнитной индукции в катушке осуществляется изменением силы тока  $I_k$  через катушку.

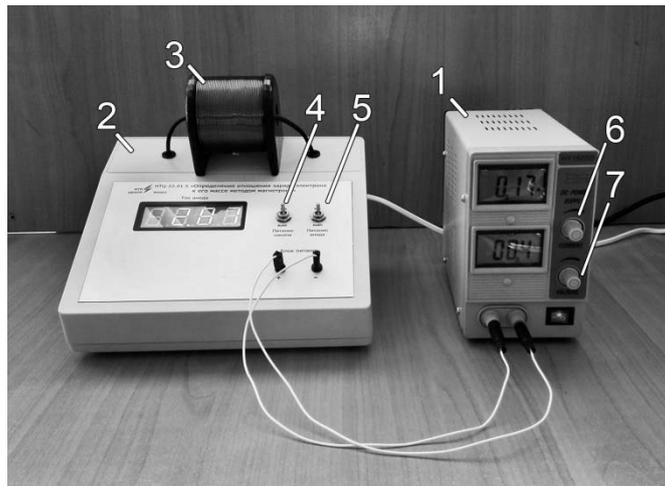


Рисунок 7.3 – Лабораторная установка

## Программа работы

**Внимание! Включать установку только на время снятия показаний! Долго включенной не держать.** Схема дается в собранном виде.

1 Перед включением приборов в сеть тумблеры 4 и 5 «Питание накала» и «Питание анода» перевести в положение «Выключено».

2 Подключить блок питания 1 и измерительный модуль 2 к сети, включить переключатели «Сеть» (на блоке 2 переключатель находится сзади). Включить тумблер «Питание накала» и дать прогреться лампе около 5 мин.

3 Установить ручку 7 регулировки напряжения анода на блоке питания в крайнее правое положение, а ручку 6 регулировки тока катушки  $I_k$  – в крайнее левое положение. Включить тумблер «Питание анода».

4 Постепенно увеличивать силу тока  $I_k$  от 0 до 3 А с шагом 0,2 А. Одновременно снимать значения силы анодного тока  $I_a$  по миллиамперметру в цепи анода. Значения силы тока  $I_k$  и соответствующие значения силы тока  $I_a$  занести в таблицу 7.1.

5 По данным таблицы 7.1 построить график зависимости силы анодного тока от силы тока через катушку. Из полученного графика определить критическое значение силы тока в цепи катушки  $I_{кр}$ . Значение  $I_{кр}$  определить по точке графика,

после которой начинается заметное уменьшение силы анодного тока  $I_a$ .

6 По формуле (7.5) вычислить значение  $B_{кр}$ , подставив вместо  $I_k$  найденное значение  $I_{кр}$  ( $N = 920$ ;  $L = 0,057$  м;  $R = 0,028$  м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м).

Таблица 7.1 – Зависимость силы анодного тока от силы тока через катушку

$I_k, A$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	...	3,0
$I_a, mA$													

7 Подставив в формулу (7.4) полученное значение  $B_{кр}$  и численные значения  $U_a$ ,  $r_a$  и  $r_k$  ( $U_a = 50$  В;  $r_a = 5 \cdot 10^{-3}$  м;  $r_k = 0,4 \cdot 10^{-3}$  м), определить удельный заряд электрона  $e/m$ .

8 Зная заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, вычислить его массу. Все рассчитанные значения занести в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Результаты измерений и вычислений

$I_{кр}, A$	$B_{кр}, Tл$	$e/m, Кл/кг$	$m, кг$

### **Контрольные вопросы**

- 1 В чем состоит физический смысл удельного заряда?
- 2 Что такое магнетрон? В чем заключается метод магнетрона?
- 3 Какие силы действуют на электрон в магнетроне? Как определяются направления этих сил?
- 4 Опишите действие электрического и магнитного полей на электрон в магнетроне.
- 5 Выведите формулу для  $e/m$ .

