



ГОУ ВПО «КНАГУ»

**М.С. Гринкруг  
Е.И. Титоренко  
Ю.И. Ткачева**

## **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ**

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО. МАГНЕТИЗМ.  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ



**2018**

Министерство образования Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

М.С. Гринкруг, Е.И. Титоренко, Ю.И. Ткачева

## **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ**

*ЭЛЕКТРИЧЕСТВО. МАГНЕТИЗМ.  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ*

Утверждено в качестве учебного пособия  
Ученым советом государственного образовательного  
учреждения высшего профессионального образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Присвоен гриф РАЕ

Комсомольск-на-Амуре 2018

## 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

(Лабораторная работа 46)

**Цель работы:** исследовать электростатическое поле.

**Принадлежности:** набор электродов, установка для изучения электростатического поля.

Всякий неподвижный заряд создаёт в окружающем пространстве электрическое поле, которое обнаруживается при внесении пробных электрических зарядов в любую точку поля. Силовой характеристикой поля является его напряженность, которая равна:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q},$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряженности электростатического поля в данной точке, В/м;  $\vec{F}$  – вектор силы, Н;  $Q$  – пробный заряд, Кл.

Напряженность поля численно равна силе, действующей на единицу положительного заряда, помещённого в данную точку поля.

По закону Кулона взаимодействие между точечными зарядами описывается формулой:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{Q_0 Q}{r^2},$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума;  $Q_0$  и  $Q$  – взаимодействующие заряды, Кл;  $r$  – расстояние между зарядами  $Q_0$  и  $Q$ , м.

Напряженность поля, созданного точечным зарядом  $Q_0$  определяется по формуле:

$$E = \frac{Q_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}.$$

Линия, касательная к которой в каждой точке совпадает по направлению с напряженностью электростатического поля, называется **силовой линией**, причем густота силовых линий характеризует численное значение напряженности.

Графическое изображение полей с помощью силовых линий представлено на рис. 9.1: а) - поле положительного точечного заряда; б) - поле отрицательного точечного заряда ; в) - поле двух разноименных точечных зарядов).

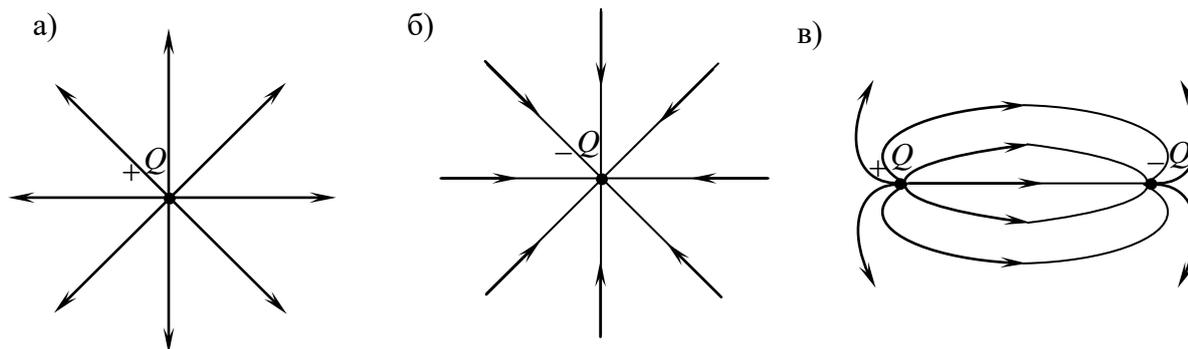


Рис. 9.1

Энергетической характеристикой поля является потенциал:

$$\varphi = \frac{A_{\infty}}{Q},$$

где  $\varphi$  – потенциал данной точки поля, В;  $A$  – работа, Дж.

Потенциал поля численно равен работе, совершаемой силами поля при перемещении единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность.

Работа по перемещению единичного положительного заряда из одной точки поля в другую равна разности потенциалов этих точек:  $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{Q}$ .

Работа по перемещению заряда  $Q$  между точками, потенциалы которых  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , вычисляется по формуле:

$$A_{12} = Q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Потенциал поля точечного заряда  $Q_0$  на расстоянии  $r$  выражается формулой:

$$\varphi = \frac{Q_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}.$$

Электростатическое поле является консервативным. Работа по перемещению заряда в электрическом поле не зависит от траектории, а определяется лишь положением начальной и конечной точек перемещения.

Каждой точке поля соответствует свой потенциал, который является функцией расстояния. Однако можно выделить такую совокупность точек, для которых потенциал одинаков.

Геометрическое место точек равного потенциала называется **эквипотенциальной поверхностью**.

Силовые линии везде перпендикулярны к поверхности равного потенциала (рис. 9.2).

Между напряженностью поля и потенциалом существует зависимость, которая описывается соотношением:

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}.$$

Напряженность поля численно равна изменению потенциала на единицу длины, отсчитанной в перпендикулярном к поверхности потенциала направлении. Знак «минус» говорит о том, что напряженность направлена в сторону убывания потенциала.

Графическое изображение полей с помощью сечений эквипотенциальных поверхностей и силовых линий показано на рис. 9.2., поле положительного точечного заряда (рис. 9.2, а); поле отрицательного точечного заряда (рис. 9.2. б); поле двух разноименных зарядов (рис. 9.2, в);  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – потенциалы поверхностей.

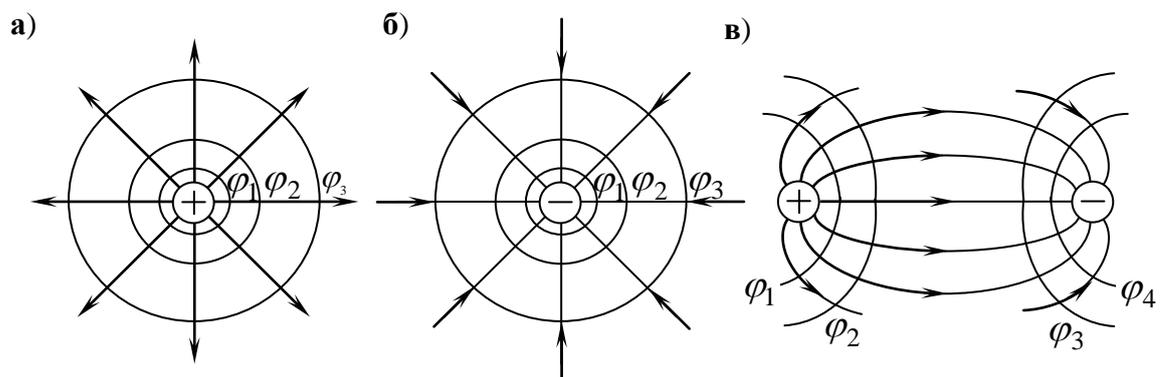


Рис. 9.2

Величина  $\frac{d\varphi}{dr}$  показывает быстроту изменения потенциала в направлении, перпендикулярном к эквипотенциальной поверхности, и называется градиентом потенциа-

ла;  $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$ , где  $\text{grad } \varphi$  – градиент потенциала, В/м. Градиент потенциала направлен противоположно вектору напряженности поля.

Ортогональность силовых линий и поверхностей равного потенциала существенно облегчает как экспериментальное, так и теоретическое исследование электростатического поля. По найденным значениям вектора напряженности можно построить поверхности равного потенциала и, наоборот, найденное положение поверхностей равного потенциала позволяет построить силовые линии поля.

Экспериментально измерить потенциалы оказывается проще, чем измерить напряженность поля, так как большинство приборов, пригодных для изучения полей, измеряют разность потенциалов. Поэтому в данной работе экспериментально изучается распределение потенциалов в поле.

Силовые линии строятся как ортогональные кривые к экспериментально найденным поверхностям равного потенциала.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В нашем эксперименте постоянные электростатические поля моделируются с помощью постоянного тока, который пропускают через слабо проводящую среду.

Оказывается, что при некоторых условиях распределение потенциалов в среде, по которой течет ток между установленными в ней электродами, можно сделать тождественным распределению потенциалов между теми же электродами, когда между ними имеется электростатическое поле в вакууме или в однородном диэлектрике.

Изучение поля производится с помощью зондов: в исследуемую точку поля вводится дополнительный электрод – зонд, соединённый проводником с прибором, измеряющим приобретённый зондом потенциал относительно какой-либо избранной за начало отсчёта точки поля.

Чтобы включение зонда не искажало распределение потенциалов в исследуемом поле, электрическая цепь зонда должна иметь большее сопротивление, по сравнению с сопротивлением проводящих слоёв вещества между точкой, в которую помещён зонд, и ближайшим электродом.

В ванну, сделанную из диэлектрического материала и залитую жидким электролитом (рис. 9.3), помещают электроды **A** и **B** (см. рис. 9.3). На электроды подаётся напряжение от источника питания (220 В) через выпрямитель **ИП**. В измерительную часть схемы, кроме зонда **Z**, входит также нулевой гальванометр **G**. Вольтметр **V** и ручка регулятора напряжения находятся на панели выпрямителя.

Установка оснащена копировальным устройством, которое позволяет переносить получаемые точки на бумагу. Вращая ручку регулятора напряжения, можно создавать различные значения потенциала зонда относительно электродов, погружаемых в ванну. Если зонд находится в такой точке поля, потенциал которой равен потенциалу, установленному на движке делителя, то тока в цепи зонда и гальванометра не будет.

Геометрическое место всех точек поля, для которых ток в цепи зонда будет равен нулю (при данном положении движка на делителе), образует эквипотенциальную поверхность в исследуемом поле. Для измерения потенциала этой поверхности служит вольтметр, включённый между движком и одним из электродов.

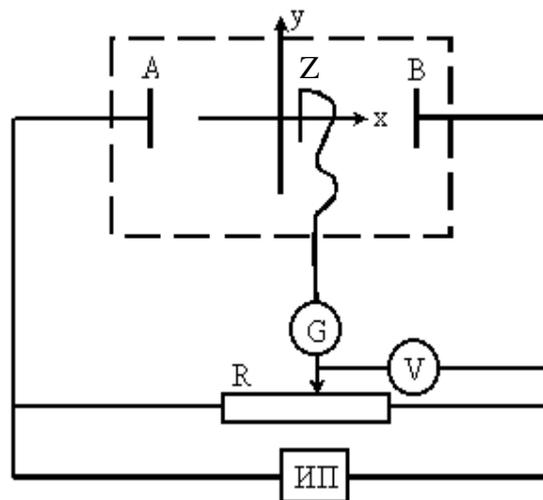


Рис. 9.3

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

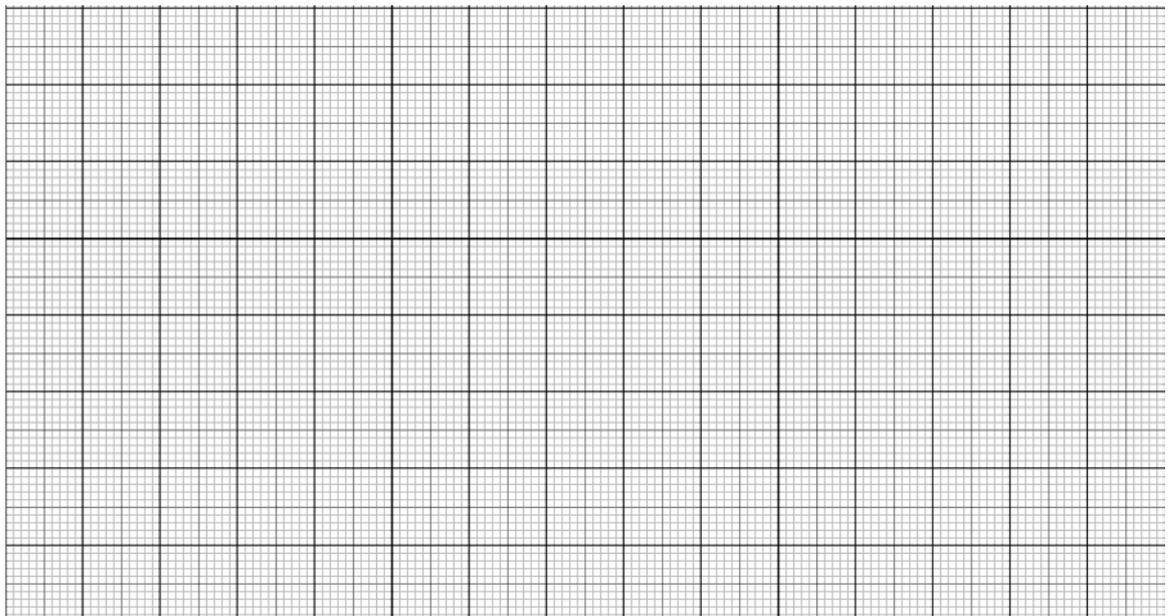
**Задание:** *построить качественную картину электростатического поля при помощи кривых равного потенциала и силовых линий. Картины, полученную в результате исследований, перенести в масштабе в протокол измерений.*

При выполнении работы нахождение зондом эквипотенциальных поверхностей не должно проводиться бессистемно. Необходимо для каждого набора установленных в ванне электродов руководствоваться разумными соображениями о возможной конфигурации поля, в частности, использовать свойства симметрии поля.

- 1) Установите в ванне систему двух цилиндрических электродов.
- 2) На листе бумаги, закреплённом на копировальном столике, отметьте положение электродов путём обводки их зондом (отметьте на бумаге карандашом).
- 3) Ручку регулятора напряжения переведите в нулевое положение, для чего поверните её против часовой стрелки до упора.
- 4) Включите электропитание установки и с помощью ручки регулятора напряжения подайте на зонд напряжение 2 ... 3 В (определяется по вольтметру).
- 5) Перемещением зонда по осям  $x$  и  $y$  (см. рис. 9.3) добейтесь нулевого положения стрелки гальванометра. Полученную точку отметьте на бумаге. Не изменяя потенциала зонда, получите ещё 5 – 6 точек и, соединив точки плавной кривой, покажите эквипотенциальную поверхность, соответствующую начальному значению потенциала.
- 6) Увеличивая показания вольтметра в целое число раз относительно начального значения напряжения (см. п. 5), проведите построение других эквипотенциальных поверхностей (не менее четырех).
- 7) Установите в ванне сплошной и кольцевой цилиндрические электроды, совместив их оси. Исследуйте зависимость напряженности поля цилиндрического электрода от расстояния  $E(r)$  и постройте график этой зависимости.
- 8) Проведя линии, ортогональные к полученным, покажите силовые линии исследуемого электростатического поля постоянного тока (учтите полярность электродов).
- 9) Сделайте выводы о характере электростатического поля.

### ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

Графическое изображение электростатического поля с помощью эквипотенциальных поверхностей и силовых линий:



## Выводы

---

---

---

---

---

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1) Что называется полем сил?

---

---

---

2) Как записать закон Кулона? Для каких зарядов он применим?

---

---

---

3) Что называется напряжённостью электрического поля? Что называется потенциалом электрического поля? Какова связь между напряжённостью и потенциалом данной точки поля?

---

---

---

---

4) В чём заключается физический смысл градиента потенциала?

---

---

---

5) Что называется эквипотенциальной поверхностью?

---

---

---

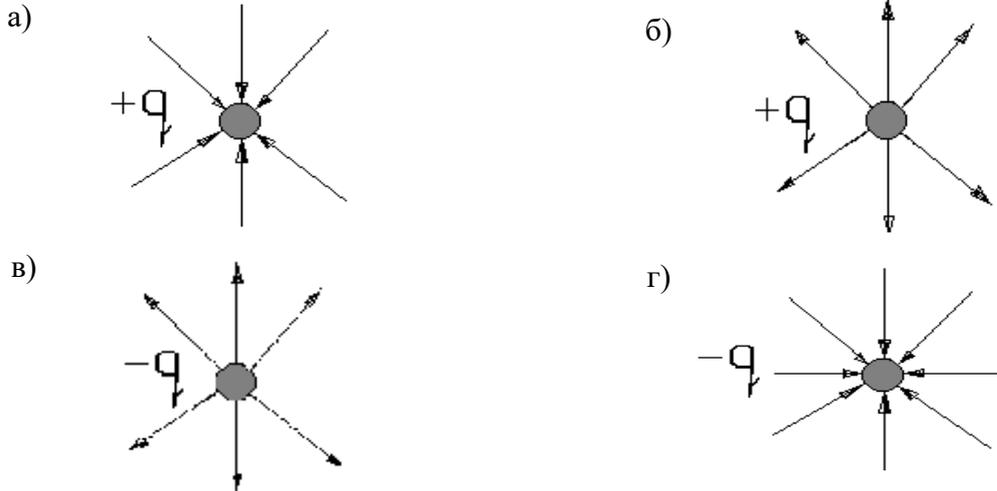
6) Как графически изобразить поле зарядов различной конфигурации с помощью эквипотенциальных поверхностей и силовых линий?

## ТЕСТ

1. Какая из формул правильно выражает зависимость силы Кулона от расстояния между взаимодействующими зарядами?

- а)  $F \sim r$ ;      б)  $F \sim \frac{1}{r}$ ;      в)  $F \sim \frac{1}{r^2}$ ;      г)  $F \sim r^2$ .

2. Выберите правильное графическое изображение полей точечных зарядов с помощью силовых линий:



3. Потенциал электростатического поля точечного заряда выражается формулой:

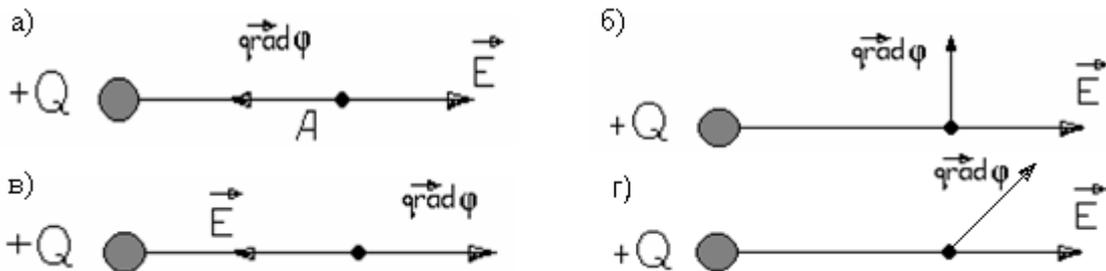
$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$ . Выберите из перечисленных далее утверждений, соответствующие этой формуле:

- а) электрическое поле консервативно;  
 б) электрическое поле дискретно;  
 в) работа электрического поля по замкнутому контуру равна нулю;  
 г) работа электростатического поля по замкнутому контуру меньше нуля.

4. Каков физический смысл градиента потенциала  $\frac{d\varphi}{dr}$ ?

- а) Показывает быстроту изменения потенциала в направлении, касательном к эквипотенциальной поверхности.  
 б) Показывает быстроту изменения потенциала в направлении, перпендикулярном к эквипотенциальной поверхности.  
 в) Показывает изменение потенциала во времени.

5. На каком из рисунков правильно показано направление векторов напряженности и градиента потенциала?



6. Какое из утверждений верно?

Силовые линии электростатического поля:

- а) ортогональны к эквипотенциальным поверхностям;
- б) касательны к эквипотенциальным поверхностям;
- в) совпадают с эквипотенциальными поверхностями.

## 10. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТИКА УИТСТОНА

(Лабораторная работа 37)

**Цель работы:** изучить принцип действия мостика Уитстона.

**Принадлежности:** три магазина сопротивлений, набор неизвестных сопротивлений, источник постоянного тока.

Мостик Уитстона представляет собой два параллельно соединенных потенциометра. В одну диагональ мостика включается гальванометр, в другую – источник тока (рис. 10.1).

Изменяя сопротивление плеч моста, можно получить равновесное состояние моста, то есть равенство потенциалов точек **D** и **B**.

Мостик Уитстона можно использовать для определения неизвестного сопротивления, включенного в одно из плеч моста. В основе расчета лежат правила Кирхгофа.

Первое правило Кирхгофа сформулировано для токов, сходящихся в узле разветвленной цепи: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0.$$

Второе правило формулируется для замкнутого контура, состоящего из последовательно соединенных элементов. В любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов ( $I_i$ ) на сопротивления ( $R_i$ ) соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме электродвижущих сил ( $\mathcal{E}_k$ ), встречающихся в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \mathcal{E}_k.$$

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Метод мостовой схемы (мостик Уитстона) для определения сопротивлений очень точный. Рассмотрим принцип действия мостика Уитстона.

Измеряемое сопротивление и три других переменных сопротивления соединяются так, что образуют замкнутый четырехугольник **ABCD**. В одну диагональ четырех-

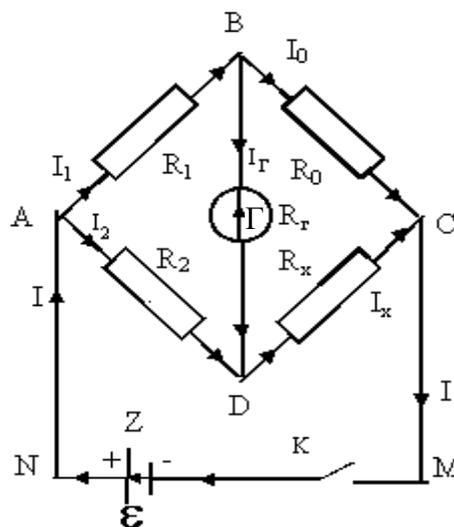


Рис. 10.1

угольника включен гальванометр  $\Gamma$ , в другую – источник постоянного тока  $\mathcal{E}$  с внутренним сопротивлением  $r$  и ключ  $\mathbf{K}$ .

По первому правилу Кирхгофа для узлов  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ , и  $\mathbf{D}$ :

$$\begin{aligned} I - I_1 - I_2 &= 0, \\ I_1 - I_r - I_0 &= 0, \\ I_2 + I_r - I_x &= 0. \end{aligned} \quad (10.1)$$

Уравнение для узла  $\mathbf{C}$  не даёт ничего нового, в него войдут те же величины.

По второму правилу Кирхгофа для контуров  $\mathbf{ABCMNA}$ ,  $\mathbf{ABDA}$  и  $\mathbf{BCDB}$  при обходе контуров по часовой стрелке, получим уравнения:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 + I_0 R_0 + I r &= \mathcal{E}, \\ I_1 R_1 + I_r R_r - I_2 R_2 &= 0, \\ I_0 R_0 - I_x R_x - I_r R_r &= 0, \end{aligned} \quad (10.2)$$

где  $I_1 R_1$ ,  $I_0 R_0$ ,  $I_x R_x$ ,  $I_2 R_2$  – падения напряжения на соответствующих участках цепи.

Всегда можно подобрать переменные сопротивления  $R_0$ ,  $R_1$  и  $R_2$  такими, чтобы потенциалы точек  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{D}$  были равны:  $\varphi_B = \varphi_D$ . Такое положение называют равновесием моста. Ток через гальванометр при этом не идет.

Тогда:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 - I_2 R_2 &= 0, \\ I_0 R_0 - I_x R_x &= 0. \end{aligned} \quad (10.3)$$

Из выражений (10.1) и 10.3) получим:

$$I_1 = I_0; I_2 = I_x; I_1 R_1 = I_2 R_2; I_0 R_0 = I_x R_x. \quad (10.4)$$

Отсюда:

$$R_x = R_0 \frac{R_2}{R_1}.$$

(10.5)

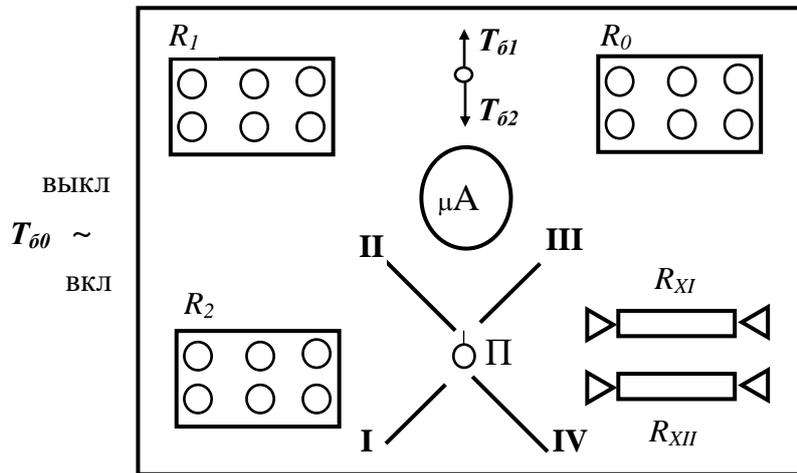


Рис. 10.2

Мостик Уитстона собран на стенде (рис.10.2) и содержит:  $R_1, R_2, R_0$  – магазины сопротивлений;  $R_{XI}$  и  $R_{XII}$  – неизвестные сопротивления, которые нужно измерить;  $\mu\text{A}$  – микроамперметр;  $T_{61}$  – положение переключателя тока для точной настройки микроамперметра на нуль;  $T_{62}$  – положение тумблера для грубой настройки;  $\mathbf{II}$  – переключатель неизвестных со-

противлений;  $\mathbf{I}, \mathbf{II}$  – положения переключателя, соответствующие включению в цепь  $R_{XI}$  и  $R_{XII}$ ;  $\mathbf{III}$  – положение переключателя, соответствующие включению в цепь  $R_{XI}$  и  $R_{XII}$  последовательно;  $\mathbf{IV}$  – положение переключателя, соответствующие включению в цепь  $R_{XI}$  и  $R_{XII}$  параллельно,  $T_{60}$  – тумблер включения в сеть.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Задание:** измерить с помощью мостовой схемы неизвестное сопротивление.

Все величины, полученные в результате измерений и вычислений, внесите в протокол измерений в соответствии с порядком выполнения работы и формой протокола.

- 1) Тумблером  $T\bar{b}_0$  включите установку (рис. 10.2).
- 2) С помощью  $T\bar{b}_2$  включите в цепь микроамперметр  $\mu A$  (грубая настройка). Переключатель  $\Pi$  поставьте в положение **I**.
- 3) Изменяя  $R_1, R_2, R_0$ , при положении  $T\bar{b}_2$  добейтесь, чтобы стрелка на микроамперметре стала на «0». Затем переведите тумблер в положение  $T\bar{b}_1$ , соответствующее включению в цепь микроамперметра  $\mu A$  для точной настройки, и опять, изменяя  $R_1, R_2, R_0$ , установите стрелку  $\mu A$  на «0». Полученные при этом значения  $R_1, R_2, R_0$  занесите в таблицу измерений. Данные измерения повторите ещё два раза для других значений  $R_1, R_2, R_0$ .

4) По измеренным значениям  $R_1, R_2, R_0$  определите три значения  $R_{XI}$  по формуле (10.5) и вычислите среднее значение по формуле:  $R_{cp.I} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n=3} R_{XI_i}$ .

5) Переведите переключатель  $\Pi$  в положение **II** для измерения сопротивления  $R_{X2}$  и повторите измерения и вычисления (см. пп. 3, 4).

6) Переведите переключатель  $\Pi$  в положение **III** для измерения общего сопротивления последовательно соединенных  $R_{XI}$  и  $R_{XII}$ . Повторите измерения и вычисления по (см. пп. 3, 4).

7) Переведите переключатель  $\Pi$  в положение **IУ** для измерения общего сопротивления параллельно соединенных  $R_{XI}$  и  $R_{XII}$ . Проведите измерения и вычисления по пп. 3,4. Данные всех измерений и расчетов занесите в таблицу измерений.

8) Сравните экспериментальные данные измерений **III,IV** с теоретическими, вычисленными по формулам:

$$R_{\text{посл}} = R_{cp.I} + R_{cp.II},$$

$$R_{\text{пар}} = \frac{R_{cp.I} \cdot R_{cp.II}}{R_{cp.I} + R_{cp.II}}.$$

где  $R_{cp.I}$  и  $R_{cp.II}$  – средние значения сопротивлений.

- 9) Сделайте выводы о соответствии экспериментальных значений теоретическим.

**ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ**  
Результаты измерений

Номер положения <i>II</i>	Номер измерения	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_0$ , Ом	$R_X$ , Ом	$R_{cp}$ , Ом
I	1					
	2					
	3					
II	1					
	2					
	3					
III	1					
	2					
	3					
IV	1					
	2					
	3					

Экспериментальные расчеты

Положение переключателя I

$$R_{X1} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_{X2} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_{X3} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Среднее значение сопротивления

$$R_{cp.I} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Положение переключателя III

$$R_{X1} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_{X2} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_{X3} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Среднее значение сопротивления

$$R_{cp.III} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Положение переключателя II

$$R_{X1} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_{X2} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_{X3} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Среднее значение сопротивления

$$R_{cp.II} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Положение переключателя IV

$$R_{X1} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_{X2} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_{X3} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Среднее значение сопротивления

$$R_{cp.IV} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Теоретические расчеты

$$R_{\text{посл}} = \underline{\hspace{2cm}} \quad R_{\text{парал}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Выводы

---



---



---



---



---

## ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1) Что называется электрическим током? Что называется силой тока?

