

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования «Витебский государственный  
университет имени П.М. Машерова»  
Кафедра инженерной физики

# **ОБЩАЯ ФИЗИКА (ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ)**

*Методические указания  
к выполнению лабораторных работ*

*Витебск  
ВГУ имени П.М. Машерова  
2021*

УДК 537(075.8)  
ББК 22.33я73  
О-28

Печатается по решению научно-методического совета учреждения образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова». Протокол № 7 от 29.06.2021.

Составители: доцент кафедры инженерной физики ВГУ имени П.М. Машерова, кандидат физико-математических наук **И.Ф. Кашевич**; старший преподаватель кафедры инженерной физики ВГУ имени П.М. Машерова **Т.И. Сапелко**

**Р е ц е н з е н т :**  
заведующий кафедрой прикладного и системного программирования ВГУ имени П.М. Машерова, кандидат физико-математических наук,  
доцент *С.А. Ермоченко*

**О-28** **Общая физика (электричество и магнетизм) :** методические указания к выполнению лабораторных работ / сост.: И.Ф. Кашевич, Т.И. Сапелко. – Витебск : ВГУ имени П.М. Машерова, 2021. – 52 с.

Методические указания к выполнению лабораторных работ написаны в соответствии с учебной программой по общей физике для специальности 98 01 01-02 01 Компьютерная безопасность (радиофизические методы и программно-технические средства). Содержат теорию, методику выполнения, контрольные вопросы защиты лабораторных работ, справочный материал и список литературы.

Учебное издание предназначено для изучения теоретического материала и отработки практических навыков при изучении дисциплины «Общая физика (электричество и магнетизм)».

УДК 537(075.8)  
ББК 22.33я73

© ВГУ имени П.М. Машерова, 2021

## Содержание

<b>Введение в лабораторный практикум по общей физике .....</b>	<b>4</b>
<b>Методы вычисления погрешностей .....</b>	<b>6</b>
<b>Лабораторная работа № 1 Изучение электроизмерительных приборов. Проверка закона Ома для участка цепи .....</b>	<b>8</b>
<b>Лабораторная работа № 2 Исследование электростатического поля .....</b>	<b>16</b>
<b>Лабораторная работа № 3 Изучение катодного электронного осциллографа ...</b>	<b>19</b>
<b>Лабораторная работа № 4 Изучение зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры .....</b>	<b>24</b>
<b>Лабораторная работа № 5 Исследование полупроводникового диода. Выпрямители .....</b>	<b>30</b>
<b>Лабораторная работа № 6 Определение удельного заряда электрона .....</b>	<b>36</b>
<b>Лабораторная работа № 7 Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли. Изучение принципа суперпозиции магнитных полей .....</b>	<b>39</b>
<b>Лабораторная работа № 8 Определение коэффициента трансформации и коэффициента полезного действия трансформатора .....</b>	<b>44</b>
<b>Лабораторная работа № 9 Исследование явления гистерезиса ферромагнетиков осциллографическим методом .....</b>	<b>47</b>
<b>Литература .....</b>	<b>51</b>

## Введение в лабораторный практикум по общей физике

Одной из основных целей проведения лабораторного практикума по физике является формирование у Вас, глубокоуважаемый студент, ряда специальных профессиональных компетенций, а именно:

- способность применять на практике базовые знания и навыки;
- способность эксплуатировать современную физическую аппаратуру и оборудование;
- способность использовать специализированные знания в области физики для освоения физических дисциплин;
- владение культурой естественнонаучного мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию значимой информации;
- способность осуществлять научное исследование в образовательной и научной области под преподавателя.

Вам придется решать ряд задач, которые позволяют научиться:

- понимать актуальность изучаемого в данной работе физического явления;
- объяснять физическую суть изучаемого в данной работе явления;
- объяснять физические основы используемой в работе методики измерений, обосновывать последовательность действий при выполнении

Результат учебного эксперимента – умение студентов проводить эксперимент, т.е. усвоенные Вами знания об эксперименте как методе исследования, о деятельности по его осуществлению и умения, необходимые для его грамотного проведения.