## **8 Лабораторная работа № 12. Изучение магнитного поля соленоида с помощью датчика Холла**

**Цель работы:** экспериментально определить значения магнитной индукции на оси соленоида с помощью датчика Холла.

### **Общие сведения**

Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , который можно определить с помощью закона Био–Савара–Лапласа. Численное значение (модуль) вектора магнитной индукции  $\vec{dB}$  определяется следующей формулой:

$$dB = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{r^2}, \quad (8.1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;

$\mu$  – магнитная проницаемость среды;

$I$  – сила тока в проводнике;

$\alpha$  – угол между элементом проводника  $\vec{dl}$  и радиус-вектором  $\vec{r}$ .

Получим формулу для магнитной индукции  $\vec{B}$  в некоторой точке  $A$ , лежащей на оси кругового контура (витка) радиусом  $R$  с током  $I$  (рисунок 8.1). Для этого выделим на проводнике элемент  $\vec{dl}$  и проведем радиус-вектор  $\vec{r}$  от этого элемента в точку  $A$ . Согласно принципу суперпозиции магнитных полей результирующая индукция магнитного поля в точке  $A$  находится как векторная сумма магнитных индукций полей всех элементов, составляющих виток. Результирующая индукция  $\vec{B}$  поля будет направлена вдоль оси и ее значение определяется интегрированием выражения (8.1):

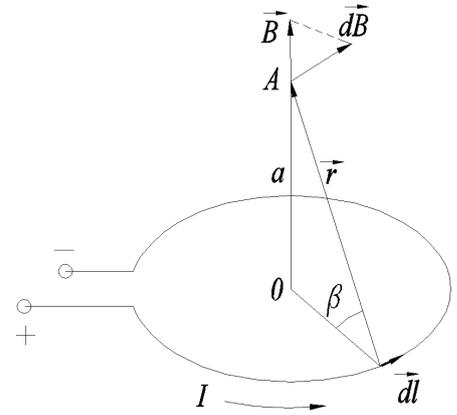


Рисунок 8.1 – Магнитное поле витка с током

$$B = \int dB \cdot \cos \beta = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot \sin \alpha}{r^2} \cdot \cos \beta \cdot \int_0^{2\pi R} dl, \quad (8.2)$$

где  $\beta$  – угол между вектором  $\vec{r}$  и радиусом кругового проводника  $R$ , проведенным к элементу  $\vec{dl}$ ;

$2\pi R$  – длина кругового проводника (витка).

Так как  $\alpha = 90^\circ$ , то после интегрирования выражения (8.2) и несложных преобразований получим формулу для магнитной индукции на оси кругового контура (витка) с током

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{2} \cdot \frac{I \cdot R^2}{(R^2 + a^2)^{3/2}}, \quad (8.3)$$

где  $a$  – расстояние от центра витка до точки  $A$ .

*Соленоидом* называется цилиндрическая катушка, состоящая из большого числа витков изолированной проволоки, по которой течет ток. Если шаг винтовой линии достаточно мал, то каждый виток соленоида можно рассматривать как замкнутый виток. Силовые линии магнитного поля внутри соленоида направлены вдоль его оси, причем вектор магнитной индукции составляет с направлением тока в соленоиде правовинтовую систему.

Магнитное поле на оси соленоида можно рассчитать следующим образом. Выделим малый участок  $dl$  длины соленоида (рисунок 8.2). На этот участок

придется  $n \cdot dl$  витков ( $n = N/L$  – число витков соленооида на единицу длины;  $N$  – общее число витков;  $L$  – длина соленооида).