---

---

2) Какой ток называется постоянным?

---

---

3) Как записать закон Ома для участка цепи? Как записать закон Ома для замкнутой цепи?

---

---

4) Что называется падением напряжения на участке цепи? Что называется электродвижущей силой источника?

---

---

5) Как записать правила Кирхгофа?

---

---

6) Что представляет собой мостик Уитстона? Нарисуйте электрическую схему.

---

---

7) Какое состояние мостика Уитстона называется равновесным?

---

---

8) По какой формуле определяется неизвестное сопротивление?

---

---

Примечание: При затруднениях с ответами на вопросы используйте /1, § 1.4/

## ТЕСТ

1. Какая из формулировок верна?

Электрическим током называется:

- а) хаотическое движение заряженных частиц;
- б) упорядоченное движение заряженных частиц;
- в) упорядоченное движение молекул и атомов.

2. Какая из формул выражает закон Ома для полной цепи?

а)  $I = \frac{U}{R+r}$ ;      б)  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ ;      в)  $I = \frac{\mathcal{E}+U}{R+r}$ .

3. Какое из уравнений верно написано для узла *C* электрической цепи, изображенной на рис. 10.3?

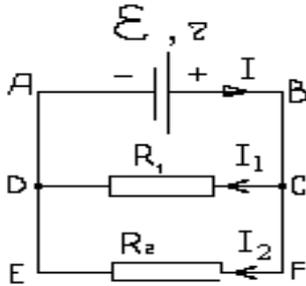


Рис. 2.3

а)  $I - I_1 - I_2 = 0$ ;

б)  $I + I_1 + I_2 = 0$ ;

в)  $I_1 - I - I_2 = 0$ .

4. Какое из уравнений верно написано для контура ABCD (см. рис. 10.3)?

а)  $I r - I_1 R_1 = \mathcal{E}$ ;

б)  $I r + I_1 R_1 = \mathcal{E}$ ;

в)  $I_1 R_1 - I r = -\mathcal{E}$ .

5. Какое уравнение правильно написано для контура DCFE (см. рис. 10.3)?

а)  $I_2 R_2 - I_1 R_1 = \mathcal{E}$ ;

б)  $I_2 R_2 + I_1 R_1 = 0$ ;

в)  $I_2 R_2 - I_1 R_1 = 0$ .

## 11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

(Лабораторная работа 41)

**Цель работы:** определить удельный заряд электрона  $\left(\frac{e}{m}\right)$  методом магнетрона.

**Приборы и принадлежности:** рабочее устройство (кассета) ФПЭ – 3, источник питания ИП, вольтметр ламповый.

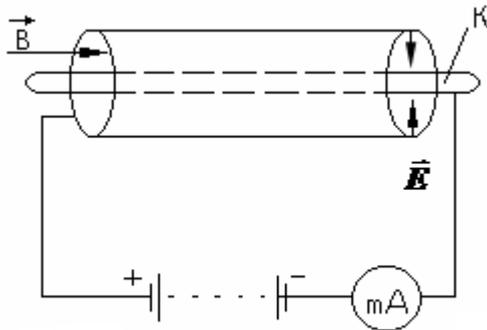


Рис. 11.1

В качестве магнетрона служит двухэлектродная вакуумная лампа – диод, помещенная в магнитное поле. На рис. 11.1 схематически показано устройство магнетрона. Электроны, летящие от катода к аноду, испытывают одновременно действие двух полей: электрического поля ( $\vec{E}$ ) и магнитного ( $\vec{B}$ ).

Электрическое поле ( $\vec{E}$ ) направлено по радиусу анода, а магнитное поле ( $\vec{B}$ ) – параллельно его оси, то есть электроны движутся во взаимно перпендикулярных полях. В отсутствие магнитного поля электроны летят под воздействием электрического поля от катода к аноду прямолинейно по радиусам 1 (рис. 11.2).

В анодной цепи возникает ток, зависящий от анодного напряжения и тока накала. Если при фиксированном анодном напряжении и токе накала создать небольшое магнитное поле ( $\vec{B}$ ), направленное за чертеж (рис. 11.2), то на электроны будет действовать сила Лоренца, искривляющая их траекторию 2. По мере увеличения магнитного поля траектория электронов все более искривляется и при некотором значении  $B_{кр}$  (критическом) электроны возвращаются на катод, не касаясь анода 3, то есть анодный ток стано-

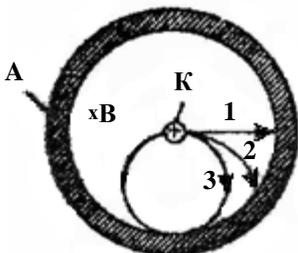


Рис. 11.2

вится равным нулю. На практике нулевое значение анодного тока не достигается, так как часть электронов все же достигает анода, но отмечается резкое падение анодного тока.

Зависимость анодного тока от магнитной индукции при постоянном токе накала и анодном напряжении (рис. 11.3) называется сбросовой характеристикой магнетрона. Расчет удельного заряда в этой работе производится из следующих соображений.

Сила Лоренца, действующая на электрон со стороны магнитного поля, равна:

$$\vec{F} = e[\vec{v}, \vec{B}]$$

где  $e$  – заряд электрона, Кл;  $v$  – скорость электрона, м/с;  $B$  – магнитная индукция, Тл.

Эта сила по характеру является центробежной:

$$eVB = \frac{mV^2}{R}, \quad (11.1)$$

где  $m$  – масса электрона, кг;  $R$  – радиус кривизны траектории, м.

Если предположить, что  $B = B_{кр}$ , тогда радиус траектории электрона будет равен половине радиуса анода (см. рис. 11.2, траектория 3):  $R = R_a / 2$ , где  $R_a$  – радиус анода.

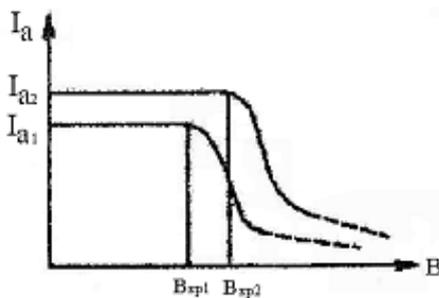


Рис. 11.3

Из формулы (11.1) получаем

$$\frac{e}{m} = \frac{V}{B_{кр}(R_a/2)}. \quad (11.2)$$

Скорость электрона ( $v$ ) определяем из условия, что кинетическая энергия электрона равна работе электрического поля:

$$eU_a = \frac{mv^2}{2} \quad (11.3)$$

где  $U_a$  – анодное напряжение.

Из формулы (11.3) скорость электрона равна:

$$v = \sqrt{2(e/m)U_a}. \quad (11.4)$$

Критическое значение магнитной индукции ( $B_{кр}$ ) определяем по формуле:

$$B_{кр} = \mu_0 I_{кр} \frac{N}{L}, \quad (11.5)$$

где  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $I_{кр}$  – ток в соленоиде, при котором анодный ток близок к нулю;  $N$  – число витков соленоида;  $L$  – длина соленоида, м.

Подставляя выражение (11.4) в формулу (11.2), получаем:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 R_a^2}. \quad (11.6)$$

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

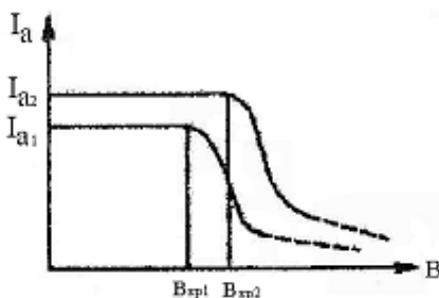


Рис. 11.4

Формула (11.6) позволяет вычислить удельный заряд электрона из условия, что при анодном напряжении ( $U_a$ ) и магнитном поле в соленоиде с индукцией  $B_{кр}$  все электроны перестают попадать на анод. Если бы скорости всех электронов были одинаковы, то с увеличением тока в соленоиде ( $I_c$ ), а, следовательно, индукции ( $B$ ) магнитного поля, анодный ток ( $I_a$ ) в лампе изменялся бы так, как это изображено на рис. 11.4 штриховой линией. На самом деле вертикального спада анодного тока не наблюдается, так как электроны, вылетающие с поверхности катода,

обладают различными скоростями, и зависимость  $I_a = f(I_c)$  имеет вид сплошной кривой. Такую зависимость можно получить с помощью магнетрона. Магнетрон собран внутри кассеты ФПЭ – 3, которая представляет собой прямоугольную коробку с крышкой из органического стекла.

В электрическую схему установки (на рис. 11.5). входят следующие элементы: соленоид  $S$ ; реостат  $R$ ; амперметр для измерения тока в цепи соленоида  $A_s$ ; электронная лампа с анодом  $A$  и катодом  $K$ ; миллиамперметр, измеряющий анодный ток  $A_a$ ; вольтметр, измеряющий анодное напряжение  $V_a$ ; потенциометр для изменения анодного напряжения  $\Pi$ .

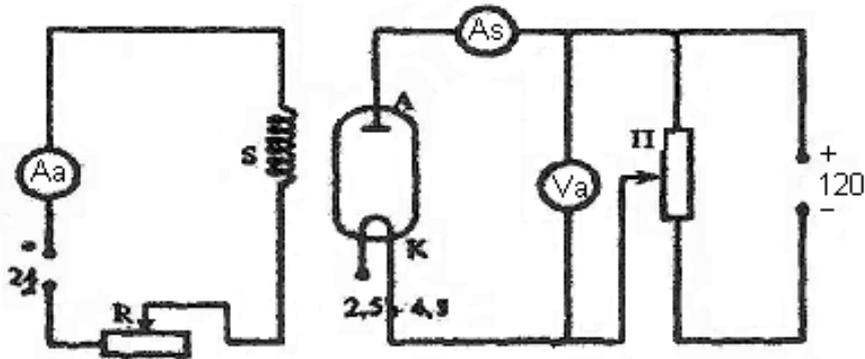


Рис. 11.5

Блок-схема установки (рис. 11.6) включает в себя: кассету ФПЭ; ламповый вольтметр В-7-40/4; источник питания ИП; миллиамперметр для измерения анодного тока

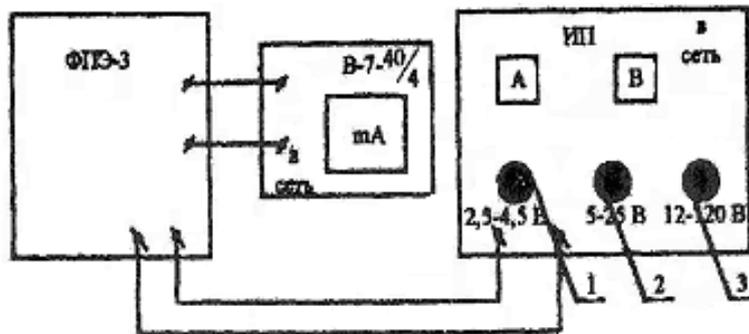


Рис. 11.6

$mA$ ; амперметр для измерения тока в соленоиде  $A$ ; вольтметр для измерения анодного напряжения  $B$ . На панели ИП имеются рукоятки: для регулировки тока накала  $1$ ; для изменения тока в соленоиде  $2$ ; для изменения анодного напряжения  $3$ .

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Задание:** определить удельный заряд электрона  $\left(\frac{e}{m}\right)$ .

Все величины, полученные в результате измерений и вычислений, внесите в протокол измерений в соответствии с порядком выполнения работы и формой протокола.

- 1) Ознакомьтесь с электрической схемой установки (рис. 11.5).
- 2) Ознакомьтесь с блок-схемой (рис. 11.6) и самой экспериментальной установкой.

- 3) Включите установку (рис. 11.6, тумблер «Сеть»).
- 4) С помощью рукоятки 3 подайте на анод напряжение  $U_{a1}$  (по указанию преподавателя 60 – 100 В).
- 5) С помощью рукоятки 1 отрегулируйте ток накала (~4 В). Снимите показание миллиамперметра  $mA$  при отсутствии тока в соленоиде.
- 6) Рукояткой 2 изменяйте ток в соленоиде  $I_c$  с шагом 0,1 – 0,2 А и снимайте зависимость анодного тока ( $I_a$ ) от тока в соленоиде. Данные измерений занесите в таблицу результатов измерений.
- 7) Повторите пп. 4 – 6 при другом анодном напряжении  $U_{a2}$  и занесите данные в таблицу результатов измерений.
- 8) По результатам измерений постройте в протоколе графики зависимости  $I_a = f(I_c)$  для  $U_{a1}$  и  $U_{a2}$ . На рис. 11.3 показан график зависимости  $I_a = f(B)$ , но  $B = \mu\mu_0 n I_c$ ; то есть  $B \sim I_c$ , поэтому построим график  $I_a = f(I_c)$ , как изображено на рис. 11.4. Из графиков определите значения критического тока в соленоиде:  $I_{кр1}, I_{кр2}$
- 9) По формуле (11.5) вычислите значения  $B_{кр1}; B_{кр2}$ .
- 10) По формуле (11.6) вычислите отношения:  $e / m_1; e / m_2$ .
- 11) Найдите среднее значение удельного заряда  $(e / m)_{кр}$  по формуле:

$$\left(\frac{e}{m}\right)_{кр} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n=2} \left(\frac{e}{m}\right)_i.$$

- 12) Определите абсолютную погрешность удельного заряда:

$$\Delta\left(\frac{e}{m}\right) = \left| \left(\frac{e}{m}\right)_{экс} - \left(\frac{e}{m}\right)_{теор} \right|.$$

#### ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

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

Теоретическое значение  $\left(\frac{e}{m}\right)_{теор} = 1,76 10^{11}$  Кл/кг

Радиус анода  $R_a = 1$  мм; Число витков соленоида  $N_c = 2700 \pm 2$ ;

Длина катушки соленоида  $L_c = 168$  мм.