Выполнение лабораторной работы есть определенная последовательность действий:

- подготовка к эксперименту;
- проведение измерений;
- обработка полученных результатов;
- формулировка выводов и написание отчета.

Для грамотного и быстрого их выполнения у каждого из Вас должна сложиться определенная система знаний и умений, которая обеспечит правильное и рациональное исполнение действия. Другими словами, всякому действию должны предшествовать обосновывающие его знания. В данном случае это не только описание конкретной лабораторной работы, но и определенные разделы курса, а также знания по физике и математике, полученные Вами, и умение пользоваться методическими указаниями по обработке экспериментальных результатов, назначению и устройству современных измерительных приборов.

Поэтому выполнение каждой лабораторной работы по физике необходимо начинать с изучения ее описания, и приведения знаний в систему, а именно:

ясно представить себе общую цель данной конкретной лабораторной работы и последовательность задач, решение которых приведет к достижению окончательной цели;

- знать, какое физическое явление изучается в данной работе и какими зависимостями связаны величины его описывающие;
- знать основные особенности объекта исследования (образец, поток частиц, излучение);
- изучить и уметь объяснить физические основы используемых в работе методов измерения искомых величин;
- уметь нарисовать принципиальную схему используемой установки и знать назначение каждого из ее узлов;
- знать последовательность выполнения этапов лабораторной работы;
- иметь общее представление об ожидаемых результатах проводимого эксперимента и суметь выбрать метод, нужный для их математической обработки.

Только такая основательная и систематическая подготовка к каждой работе позволит сознательно выполнять лабораторные работы по физике и целенаправленно вырабатывать у себя необходимые для Вашей будущей деятельности умения и навыки.

Проверять степень своей готовности к выполнению каждой конкретной работы нужно с помощью приводимых ниже обобщенных контрольных вопросов. Они являются общими для всех работ физического практикума. Поэтому полезно (для экономии времени) не только обязательно отвечать на них, готовясь к работе, но и запомнить их как общий принцип подхода к выполнению лабораторных работ вообще.

#### **Обобщенные контрольные вопросы**

1. В чём актуальность проведения данной работы?
2. Какова цель работы?
3. Какие существенные связи характерны для исследуемого физического явления?
4. Каковы возможные экспериментальные пути для проверки существенных причинно-следственных связей исследуемого физического явления?
5. Что представляет собой объект исследования в данной работе?
6. Какие физические явления положены в основу экспериментального метода определения искомой величины (величин)?
7. Какие допущения сделаны в теории метода?
8. Какая теоретическая зависимость может быть проверена в данном конкретном опыте?
9. Какие конкретные задачи в ходе проведения измерений придется решать для достижения цели?
10. Каково назначение отдельных узлов экспериментальной установки?
11. Какие требования техники безопасности необходимо соблюдать при выполнении данного учебного эксперимента?
12. Какие меры нужно принимать в ходе эксперимента для предупреждения и исключения вредных воздействий на окружающую среду?
13. Какие таблицы нужны в протоколе для записи и начальной обработки результатов измерений?
14. Какие зависимости должны быть построены по полученным данным?
15. Какое уравнение (или система) позволяет найти искомую величину или нужную зависимость на основании опытных данных?
16. Какие постоянные (табличные данные, параметры образца и установки) нужны для определения искомой величины по данным опыта?
17. Как будет определена погрешность прямых измерений?
18. Как придется оценивать погрешность конечного результата?
19. Как можно проверить достоверность полученных экспериментальных результатов?
20. Совпадает ли результат эксперимента с предсказанием теории?
21. Чем вызвано расхождение результатов эксперимента и теории?
22. Можно ли сопоставить результаты эксперимента с литературными данными?
23. Достигнута ли цель работы?

На вопросы 1–9 Вы должны ответить при подготовке к работе и отразить эти ответы в конспекте. На вопросы 10–12 – при непосредственном знакомстве с установкой и в ходе беседы при допуске к работе. На последнюю группу вопросов 13–23 – в ходе опыта, обработки результатов, их систематизации и описании в отчете.