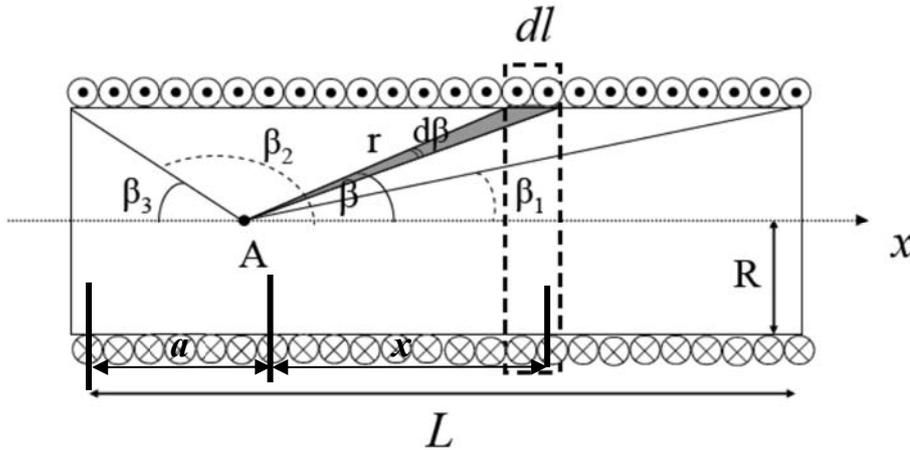


Рисунок 8.2 – Пояснение к выводу расчетной формулы

Обозначим силу тока в каждом витке через  $I$ . Тогда участок  $dl$  соленооида можно рассматривать как круговой ток силы  $I \cdot n \cdot dl$ .

Значение индукции магнитного поля, создаваемой этим участком на оси соленооида, согласно (8.3),

$$dB_x = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot R^2 \cdot n}{2} \cdot \frac{dl}{(R^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (8.4)$$

где  $x$  – расстояние по горизонтальной оси от участка  $dl$  до точки  $A$ ;

$R$  – радиус витка соленооида.

Введем угол  $\beta$  между положительным направлением оси соленооида, совпадающим с направлением вектора  $\vec{B}$ , и радиус-вектором, проведенным из рассматриваемой точки  $A$  к участку  $dl$ . Из рисунка 8.2 следует, что справедливы такие соотношения:

$$r^2 = R^2 + x^2 = R^2 / \sin^2 \beta \quad \text{и} \quad dl = r \cdot d\beta.$$

Сделав соответствующие подстановки в (8.4), получим

$$dB_x = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot n}{2} \cdot \sin \beta \cdot d\beta. \quad (8.5)$$

Значение результирующей индукции магнитного поля в точке  $A$  определится интегрированием выражения (8.5) по углу  $\beta$ :

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot n}{2} \cdot \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta \cdot d\beta = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot n}{2} \cdot (\cos \beta_1 - \cos \beta_2)$$

ИЛИ

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot n}{2} \cdot (\cos \beta_1 + \cos \beta_3), \quad (8.6)$$

где

$$\cos \beta_1 = \frac{L - a}{\sqrt{R^2 + (L - a)^2}} \text{ и } \cos \beta_3 = \frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}}. \quad (8.7)$$

### Описание лабораторной установки

Экспериментальные значения магнитной индукции поля на оси соленоида определяются с помощью датчика, в котором используется эффект Холла.

Если через однородный образец полупроводника, имеющий форму параллелепипеда, со сторонами  $a$ ,  $b$ ,  $d$  (рисунок 8.3) пропустить постоянный электрический ток и поместить его в однородное магнитное поле так, чтобы вектор магнитной индукции был перпендикулярен грани  $ABB_1A_1$ , то в нем возникает поперечная разность потенциалов. Это явление получило название эффекта Холла.

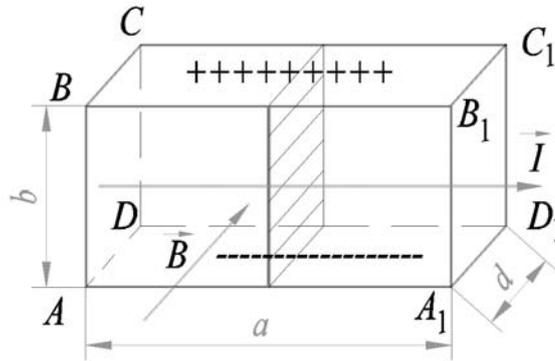


Рисунок 8.3 – Эффект Холла

Возникновение поперечной разности потенциалов обусловлено тем, что на движущиеся в полупроводнике заряды со стороны магнитного поля действует сила Лоренца, направление которой определяется правилом левой руки. Исследуемый полупроводник имеет электронную проводимость, а следовательно, основными носителями тока в нем являются электроны. При указанных на рисунке 8.3 направлениях тока и вектора магнитной индукции электроны будут отклоняться к грани  $ADD_1A_1$ .