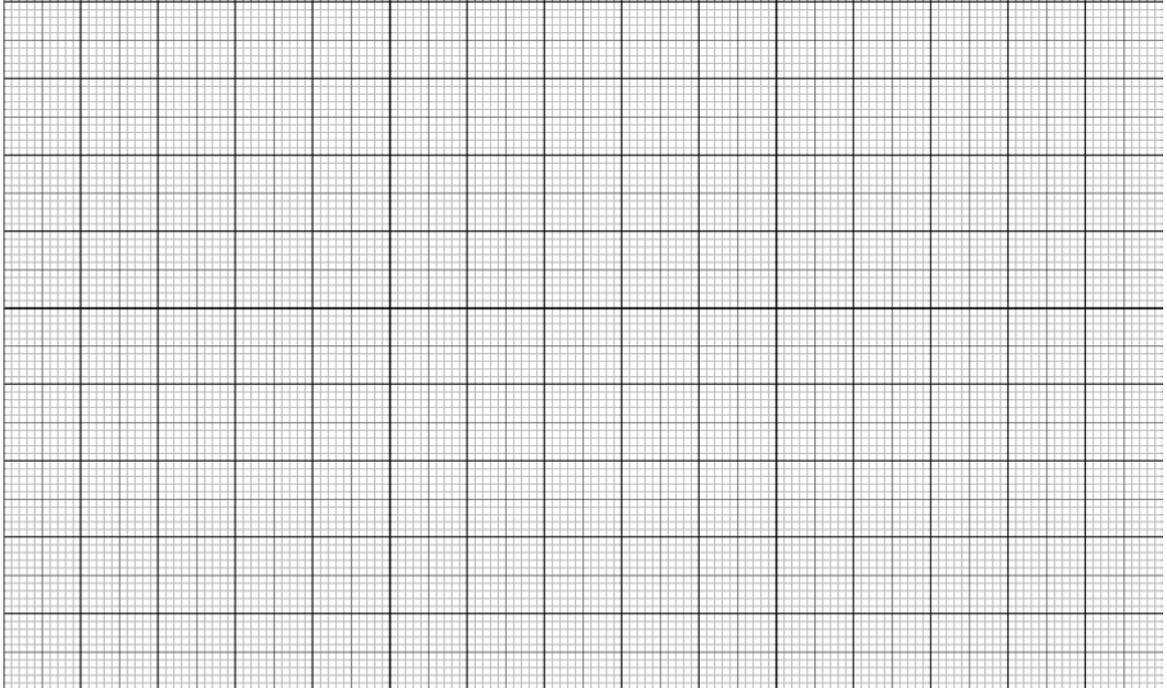
#### Результаты измерений

Номер измерения	$U_{a1} =$ В		Номер измерения	$U_{a2} =$ В	
	$I_c,$ А	$I_a,$ А		$I_c,$ А	$I_a,$ А
1			1		
2			2		
3			3		
4			4		
5			5		
6			6		
7			7		
8			8		
9			9		
10			10		

Графики зависимости  $I_a = f(I_c)$  при анодном напряжении:

$U_{a1} =$

$U_{a2} =$



Критическое значение тока соленоида (взятое из графика  $I_a = f(I_c)$ )

$I_{кр1} =$  \_\_\_\_\_ А

$I_{кр2} =$  \_\_\_\_\_ А

### Расчеты

Критическое значение магнитной индукции:

$B_{кр1} =$  \_\_\_\_\_ А

$B_{кр2} =$  \_\_\_\_\_ А

Удельный заряд:

$\left(\frac{e}{m}\right)_{кр1} =$  \_\_\_\_\_  $\left(\frac{e}{m}\right)_{кр2} =$  \_\_\_\_\_

Среднее значение  $\left(\frac{e}{m}\right)_{кр} =$  \_\_\_\_\_

Абсолютная погрешность удельного заряда:

$\Delta\left(\frac{e}{m}\right) =$  \_\_\_\_\_

### Выводы

---



---



---

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1) Какой вид имеет формула силы Лоренца?

---



---

2) Какие траектории возможны для электрона в магнитном поле?

---



---

3) Изобразите электрическую схему магнетрона? Каков принцип действия магнетрона?

---



---



---

4) Проанализируйте зависимость  $I_a = f(I_c)$ . Почему  $I_a$  не достигает нулевого значения?

---



---

5) Из какого условия определяется скорость  $v$  электрона?

---



---

6) По какой формуле рассчитывается критическое значение индукции  $B$  поля соленоида?

---



---

7) Как вывести расчетную формулу для удельного заряда  $\left(\frac{e}{m}\right)$ ?

---



---

Примечание: При затруднениях с ответами на вопросы используйте /1, § 2.2/

### ТЕСТ

1. Электрон влетел в магнитное поле со скоростью  $v$  перпендикулярно линиям индукции ( $B$ ). По какой траектории он будет двигаться?

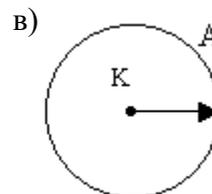
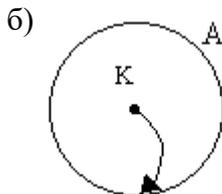
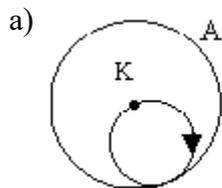
- а) прямолинейно, параллельно линиям  $B$ ;
- б) прямолинейно, перпендикулярно линиям  $B$ ;
- в) по окружности в плоскости, перпендикулярной линиям  $B$ ;
- г) по окружности в плоскости, параллельной линиям  $B$ .

2. Какое из утверждений верно?

Удельный заряд электрона  $\left(\frac{e}{m}\right)$ :

- а) зависит от индукции магнитного поля;
- б) зависит от напряженности электрического поля;
- в) определяется зарядом и массой частиц.

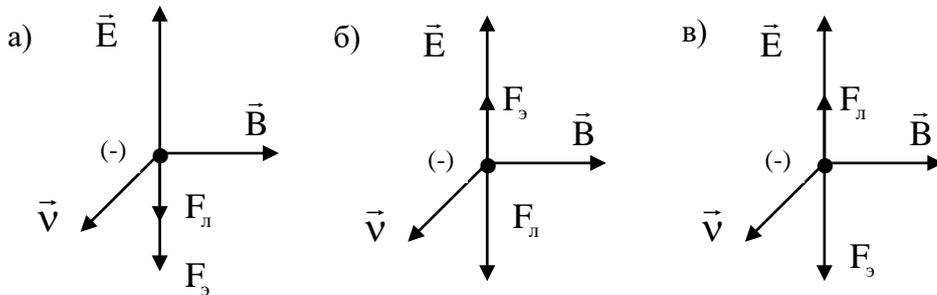
3. На рисунке изображены траектории электрона в магнетроне при различных значениях индукции магнитного поля  $B$ . Какая из них соответствует отсутствию магнитного поля?



4. Электрон влетел в область совместного действия электрического и магнитного полей. При каком условии он будет двигаться прямолинейно без отклонения от первоначального направления?

а)  $\vec{F}_л + \vec{F}_к = 0$ ;      б)  $\vec{F}_л - \vec{F}_к = 0$ ;      в)  $F_л + F_к = 0$ .

5. Электрон влетает в однородное электромагнитное поле, представленное суперпозицией взаимноперпендикулярных электрического и магнитного полей. На каком из рисунков верно указаны векторы электрической  $F_э$  и магнитной  $F_л$  сил, действующих на электрон?



## 12. ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА

(Лабораторная работа 39)

**Цель работы:** изучить зависимость индукции магнитного поля на оси соленоида от силы тока; исследовать распределение магнитного поля вдоль оси соленоида.

**Принадлежности:** кассета ФПЭ-04, источник питания, вольтметр универсальный В7-40/4, соединительные провода.

Соленоидом называется цилиндрическая катушка, состоящая из большого числа витков проволоки, образующих винтовую линию. Магнитное поле соленоида есть результат сложения полей, создаваемых круговыми токами в витках, имеющих общую ось. Напряженность поля велика внутри соленоида и мала вне его.

Графическое изображение магнитного поля соленоида дано на рис. 12.1. Видно, что поле длинного соленоида (рис. 12.1, б) практически сконцентрировано внутри соленоида и является однородным, то есть  $\vec{B} = const$ , а поле короткого соленоида (рис. 12.1., а) изменяется вдоль оси и рассеивается в пространстве.

Индукция поля длинного соленоида определяется по формуле:

$$B = \mu_0 n I, \quad (12.1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $n$  – число витков на единицу длины, 1/м;  $I$  – сила тока соленоида, А.

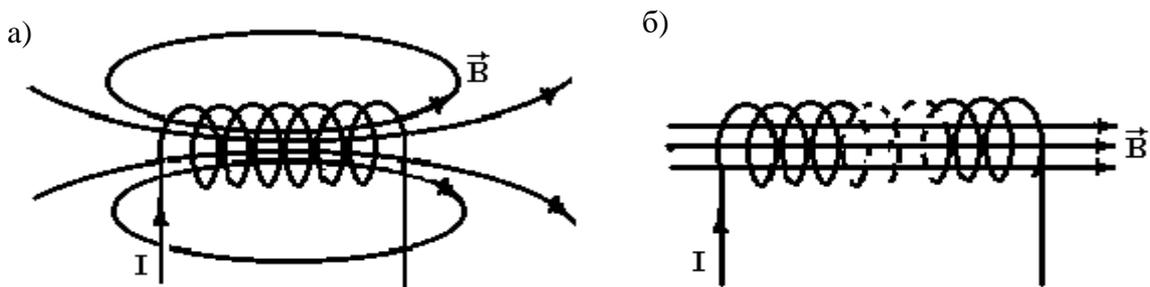


Рис. 12.1

Для короткого соленоида магнитная индукция ( $B$ ) выражается формулой:

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (12.2)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы, под которыми из точки  $A$  видны концы соленоида (рис. 12.2).

Существуют различные методы определения индукции магнитного поля. В нашей работе для исследования магнитного поля используется датчик Холла. Датчик Холла – это магнитоэлектрический полупроводниковый прибор, основанный на использовании эффекта Холла в полупроводниках.

Преимущества датчика Холла для измерения магнитной индукции: линейная зависимость ЭДС Холла от магнитной индукции  $B$  в полях до 1 Тл; отсутствие подвижных деталей; безинерционность; малые размеры датчика, что позволяет производить измерение магнитной индукции в узких зазорах.

Недостатками схем с датчиками Холла являются невысокая чувствительность и довольно высокая погрешность.

Рассмотрим эффект Холла. Если полупроводниковый образец в виде параллелепипеда поместить в магнитное поле (рис. 12.3) так, чтобы индукция поля ( $\vec{B}$ ) была перпендикулярна направлению движения зарядов, образующих электрический ток, то в полупроводнике возникнет поперечное электрическое поле ( $\vec{E}$ ) и соответственная разность потенциалов (ЭДС) Холла ( $U_x$ ).

Это явление называется эффектом Холла. Возникновение ЭДС Холла связано с действием силы Лоренца со стороны магнитного поля на заряженные частицы. Заряды разного знака отклоняются к противоположным стенкам образца, создавая разность потенциалов между ними (рис. 12.3, контакты 3 – 4).

ЭДС Холла определяется по формуле:

$$U_x = \frac{j}{nq_0} \cdot B \cdot d, \quad (12.3)$$

где  $j$  – плотность тока через образец, А/м<sup>2</sup>;  $B$  – индукция магнитного поля, Тл;  $d$  – расстояние между краями образца в направлении, перпендикулярном направлению тока, м;  $n$  – концентрация носителей тока, 1/м<sup>3</sup>;  $q_0$  – заряд носителей тока, Кл.

Плотность тока равна:  $j = \frac{I}{S}$ , где  $S = d \cdot h$  – площадь стороны образца, через которую протекает ток  $I$  (рис. 12.3).

Подставляя выражение плотности тока в формулу (12.3), получим:

$$U_x = \frac{I}{n \cdot q_0} \cdot \frac{I \cdot B}{h}. \quad (12.4)$$

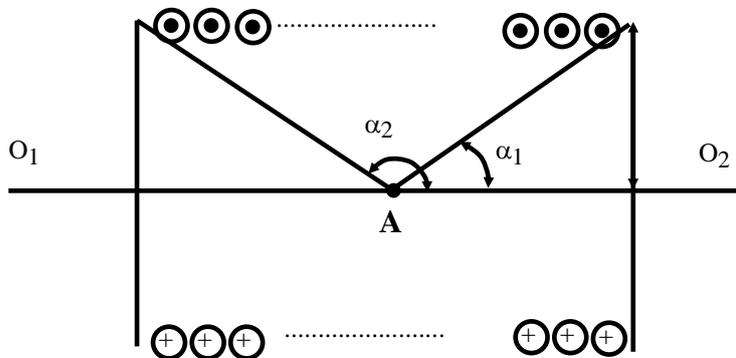


Рис. 12.2

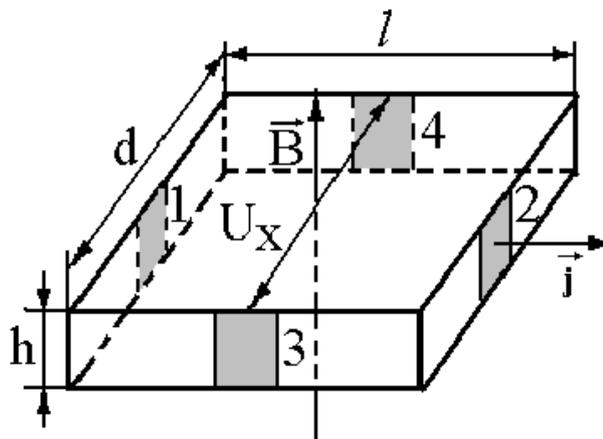


Рис. 12.3

Таким образом, формула (12.4) дает линейную зависимость  $U_x$  от  $B$ .

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Поскольку магнитная индукция ( $B$ ) пропорциональна току в соленоиде, то холловская разность потенциалов ( $U_x$ ) пропорциональна току в соленоиде. Изменяя ток ( $I_s$ ) соленоида, можно найти зависимость ЭДС Холла от значения индукции магнитного поля, то есть тарировать датчик Холла.