Датчик Холла представляет собой тонкую прямоугольную пластинку площадью в несколько квадратных миллиметров и имеет четыре электрода для подвода тока и измерения холловской разности потенциалов  $U$ .

Холловская разность потенциалов  $U$  определяется формулой

$$U = \frac{1}{e \cdot n_0} \cdot \frac{B \cdot I}{d} = R_x \cdot \frac{B \cdot I}{d}, \quad (8.8)$$

где  $R_x$  – постоянная Холла,  $R_x = \frac{1}{en_0}$ ;

$B$  – магнитная индукция;

$I$  – сила тока через соленоид;

$d$  – толщина датчика Холла.

Из формулы (8.8) следует, что по результатам измерения  $U$ ,  $I$  и известным значениям  $R_x$  и  $d$  можно определить магнитную индукцию по формуле

$$B = \frac{d}{R_x} \cdot \frac{U}{I}. \quad (8.9)$$

Исследуемый соленоид представляет собой совокупность большого количества близко расположенных витков медного провода на непроводящем каркасе. Длина соленоида  $L = 0,205$  м, количество витков  $N = 3300$ , средний радиус катушки витков  $R = 0,025$  м, средняя сила тока в катушке  $I = 0,8$  А.

Вдоль оси катушки, перпендикулярно ее плоскости, расположена измерительная линейка, на которой укреплен чувствительный датчик Холла. Показания датчика отградуированы непосредственно в значениях магнитной индукции поля соленоида. Датчик закреплен на линейке так, что когда он находится у левого края соленоида, нулевой отсчет линейки совпадает с его правым краем. Поэтому значения величины  $a$  совпадают с показаниями линейки относительно правого края соленоида.

Тумблером на передней панели выбирается требуемый режим измерения: измерение силы тока через соленоид либо измерение магнитной индукции, которые отображаются на цифровом индикаторе.

### ***Программа работы***

1 Установить измерительную линейку так, чтобы датчик Холла находился у левого края соленоида ( $a = 0$  см).

2 Включить установку в сеть с напряжением  $\sim 220$  В. Тумблером на передней панели включить режим измерения силы тока и установить заданное преподавателем значение. Измеренное значение записать в таблицу 8.1.

3 Включить режим измерения магнитной индукции  $B$  и измерить ее значение.

4 Переместить измерительную линейку вправо на 1 см ( $a = 1$  см) и измерить значение магнитной индукции  $B_{\text{экс}}$ .

5 Провести измерения по п. 4, перемещая датчик до правого края катушки ( $a = 22$  см). Значения величины  $a$  соответствуют показаниям линейки относительно правого края соленоида. Все измеренные значения занести в таблицу 8.1.

По окончании измерений вернуть измерительную линейку в исходное положение. Перевести переключатель «СЕТЬ» в положение «ВЫКЛ» и отключить установку от сети.

6 Для каждого положения  $a$  датчика рассчитать значения углов  $\beta_1$  и  $\beta_3$  по формулам (8.7) и магнитной индукции  $B_{\text{теор}}$  по формуле (8.6) и полученные

значения занести в таблицу 8.1.

7 Построить график зависимости  $B_{теор} = f(a)$  и нанести на него экспериментальные точки. По оси абсцисс откладывать  $a$ , по оси ординат соответствующие им значения  $B_{эксп}$ .

8 Сделать вывод относительно точности определения магнитного поля соленоида с помощью датчика Холла.

Таблица 7.1 – Результаты измерений и вычислений магнитной индукции

$a$ , м	0	0,01	0,02	...	0,22
$B_{эксп}$ , мТл					
$\cos\beta_1$					
$\cos\beta_3$					
$B_{теор}$ , мТл					

### Контрольные вопросы

- 1 Что такое магнитное поле и как его можно получить?
- 2 Изобразите силовые линии магнитного поля для прямого бесконечного проводника с током, для кругового витка и для соленоида.
- 3 Запишите и сформулируйте закон Био–Савара–Лапласа.
- 4 Как определяется магнитная индукция в произвольной точке, лежащей на оси кругового витка с током?
- 5 Какой вид должна иметь зависимость магнитной индукции от расстояния вдоль оси от центра катушки? Получите данную зависимость.
- 6 Как изменяется магнитное поле вдоль оси катушки?

## 9 Лабораторная работа № 14. Изучение закона Ампера

**Цель работы:** исследовать зависимость силы взаимодействия между проводниками от силы тока, его направления и расстояния между проводниками; проверить закона Ампера.

### Общие сведения

На проводник с током, помещенный в магнитное поле, согласно закону Ампера действует сила Ампера: *сила, действующая на элемент проводника с током в магнитном поле, равна произведению силы тока на векторное произведение элемента длины проводника на магнитную индукцию:*

$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \cdot \vec{B}]. \quad (9.1)$$

В случае, когда прямолинейный проводник находится в однородном

магнитном поле, модуль силы Ампера

$$dF = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (9.2)$$

где  $I$  – сила тока в проводнике;

$l$  – длина проводника;

$B$  – магнитная индукция;

$\alpha$  – угол между направлением тока в проводнике и направлением вектора магнитной индукции.

При прохождении по параллельным прямолинейным проводникам электрического тока вокруг каждого из них возникает магнитное поле. Два проводника с током взаимодействуют друг с другом, т. к. каждый из них находится в магнитном поле другого, и на каждый действует сила Ампера со стороны другого проводника. Возникающие силы будут равны по модулю, а их направления зависят от направлений токов в проводниках (рисунок 9.1).

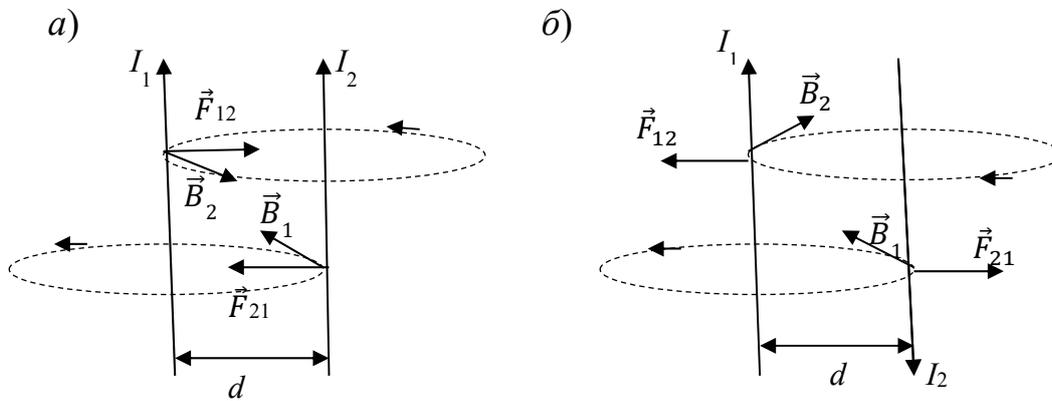


Рисунок 9.1 – Силовое взаимодействие прямолинейных токов

Проводник с током  $I_1$  в точке пространства, где находится проводник с током  $I_2$ , создает магнитное поле с магнитной индукцией  $B_1$ :

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}.$$

Это поле действует на проводник с током  $I_2$  с силой  $F_{21}$ , значение которой можно определить по формуле (9.2):

$$F_{21} = B_1 I_2 l = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}. \quad (9.3)$$

Аналогично рассчитывается сила  $F_{12}$ , действующая на проводник с током  $I_1$ :

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d};$$

$$F_{12} = \frac{\mu_0 I_2 I_1 l}{2\pi d}. \quad (9.4)$$

Как видно из формул (9.3) и (9.4)?  $|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}|$ . Направления этих сил определяются по правилу левой руки. Если токи текут в одном направлении, то силы направлены навстречу друг другу и проводники притягиваются (рисунок 9.1, а). Если в противоположных направлениях, то отталкиваются (рисунок 9.1, б).

### ***Описание лабораторной установки***

Лабораторный стенд «Закон Ампера» предназначен для изучения закона Ампера методом измерения силы взаимодействия постоянных электромагнитных полей двух параллельных проводников с током.