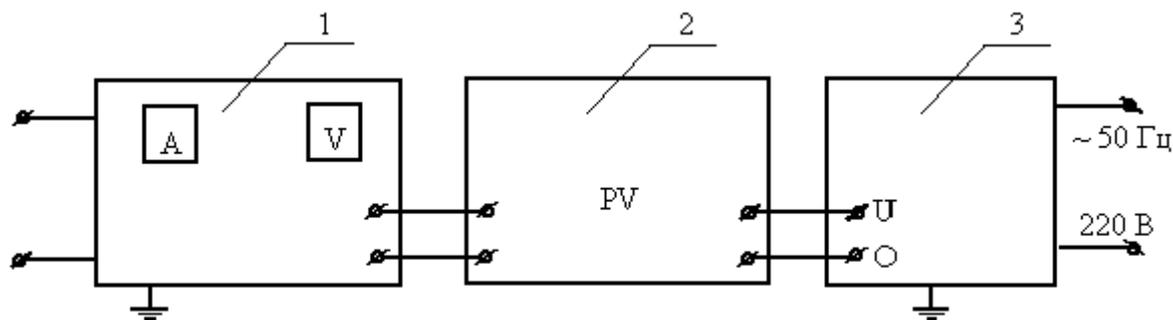


Рис. 12.4

На основании полученной тарировки, перемещая датчик относительно центра соленоида, можно исследовать изменение вектора индукции вдоль оси соленоида.

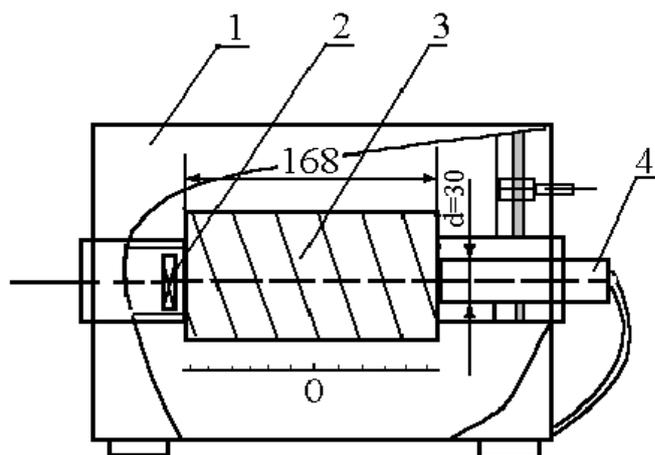


Рис. 12.5

Экспериментальная установка состоит (рис. 12.4) из источника питания – 1; кассеты – 2; микровольтметра – 3.

На рис. 12.5 изображена кассета установки ФПЭ-04. Она состоит из корпуса 1, датчика Холла 2, соленоида 3, выдвижного штока 4. Датчик Холла находится в торце штока и перемещается вместе с ним. Установка предназначена для исследования распределения магнитной индукции вдоль оси соленоида с помощью датчика Холла.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Все величины, полученные в результате измерений и вычислений, внести в протокол измерений в соответствии с порядком выполнения работы и формой протокола.

*Задание 1. Произвести тарировку датчика Холла. Для этого:*

- 1) Соберите цепь согласно рис. 12.4.
- 2) Включите установку, установите с помощью выдвижного штока 4 (см. рис. 12.5) датчик Холла в центре соленоида, определите по микровольтметру значения ЭДС Холла для различных токов от 0,1 до 1 А. Ток изменяется с помощью ручки, расположенной на панели источника питания.
- 3) По формуле (12.1) вычислите значение магнитной индукции  $B$  для каждого значения тока. Все результаты занесите в первую таблицу измерений.
- 4) По результатам измерений постройте в протоколе график зависимости ЭДС Холла от индукции магнитного поля:  $U_x = U_x(B)$ .

*Задание 2. Исследуйте распределение магнитного поля вдоль оси соленоида.*

- 1) Установите ток в соленоиде  $I = 1$  А.
  - 2) Перемещая датчик Холла на расстояния  $x = 0, 1, 2, \dots$  см, относительно центра катушки, измерьте ЭДС Холла.
  - 3) По графику  $U_x(B)$  по измеренным значениям ЭДС Холла определите значения индукции магнитного поля для каждого положения датчика относительно центра соленоида. Результаты занесите во вторую таблицу измерений.
  - 4) По результатам измерений постройте в протоколе график зависимости  $B = B(x)$ .
- Сделайте вывод.

### ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

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

Число витков на единицу длины  $n = 2500$  м<sup>-1</sup>.

Результаты измерений 1

Номер измерения	$I_c$ , А	$U_x$ , В	$B$ , Тл
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Магнитная индукция:

$B_1 =$  \_\_\_\_\_

$B_2 =$  \_\_\_\_\_

$B_3 =$  \_\_\_\_\_

$B_4 =$  \_\_\_\_\_

$B_5 =$  \_\_\_\_\_

$B_6 =$  \_\_\_\_\_

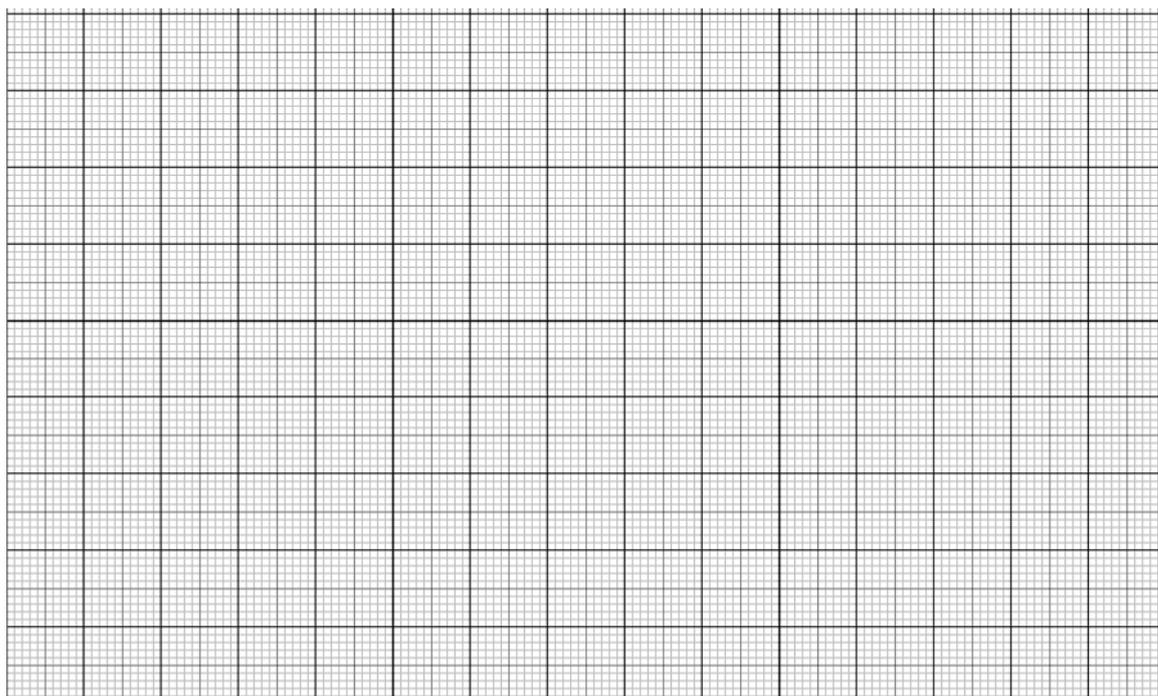
$B_7 =$  \_\_\_\_\_

$B_8 =$  \_\_\_\_\_

$B_9 =$  \_\_\_\_\_

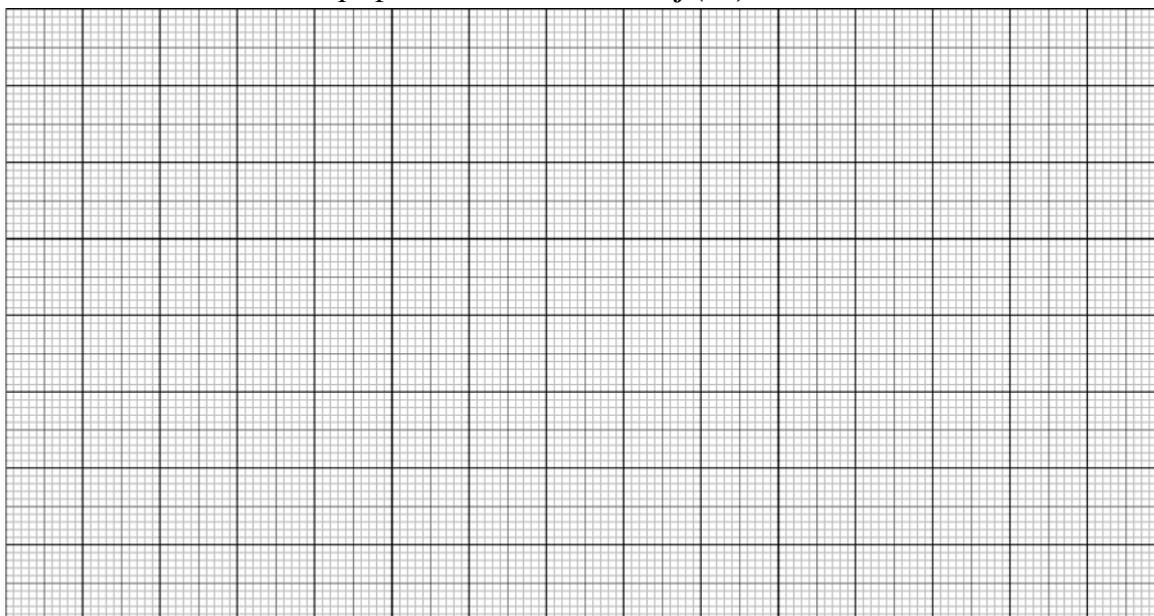
$B_{10} =$  \_\_\_\_\_

График зависимости  $U_x = f(B)$



## Результаты измерений 2

Номер измерения	$x$ , м	$U_x$ , В	$B$ , Тл
1	0,00		
2	0,01		
3	0,02		
4	0,03		
5	0,04		
6	0,05		
7	0,06		
8	0,07		
9	0,08		
10	0,09		

График зависимости  $B = f(x)$ 

## Выводы

---



---



---



---

## ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1) В чём заключается физический смысл магнитной индукции ( $\vec{B}$ )?

---



---



---

2) Как изобразить графически поле длинного соленоида? поле короткого соленоида?

3) По какой формуле определяется значение индукции на оси длинного соленоида? На оси короткого соленоида?

---



---

4) В чём заключается эффект Холла?

---



---

5) Для чего нужна тарировка датчика Холла?

---



---

Примечание: При затруднениях с ответами на вопросы используйте /1, § 2.2/

### ТЕСТ

1. Физический смысл магнитной индукции ( $\mathbf{B}$ ) выражается формулой:  $\mathbf{B} = \frac{M_{вр. max}}{p_m}$ , где  $M_{вр. max}$  - максимальный момент вращения, действующий на виток с током в магнитном поле,  $p_m$  - магнитный момент витка с током.

Какое из утверждений верно для этой величины?

Магнитная индукция является:

- а) энергетической характеристикой поля;
- б) силовой характеристикой поля;
- в) не имеет физического смысла.

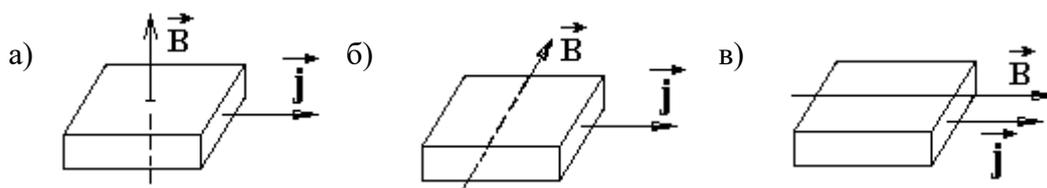
2. В каком из соленоидов, изображенных на рисунке магнитное поле является однородным?



3. По какой из формул определяется ЭДС Холла?

- а)  $U = qd$  ;
- б)  $U = jSR$  ;
- в)  $U = \frac{j}{nq_0} B d$  .

4. В каком из проводников, изображенных на рисунке, не возникает эффект Холла? ( $\vec{B}$  – магнитная индукция,  $\vec{j}$  – плотность тока).



5. Зависимость ЭДС Холла от индукции магнитного поля:

- а) квадратичная;
- б) линейная;
- в) обратная

### 13. ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

(Лабораторная работа 44)

**Цель работы:** изучить явление магнитного гистерезиса.

Приборы и принадлежности: генератор сигналов низкочастотный, усилитель, осциллограф, кассета ФПЭ-07/02, соединительные кабели.

Магнетиками называются все среды, способные намагничиваться в магнитном поле, то есть создавать собственное магнитное поле. По магнитным свойствам магнетики подразделяются на три основные группы: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Количественной характеристикой намагниченного состояния вещества служит векторная величина - намагниченность ( $\vec{J}$ ), равная отношению магнитного момента малого объема вещества к величине ( $\Delta V$ ) этого объема:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_{mi},$$

где  $\vec{p}_{mi}$  - магнитный момент  $i$ -го атома из общего числа  $n$  атомов, содержащихся в объеме  $\Delta V$ , А м<sup>2</sup>.

Магнитные свойства вещества определяются взаимодействием атомов с магнитным полем. Электрон, движущийся в атоме вокруг ядра, образует электрический ток. Сила тока определяется по формуле:

$$I = e \nu,$$

где  $e$  - заряд электрона, Кл;  $\nu$  - частота вращения, с<sup>-1</sup>.

Произведение силы тока на площадь орбиты электрона называется магнитным моментом электрона:

$$\vec{p}_m = I \cdot S \cdot \vec{n},$$

где  $I$  - электрический ток, А;  $S$  - площадь орбиты, м<sup>2</sup>;  $\vec{n}$  - единичный вектор нормали к плоскости орбиты.

Направление  $\vec{p}_m$  задается единичным вектором нормали к плоскости орбиты. Направление нормали связано с направлением тока правилом правого винта.

Орбитальным магнитным моментом ( $\vec{p}_m$ ) атома называется геометрическая сумма орбитальных магнитных моментов всех электронов атома:

$$\vec{p}_m = \sum_{i=1}^n \vec{p}_{mi}.$$

Связь между индукцией, напряженностью магнитного поля и намагниченностью описывается соотношением:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \vec{H},$$

где  $\vec{B}$  - вектор магнитной индукции, характеризует результирующее магнитное поле в веществе, Тл;  $\vec{J}$  - вектор намагниченности, А/м;  $\vec{H}$  - вектор напряженности магнитного поля, характеризует поле в вакууме, А/м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнитная постоянная.

В однородных изотропных магнетиках намагниченность прямо пропорциональна напряженности магнитного поля:

$$\vec{J} = \chi_m \vec{H},$$

где  $\chi_m$  - магнитная восприимчивость вещества.

Для характеристики влияния вещества на магнитное поле вводится относительная магнитная проницаемость ( $\mu$ ), показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе ( $B$ ) отличается от магнитной индукции ( $B_0$ ) в вакууме:

$$B = \mu B_0 = \mu \mu_0 H.$$

Связь между величинами  $\chi_m$  и  $\mu$  описывается соотношением:  $\mu = 1 + \chi_m$ .

Диамагнетиками называются вещества, магнитные моменты атомов которых в отсутствие внешнего магнитного поля равны нулю, так как магнитные моменты всех электронов атомов взаимно скомпенсированы. В диамагнетиках  $\mu < 1$ , причем, как показывают измерения, отличие  $\mu$  от единицы невелико, т.к.  $\chi_m \approx 10^{-5}$ .

Парамагнетиками называются вещества, атомы которых в отсутствие внешнего магнитного поля имеют отличный от нуля магнитный момент ( $p_m$ ). Парамагнетики обладают магнитной проницаемостью большей единицы, но не намного:  $\chi_m \approx 10^{-4}$ .

Ферромагнетиками называются твердые вещества, обладающие при не слишком высоких температурах самопроизвольной намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий: магнитного поля, деформации, изменения температуры. Ферромагнетики обладают большой магнитной проницаемостью  $\mu \gg 1$ , причем  $\mu$  сильно зависит от напряженности магнитного поля. По этой причине в ферромагнетиках магнитную проницаемость определяют по формуле:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}.$$

У ферромагнетиков вследствие зависимости  $\mu$  и  $\chi_m$  от напряженности магнитного поля функциональная связь  $J$  и  $H$  (рис. 13.1) является нелинейной.

Атомы (молекулы) ферромагнетиков характеризуются, во-первых, большим значением магнитного момента:

$$p_m = R \mu_B.$$

где  $R$  - целое число, значение которого составляет 3 - 5;  $\mu_B = 9,3 \cdot 10^{-24}$  Дж/Тл - магнетон Бора.

Магнетоном Бора называется собственный магнитный момент электрона

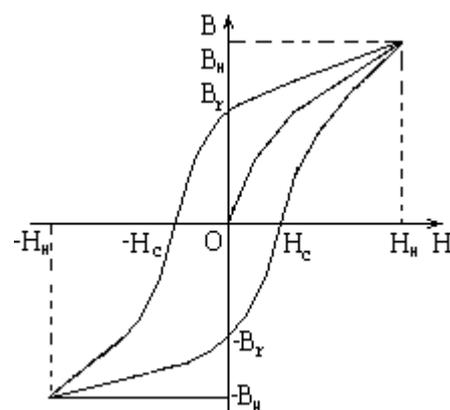
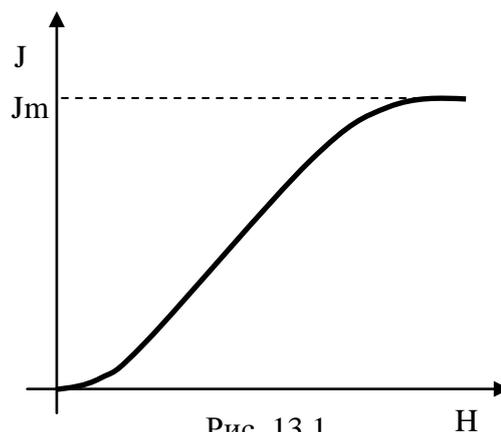
$\mu_B = -\frac{e\hbar}{2m}$ , где  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл - заряд электрона,  $\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - постоянная

Планка,  $m = 9.1 \cdot 10^{-31}$  кг - масса электрона.

Во-вторых, для ферромагнетиков характерно значительное взаимодействие соседних атомов, называемое обменным. В результате обменного взаимодействия магнитные моменты соседних атомов ориентируются в одном направлении и образуют области спонтанной (самопроизвольной) намагниченности - домены.

Средний размер домена составляет  $10^{-4}$  см, что значительно больше размеров атома  $\approx 10^{-8}$  см.

Намагниченность ферромагнетика в целом определяется ориентацией намагниченности доменов. При хаотической ориентации  $J = 0$ , при той или иной сте-



пени упорядоченности имеется остаточная намагниченность ( $J_r$ ).

Способность вещества сохранять намагниченность в отсутствие внешнего магнитного поля приводит к неоднозначной зависимости  $B(H)$ , называемой магнитным гистерезисом. Таким образом, намагниченность ферромагнетика определяется еще и начальными условиями. Петлей гистерезиса (рис. 13.2) называется кривая изменения магнитной индукции ферромагнитного тела, помещенного во внешнее магнитное поле, при изменении напряженности поля от  $+H$ , до  $-H$ ;  $H_n$  - напряженность магнитного поля, соответствующая насыщению.

Магнитная индукция  $\pm B_n$ , возникающая при значении напряженности внешнего поля, равной  $\pm H_n$ , называется индукцией насыщения. Магнитная индукция  $\pm B_r$ , сохраняющаяся в образце после уменьшения напряженности поля от  $\pm H_n$  до 0, называется остаточной индукцией. Ее существование является основой создания постоянных магнитов

Напряженность ( $H_c$ ), обратного поля, доводящего магнитную индукцию до нуля, называется коэрцитивной силой (задерживающей напряженностью). Площадь петли гистерезиса (потери на гистерезис) прямо пропорциональна работе, совершенной при перемагничивании:

$$P_h = \frac{1}{2} \cdot \Delta H \cdot \Delta B \dots$$

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Блок-схема установки для изучения магнитного гистерезиса (рис. 13.3) содержит - звуковой генератор ГЗ; кассету (ФПЭ-07/02) ФПЭ; электронный осциллограф ЭО.

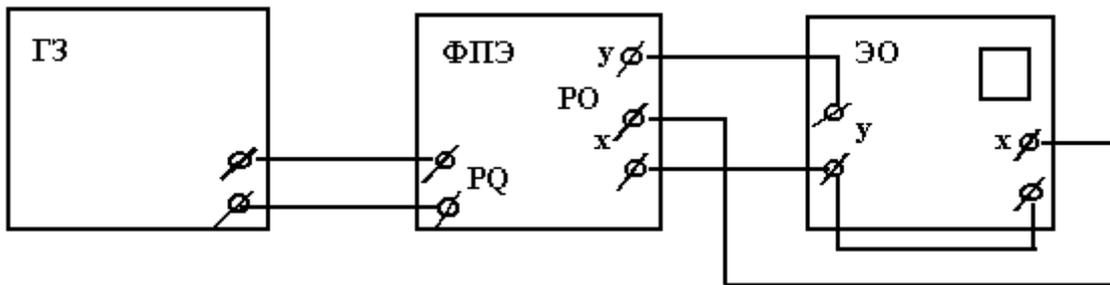


Рис. 13.3

Синусоидальное напряжение, вырабатываемое генератором низкой частоты ГЗ, подается на вход PQ кассеты ФПЭ-07/02 и запитывает первичную обмотку трансформатора Т (см. рис. 13.4.). Первичная обмотка является намагничивающей. Она создает в исследуемом ферритовом сердечнике магнитное поле напряженностью  $H$ . Пропорциональное напряженности  $H$  напряжение  $U_x$  на сопротивлении  $R_1$  подаётся с выхода x (рис. 13.3) кассеты PO на вход осциллографа x.

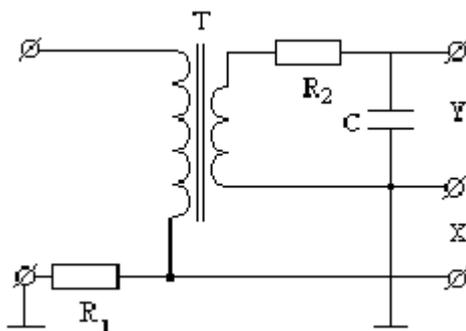


Рис. 13.4

Пропорциональное магнитной индукции ( $B$ ) напряжение ( $U_y$ ) с гнезда y PO кассеты подается на вход осциллографа y. Тогда на экране осциллографа получается петля гистерезиса.

Принципиальная схема установки изображена на рис. 13.4. Первичная обмотка трансформатора питается переменным током  $I_1$  че-

рез сопротивление  $R_1$ . Индукция магнитного поля внутри обмотки равна:

$$B_0 = \mu_0 n_1 I_1,$$

где  $n_1$  - число витков на единицу длины сердечника.

Напряжение ( $U_x$ ), подаваемое на вход  $x$  с сопротивления  $R_1$ , равно:

$$U_x = I_1 R_1 = \frac{R_1}{\mu_0 n_1} B_0 = \frac{R_1 H}{n_1}.$$

Отсюда:

$$H = \frac{n_1}{R_1} U_x = \alpha U_x, \quad (13.1)$$

где  $\alpha = \frac{n_1}{R_1}$ .

Во вторичной обмотке источником тока является ЭДС индукции, равная:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Потокоцепление ( $\Psi$ ) равняется произведению магнитного потока ( $\Phi = BS$ ) на число витков вторичной обмотки:

$$\Psi = BSN_2, \quad (13.2)$$

где  $S$  - площадь поперечного сечения исследуемого ферритового сердечника,  $N_2$  - число витков вторичной обмотки. Дифференцируя (13.2), получаем:

$$\mathcal{E} = -SN_2 \frac{dB}{dt}.$$

Закон Ома для вторичной цепи имеет вид:

$$\mathcal{E} = U_c + I_2 R_2. \quad (13.3)$$

Напряжение на конденсаторе ( $U_c$ ) выражается через силу тока  $I_2$ :

$$U_c = U_y = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt, \quad (13.4)$$

где  $C$  - ёмкость конденсатора,  $Q$  - заряд конденсатора.

При большом значении сопротивления  $R_2$  первым слагаемым в правой части (13.3) можно пренебречь, и найти силу тока по формуле:  $I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2}$ , то есть

$$I_2 = \frac{N_2 S}{R_2} \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (13.5)$$

Теперь из выражения (13.4) для  $U_y$  получаем:

$$U_y = \frac{N_2 S}{R_2 C} B.$$

Отсюда

$$B = \beta U_y, \quad (13.6)$$

где

$$\beta = \frac{R_2 C}{N_2 S}. \quad (13.7)$$

Под действием напряжений  $U_x$  и  $U_y$  электронный луч описывает на экране осциллографа петлю гистерезиса.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Задание:** снять кривую намагниченности, измерить параметры ферромагнетика, оценить потери на перемагничивание.

Все величины, полученные в результате измерений и вычислений, внести в протокол измерений в соответствии с порядком выполнения работы и формой протокола.

1) Включите и прогрейте установку. Установите по заданию преподавателя частоту генератора ГЗ из интервала 700 - 800 Гц. Получите петлю на экране осциллографа и с помощью делителей В/дел и Время/дел подберите ее размеры так, чтобы она занимала большую часть экрана.

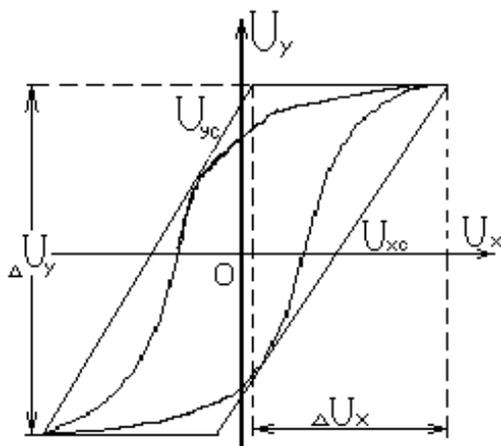


Рис. 13.5

2) Перенесите изображение максимальной петли в протокол в виде графика  $y = y(x)$ . Определите коэрцитивную силу и остаточную намагниченность. Для этого снимите с петли гистерезиса значения  $U_{xc}$  и  $U_{yc}$  (рис. 13.5). Напряжение  $U_{yc}$  снимается по шкале осциллографа с учетом цены деления регулятора напряжения В/дел. Напряжение  $U_{xc}$  снимаем с вольтметра генератора низкой частоты. Вычислите коэрцитивную силу ( $H_c = \alpha U_{xc}$ ) и остаточную индукцию ( $B_r = \beta U_{yc}$ ).

3) Найдите координаты  $U_x$  и  $U_y$  вершин петли (рис. 13.5) и по формулам (13.1) и (13.6) определите  $B$  и  $H$ . Результаты занесите в таблицу измерений.

4) С помощью ручки «Регулировка выхода» звукового генератора ГЗ, уменьшая петлю, повторите измерения несколько раз, определяя каждый раз  $B$  и  $H$  по формулам (13.1) и (13.6).

5) Установите максимальную петлю гистерезиса и замените петлю параллелограммом. Определите его параметры (рис. 13.5): основание ( $\Delta U_x$ ) и высоту ( $\Delta U_y$ ). По формулам (13.1) (13.6) вычислите значения  $\Delta H$  и  $\Delta B$ . Вычислите работу перемагничивания, как половину площади петли гистерезиса:  $P_h = \frac{1}{2} \cdot \Delta H \cdot \Delta B$ .

6) Определите значения магнитной проницаемости по формуле:  $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$  для каждого измерения (см. п. 4).

7) По результатам измерений постройте в протоколе график зависимости (кривую намагничивания) индукции ( $B$ ) от напряженности ( $H$ ) магнитного поля:  $B = f(H)$ .

8) По результатам измерений постройте в протоколе график зависимости магнитной проницаемости ( $\mu$ ) от напряженности ( $H$ ) магнитного поля:  $\mu = f(H)$ .

### ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

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

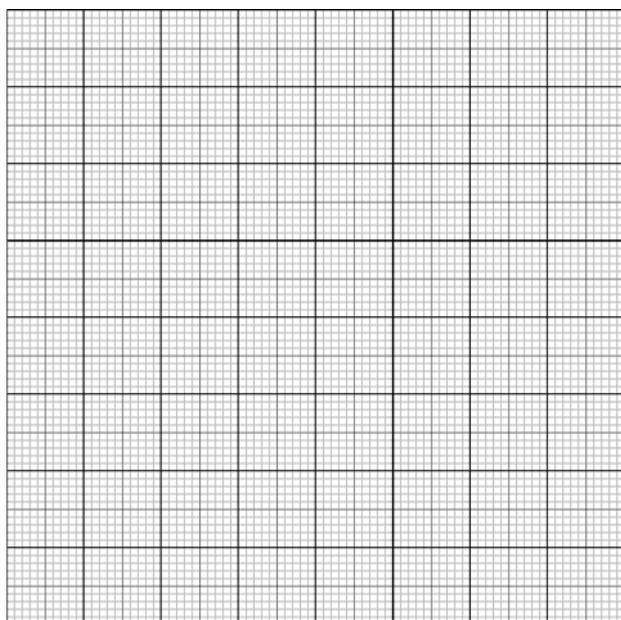
$\alpha = 12,1$  А/(м В);  $\beta = 7,1 \cdot 10^{-2}$  Тл/В.

### Расчеты

1. Коэрцитивная сила:  $H_c =$  \_\_\_\_\_

2. Остаточная намагниченность:  $B_r =$  \_\_\_\_\_

3. Магнитная петля в масштабе  $y = y(x)$



$\Delta H =$  \_\_\_\_\_

$\Delta B =$  \_\_\_\_\_

4. Работа перемagnичивания

$P_h =$  \_\_\_\_\_

### Результаты измерений

Номер измерения	$U_x, В$	$U_y, В$	$H, А/м$	$B, Тл$	$\mu$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

### Расчеты

Напряженность

Магнитная индукция

Магнитная проницаемость

$$H_1 =$$

$$B_1 =$$

$$\mu_1 =$$

$$H_2 =$$

$$B_2 =$$

$$\mu_2 =$$

$$H_3 =$$

$$B_3 =$$

$$\mu_3 =$$

$$H_4 =$$

$$B_4 =$$

$$\mu_4 =$$

$$H_5 =$$

$$B_5 =$$

$$\mu_5 =$$

$$H_6 =$$

$$B_6 =$$

$$\mu_6 =$$

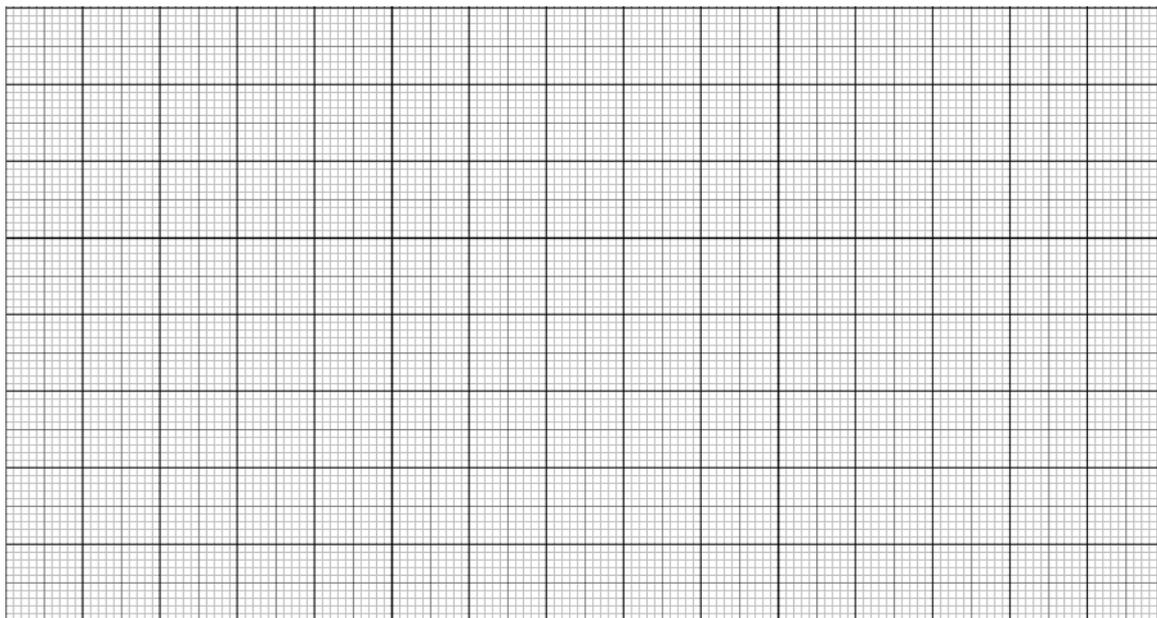
$$H_7 =$$

$$B_7 =$$

$$\mu_7 =$$

График зависимости  $B = f(H)$ ;

График зависимости  $\mu = f(H)$



Выводы

---

---

---

---

**ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА**

1) Что называется магнитным моментом?

---

---

---

2) Что называется намагниченностью вещества?

---

---

---

3) Как связаны между собой векторы напряженности, индукции и намагниченности магнитного поля?

---

---

---

4) Что называется магнитной проницаемостью? Что она характеризует?

---

---

---

5) Какие типы магнетиков Вам известны? Каковы особенности намагничивания ферромагнетиков?

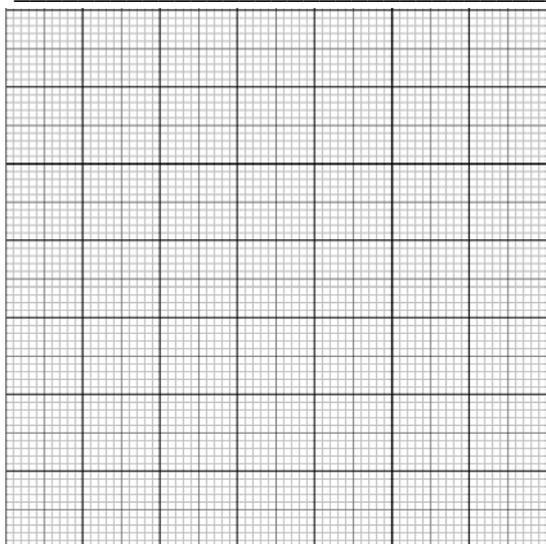
---



---



---



6) Нарисуйте график «петли гистерезиса». Укажите на графике коэрцитивную силу и остаточную намагниченность.

7) Каков физический смысл площади петли гистерезиса?

---



---



---

Примечание: При затруднениях с ответами на вопросы используйте /1, § 2.3/

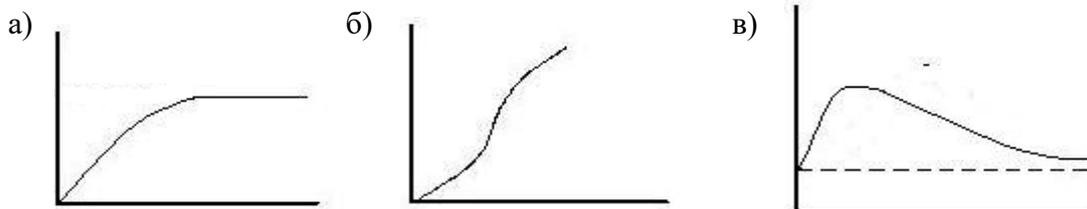
### ТЕСТ

1. Какое из утверждений верно для ферромагнетиков?

Магнитная проницаемость ферромагнетиков

- а)  $\mu < 1$ ;
- б)  $\mu \gg 1$ ;
- в)  $\mu \geq 1$ .

2. На рисунке изображены три графика. Определите, какую зависимость характеризует каждый из них:  $J(H)$ ;  $\mu(H)$ ;  $B(H)$ ?



3. Какие из перечисленных величин зависят от вещества?

- а) магнитная напряженность  $H$ ;
- б) магнитная индукция  $B$ ;
- в) намагниченность  $J$ .

4. Какая из формул выражает закон электромагнитной индукции?

$$\text{а) } \mathcal{E} = I(R + r); \quad \text{б) } \mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}; \quad \text{в) } \sum_{i=1}^k \mathcal{E}_i = \sum_{i=1}^n I_i R_i.$$

5. Как происходит намагничивание ферромагнетиков?

- а) В магнитном поле происходит ориентация магнитных моментов отдельных атомов по полю.  
 б) В магнитном поле происходит ориентация доменов по полю.  
 в) В магнитном поле происходит ориентация магнитных моментов отдельных атомов против поля.

#### 14. ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ОСЦИЛЛОГРАФА

(Лабораторная работа 50)

**Цель работы:** изучить один из способов возбуждения и регистрации электромагнитных колебаний в электрической цепи.

Приборы и принадлежности: осциллограф С<sub>1</sub> - 73, магазин сопротивлений, катушка индуктивности тип КИИ,  $L = 0,01$  Гн.

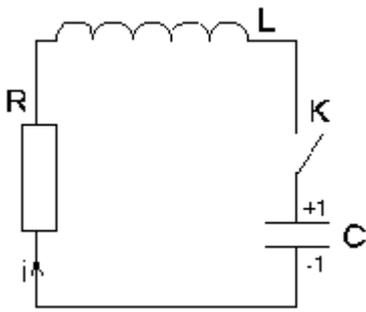


Рис. 14.1

В электрической цепи (рис. 14.1), содержащей емкость, индуктивность и активное сопротивление, могут возникнуть электрические колебания. Если при разомкнутом ключе конденсатор  $C$  зарядить до разности потенциалов  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ , а затем замкнуть ключ  $K$ , то конденсатор начнет разряжаться через цепочку, состоящую из индуктивности и активного сопротивления  $R$ . В цепи возникнет изменяющийся со временем электрический ток  $i$ .

По закону Ома для участка цепи имеем:

$$iR = \Delta\varphi + \mathcal{E}, \quad (14.1)$$

где  $i$  - мгновенное значение тока в цепи, А;  $R$  - активное сопротивление Ом;  $\Delta\varphi$  - мгновенное значение разности потенциалов между обкладками 1 и 2 конденсатора, В;  $\mathcal{E}$  - мгновенное значение ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке ( $L$ ) при протекании по ней переменного тока  $i$ , А.

Так как разность потенциалов между обкладками конденсатора равна:  $(\varphi_1 - \varphi_2) = -q/C$ , а  $\mathcal{E} = -L \frac{di}{dt}$ , то уравнение (14.1) примет вид:

$$iR = -\frac{q}{C} - L \frac{di}{dt} \quad (14.2)$$

Разделив это уравнение на  $L$  и заменив  $i$  на  $\dot{q}$ , а  $di/dt$  на  $\ddot{q}$ , получим:

$$\ddot{q} + \frac{R}{L}\dot{q} + \frac{1}{LC}q = 0. \quad (14.3)$$

Приняв во внимание, что величина, обратная  $LC$ , равна квадрату собственной частоты колебаний контура  $\omega_0$ , то есть

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad (14.4)$$

и введя обозначение

$$\beta = \frac{R}{2L},$$

где  $\beta$  - коэффициент затухания,  $c^{-1}$ , уравнению (14.3) можно придать вид:

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = 0. \quad (14.5)$$

Уравнение (14.5) по виду совпадает с дифференциальным уравнением затухающих механических колебаний.

При условии, что  $\beta^2 < \omega_0^2$ , то есть  $\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$ , решение уравнения (14.5) имеет вид:

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha). \quad (14.6)$$

Разделив заряд (14.6) на емкость  $C$ , получим напряжение на конденсаторе:

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

где  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ ,  $u_0 = \frac{q_0}{C}$

Сила тока при затухающих колебаниях выражается уравнением

$$i = \omega_0 q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha + \psi)$$

где  $\omega_0 q_0 = i_0$  - амплитуда тока при  $t = 0$ ,  $\psi$  - сдвиг фаз между током и напряжением.

Таким образом, при наличии в контуре активного сопротивления сила тока опережает по фазе напряжение на конденсаторе более чем на  $\pi/2$  (при  $R=0$  опережение составляет  $\pi/2$ ).

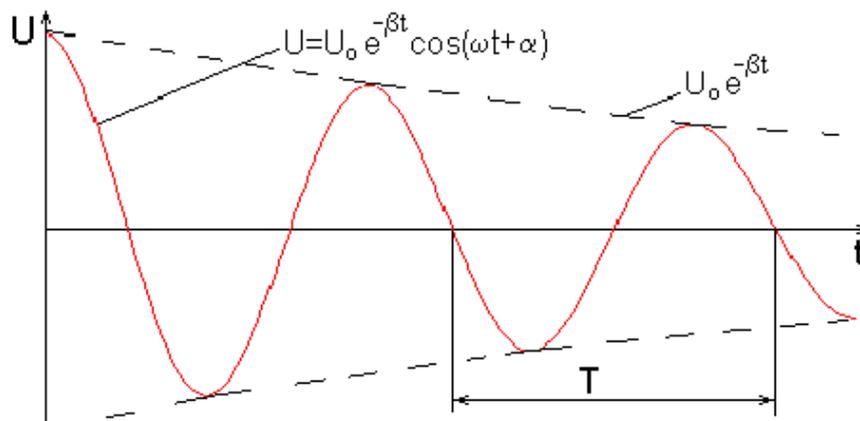


Рис. 14.2

Частота затухающих колебаний определяется из выражения:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (14.7)$$

Период колебаний определяется из выражения:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (14.8)$$

При отсутствии активного сопротивления цепи, колебания в контуре являются незатухающими, и период собственных колебаний в контуре определяется по формуле Томсона:

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (14.9)$$

Как видно из рис. 14.2, амплитуда затухающих колебаний убывает со временем по экспоненте:

$$U_m = U_0 e^{-\beta t}.$$

Промежуток времени, в течение которого амплитуда затухающих колебаний уменьшается в  $e$  раз, называется временем релаксации  $\tau$ .

Энергия электромагнитных колебаний в начальный момент времени равна энергии заряженного конденсатора. С течением времени энергия колебаний в контуре постоянно уменьшается, так как в процессе прохождения тока  $i$  в цепи, содержащей активное сопротивление  $R$ , выделяется джоулево тепло. Затухающие колебания принято характеризовать логарифмическим декрементом затухания:

$$\lambda = \ln \frac{a(t)}{a(t+T)} = \beta T,$$

где  $a(t)$  - амплитуда колеблющейся величины в момент времени  $t$ ;  $a(t+T)$  - амплитуда через один период.