Лабораторный стенд представляет собой раздвижной столик (рисунок 9.2) с шаговым электроприводом, на котором закреплены измерительные стойки с параллельными медными проводниками длиной 0,5 м. Изменение направления тока осуществляется переключателем на передней панели столика.

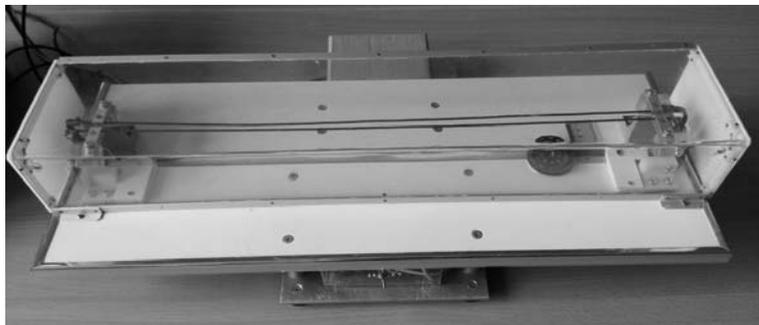


Рисунок 9.2 – Раздвижной столик

Управление перемещением столика осуществляется тумблером на блоке управления (рисунок 9.3). Задание тока происходит дискретно с помощью суммирующих переключателей 1, 2, 3, 4 на передней панели блока питания. Максимальный ток при включении всех переключателей равен 10 А. Измерение тока производится датчиком Холла в течение 5 с после нажатия кнопки «Измерения», после чего на дисплее блока управления отображаются значения силы тока и силы взаимодействия.



Рисунок 9.3 – Блок питания и блок управления стенда

## Программа работы

*Измерение зависимости силы взаимодействия от расстояния между проводниками.*

1 Установить проводники на расстоянии  $d = 5$  мм. Отсчет расстояния проводить по линейке.

2 Включить установку в сеть. Включить блок управления и блок питания.

3 Установить силу тока 10 А.

4 Произвести измерения, нажав на кнопку «Измерение». Записать значение силы в таблицу 9.1.

5 Изменяя расстояние  $d$  между проводниками с шагом 5 мм до 4 см, измерить значение силы для каждого положения. Данные занести в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 – Зависимость силы взаимодействия от расстояния

$d, 10^{-3}\text{м}$						
$F, \text{мкН}$ параллельное направление токов						
$F, \text{мкН}$ противоположное направление токов						

6 Изменить направление протекания силы тока и повторить пп. 4 и 5.

7 Построить график зависимости  $F(d)$ .

*Измерение зависимости силы взаимодействия от силы тока при постоянном расстоянии.*

1 Установить проводники на расстоянии  $d = 5$  мм. Включить переключатель 1 на блоке питания. Записать значение силы тока.

2 Произвести измерения, нажав на кнопку «Измерение». Записать значение силы взаимодействия в таблицу 9.2.

3 Изменяя ток с помощью различных комбинаций переключателей на блоке питания, измерить силу взаимодействия для двух направлений протекания тока. Данные занести в таблицу 9.2.

Таблица 9.2 – Зависимость силы взаимодействия от силы тока

$I, \text{А}$						
$F, \text{мкН}$ параллельное направ- ление токов						
$F, \text{мкН}$ противоположное направление токов						

4 Рассчитать силу взаимодействия по формуле (9.4) для указанных преподавателем значений силы тока  $I$  и расстояния  $d$ . Убедиться в справедливости закона Ампера.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Сформулируйте и запишите закон Ампера.
- 2 По какому правилу определяется направление силы Ампера?
- 3 Докажите, что при протекании токов по параллельным проводам в одном (в противоположном) направлении они притягиваются (отталкиваются).
- 4 Как определяется магнитная индукция, создаваемая прямолинейным длинным проводником с током?
- 5 Выведите формулу (9.4).

### **Список литературы**

- 1 **Трофимова, Т. И.** Курс физики: учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – Москва: Высшая школа, 2017. – 560 с.
- 2 **Савельев, И. В.** Курс общей физики: учебное пособие: в 3 т. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – 15-е изд., стер. – Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2019. – Т. 2. – 500 с.
- 3 **Детлаф, А. А.** Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва: Высшая школа, 2001. – 718 с.