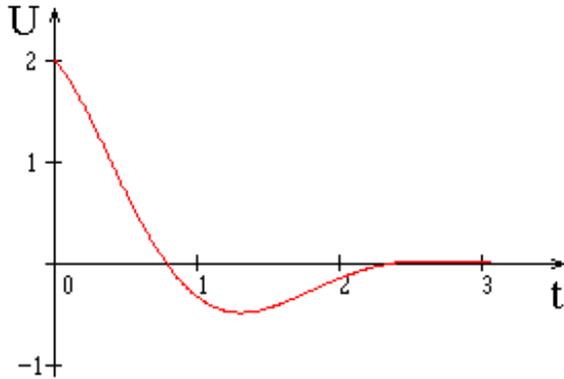


Рис. 14.3

Кроме логарифмического декремента, колебательный контур часто характеризуют его добротностью:

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} = \frac{\pi}{\beta T} = \frac{\omega}{2\beta}.$$

При слабом затухании добротность равна отношению энергии  $W$ , запасенной в системе в данный момент времени, к убыли этой энергии  $\Delta W$  за один период колебаний:

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W}.$$

При  $\beta^2 > \omega_0^2$  или  $R^2 / 4L^2 > 1/LC$  вместо затухающих колебаний происходит разрядка конденсатора на сопротивлении  $R$  (рис. 14.3) как определяющий процесс.

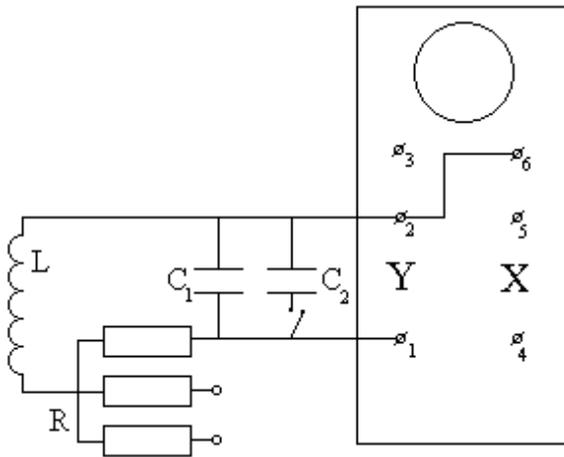


Рис. 14.4

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Свободные затухающие колебания происходят в контуре (рис. 14.4), который содержит катушку индуктивности  $L$  с высокой добротностью, конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ , магазин сопротивлений  $R$ . Их наблюдают на экране осциллографа, на вертикальный вход  $Y$  которого подается разность потенциалов с обкладок конденсатора.

Колебательный контур присоединяется к клеммам 1, 2 вертикального входа осциллографа и одновременно соединяется с клеммой 6 «внешняя синхронизация».

Картина этих колебаний изображена на рис. 14.5. С изменением ёмкости  $C$  и активного сопротивления  $R$  колебательного контура вид затухающих колебаний изменяется. В процессе измерений величина индуктивности ( $L$ ) контура остаётся постоянной. Измерив (см. рис. 14.5) четыре последовательные амплитуды  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , можно рассчитать логарифмический декремент затухания по формуле:

$$\lambda = \ln \frac{S_1 + S_2}{S_3 + S_4}. \quad (14.10)$$

Изменяя активное сопротивление ( $R$ ) цепи, можно получить зависимость  $\lambda = f(R)$  и изобразить её графически (рис. 14.6).

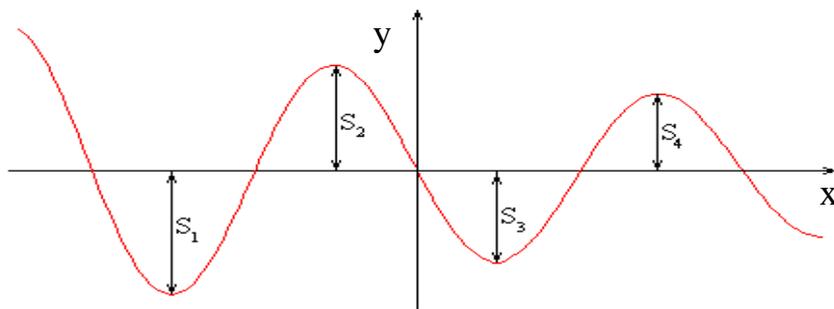


Рис. 14.5

Используя формулы коэффициента затухания  $\left(\beta = \frac{R}{2L}\right)$  и логарифмического декремента затухания ( $\lambda = \beta T$ ), можно получить для периода формулу:

$$T = \frac{2\lambda L}{R}. \quad (14.11)$$

С другой стороны, период затухающих колебаний определяется по формуле (14.8). Из выражений (14.8) и (14.11) можно получить формулу для расчета ёмкости колебательного контура:

$$C = \frac{4\lambda^2 L}{R^2(4\pi^2 + \lambda^2)}, \quad (14.12)$$

где  $R = R_L + R_m$  - полное сопротивление,  $R_L$  - индуктивное сопротивление катушки, определяемое точкой пересечения касательной к графику с осью абсцисс (рис. 14.6);  $R_m$  - активное сопротивление, установленное при помощи магазина сопротивлений.

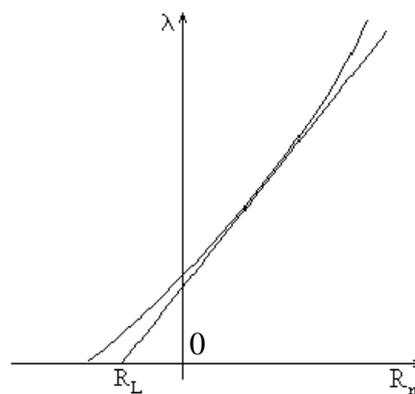


Рис. 14.6

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Задание:** *определить параметры колебательного контура.*

Все величины, полученные в результате измерений и вычислений, внесите в протокол измерений в соответствии с порядком выполнения работы и формой протокола.

1) На экране осциллографа получите картину затухающих колебаний без подключения магазина сопротивлений. В этом случае затухание колебаний обусловлено активным сопротивлением катушки индуктивности. Срисуйте на кальку график колебательного процесса в случае подключения одной емкости  $C_1$  и двух параллельно соединенных емкостей  $C_1 + C_2$ . Сравнивая графики, сделайте вывод о роли емкости в колебательном процессе.

2) При помощи магазина сопротивлений установите активное сопротивление 10 - 100 Ом с подключением одной емкости  $C_1$ . Для различных  $R_1, R_2, R_3$  найдите значения логарифмического декремента затухания  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  по формуле (14.10).

3) Постройте в протоколе график зависимости  $\lambda = f(R)$ . Проведите касательную к графику в месте наибольшей кривизны, продлите линии графика и касательной до пересечения с осью абсцисс, как показано на рис. 14.6. Отрезок  $R_L$

равен сопротивлению катушки колебательного контура. Из графика определите численное значение  $R_L$ .

4) Вычислите полное сопротивление цепи по формуле:  $R = R_L + R_m$  для трёх значений  $R_m$ .

5) Определите ёмкость конденсатора по формуле (14.12) для значений  $R_m$  и  $\lambda$  (вычисленных в п. 4).

6) Найдите среднее значение ёмкости по формуле:  $C_{cp} = \frac{\sum_{i=3}^3 C_i}{3}$ .

7) По известным значениям  $R, L$  и  $C$  (см. п. 4, п. 5) рассчитайте собственную частоту колебательного контура и частоту затухающих колебаний колебательного контура по формулам (14.4) и (14.7).

### ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ

Индуктивность катушки  $L = 0,01$  Гн

Результаты измерений

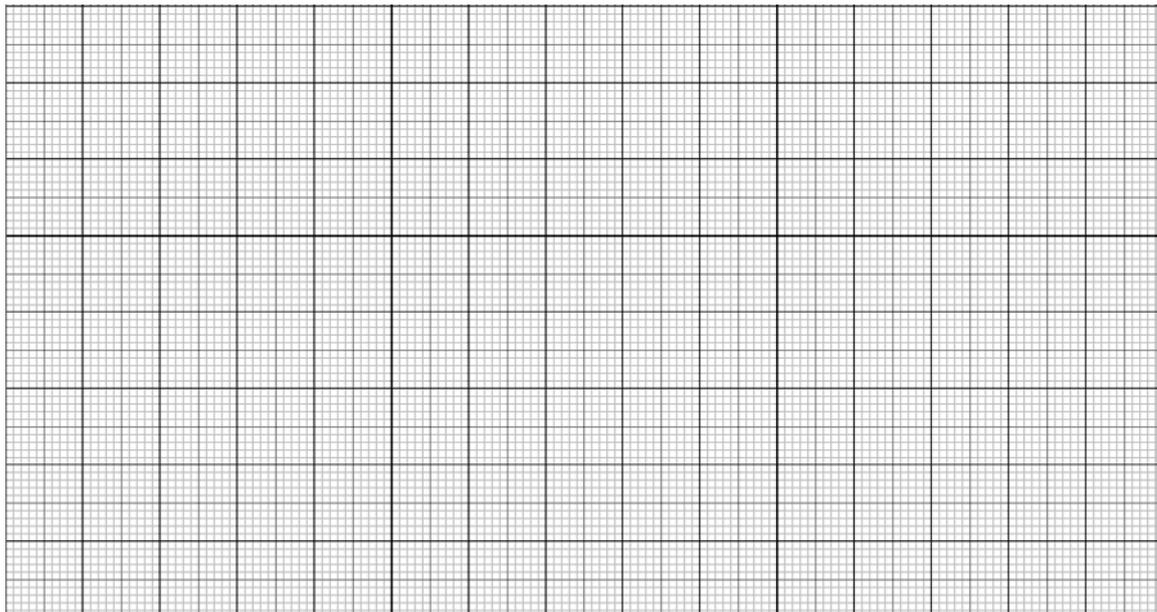
Номер измерения	$R_m$ , Ом	$S_1$ , дел.	$S_2$ , дел.	$S_3$ , дел.	$S_4$ , дел.	$\lambda$
1						
2						
3						
4						
5						

### Расчеты

Логарифмический декремент затухания:

$\lambda_1 =$  \_\_\_\_\_  $\lambda_2 =$  \_\_\_\_\_  $\lambda_3 =$  \_\_\_\_\_

График зависимости  $\lambda = f(R_m)$



Полное сопротивление цепи  $R$ :

$R_1 =$  \_\_\_\_\_  $R_2 =$  \_\_\_\_\_  $R_3 =$  \_\_\_\_\_

Ёмкость конденсатора:

$C_1 =$  \_\_\_\_\_  $C_2 =$  \_\_\_\_\_  $C_3 =$  \_\_\_\_\_

Среднее значение ёмкости:

$C_{cp} =$  \_\_\_\_\_

Собственная частота колебательного контура:

$\omega_0 =$  \_\_\_\_\_

Частота затухающих колебаний контура:

$\omega_1 =$  \_\_\_\_\_  $\omega_2 =$  \_\_\_\_\_  $\omega_3 =$  \_\_\_\_\_

### Выводы

---



---



---



---

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1) Что называется колебательным контуром?

---



---

2) Нарисуйте колебательный контур с затухающими электромагнитными колебаниями.

3) Как записать второе правило Кирхгофа для контура с затухающими электромагнитными колебаниями?

---



---

4) Какой вид имеют функции зависимости заряда и напряжения от времени при затухающих колебаниях в электромагнитном контуре?

---



---

5) От чего зависит период и собственная частота колебаний в контуре?

---



---

6) По какому закону изменяется амплитуда затухающих колебаний? Являются ли затухающие колебания периодическими?

---



---

7) Что такое коэффициент затухания? Декремент затухания? Логарифмический декремент затухания? В чем заключается физический смысл этих величин?

---



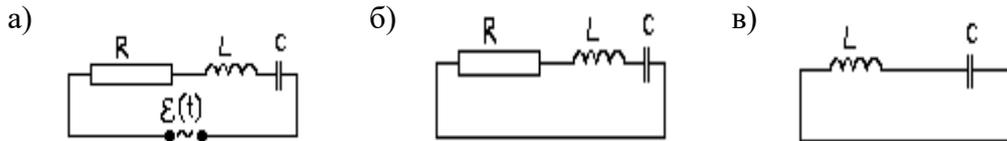
---

8) Что называется добротностью колебательного контура? Как добротность связана с потерями энергии в колебательном контуре?

Примечание: При затруднениях с ответами на вопросы используйте /1, § 3.2/

### ТЕСТ

1. В какой из электрических цепей происходят затухающие колебания?



2. Какое из утверждений верно?

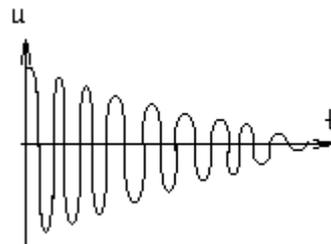
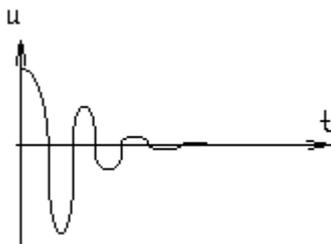
- а) Коэффициент затухания пропорционален активному сопротивлению контура.
- б) Коэффициент затухания обратно пропорционален активному сопротивлению контура.
- в) Коэффициент затухания не зависит от активного сопротивления контура.

3. Какое из утверждений справедливо для логарифмического декремента  $\lambda$ ? Для коэффициента затухания  $\beta$ ?

- а) Пропорционален числу колебаний, за которое амплитуда уменьшается в  $e$  раз;
- б) Пропорционален времени, за которое амплитуда уменьшается в  $e$  раз.
- в) обратно пропорционален числу колебаний, за которое амплитуда уменьшается в  $e$  раз.
- г) Обратно пропорционален времени, за которое амплитуда уменьшается в  $e$  раз.

4. На рисунке в одинаковом масштабе изображены графики зависимости  $U(t)$  затухающих колебаний для двух электромагнитных контуров. Сравните добротности этих контуров.

- а)  $Q_1 < Q_2$ ;
- б)  $Q_1 = Q_2$ ;
- в)  $Q_1 > Q_2$ .



5. Как изменится добротность контура  $Q$  с увеличением индуктивности  $L$ ?

- а) Добротность уменьшится.
- б) Добротность не изменится.
- с) Добротность увеличится.