Проведя эксперимент, необходимо вычислять не только значение физической величины, но и погрешность ее измерения, используя особые приемы и методы, разработанные математиками, т.е. выполнять математическую обработку результатов измерений. **Успешной работы!**

## Методы вычисления погрешностей

Никакое измерение не дает истинного значения определяемой величины. Всякое измерение сопровождается той или иной ошибкой, или погрешностью. Поэтому недостаточно знать только результат измерения, необходимо еще определить величину допущенной погрешности. Погрешности делятся на *систематические* и *случайные*.

*Систематические* ошибки возникают из-за неисправности или несовершенства измерительных приборов. Например, из-за смещения нуля измерительных приборов (амперметра, вольтметра и др.) все отсчеты будут искажены. Такие недостатки приборов изменяют результат измерений всегда в одну сторону, или увеличивая, или уменьшая его.

Систематические ошибки могут быть допущены также в процессе работы, если теория опыта недостаточно разработана и не учтены все причины, влияющие на точность измерений. Например, при определении сопротивления проводников, растворов не учтена поправка на температуру и т.д.

Систематические ошибки могут быть значительно уменьшены при более тщательном изучении приборов и устранения их недостатков, при более подробной разработке теории опыта и введении поправочных коэффициентов в результат измерений. Характерно, что увеличение числа измерений не уменьшит систематических ошибок.

*Случайные* ошибки вызываются неточностью отсчета, которую невольно допускает каждый экспериментатор. Например, недостаток органов зрения, органов слуха, реакции включения и выключения приборов отсчета времени и т.д.

В отличие от систематических случайные ошибки могут изменять результат измерений в обе стороны, т.е. увеличивать или уменьшать его. Поэтому для уменьшения влияния случайных ошибок необходимо всякое измерение проводить несколько раз ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ).

Случайные ошибки подчиняются законам вероятности. Это значит, если при каком-либо измерении получится результат больше истинного, то при следующих измерениях столь же вероятно может получиться результат меньше истинного. Очевидно, многократные повторения одного и того же измерения уменьшают влияние случайных ошибок, так как нет основания считать отклонение от истинного значения в одну сторону более вероятным, чем в другую, и среднее арифметическое из большого числа измерений будет ближе к истинному значению, чем отдельные измерения.

### Математический аппарат вычисления случайных ошибок прямых измерений

1. При измерении какой-либо величины получают ряд значений:

$$(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n). \quad (1)$$

2. Вычисляют среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\langle x \rangle = x_{\text{cp}} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}. \quad (2)$$

3. Вычисляют отклонения отдельного измерения от среднего арифметического значения, т.е. абсолютную ошибку:

$$\Delta x_1 = |x_{\text{cp}} - x_1|; \Delta x_2 = |x_{\text{cp}} - x_2|; \Delta x_3 = |x_{\text{cp}} - x_3|; \dots; \Delta x_n = |x_{\text{cp}} - x_n|. \quad (3)$$

4. Вычисляют среднее арифметическое численных значений отдельных абсолютных ошибок, т.е. **среднюю абсолютную ошибку** всех измерений записывают как:

$$\langle \Delta x \rangle = \Delta x_{\text{cp}} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \dots + \Delta x_n}{n}. \quad (4)$$

5. Тогда результат измерения:

$$x = \langle x \rangle \pm \langle \Delta x \rangle \quad (5)$$

5. Отношение средней абсолютной ошибки всех измерений  $\langle \Delta x \rangle$  к среднему арифметическому значению  $\langle x \rangle$  измеряемых величин называется **средней относительной ошибкой**:

$$\varepsilon = \delta = \frac{\langle \Delta x \rangle}{\langle x \rangle} 100\% \quad (6)$$

**Пример:**

1. Пусть при  $n=3$  измерений сопротивления проволоки с помощью прибора ЕС-11 получены следующие числовые значения ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ):

$$R_1 = 5,0 \text{ Ом}; \quad R_2 = 4,9 \text{ Ом}; \quad R_3 = 5,1 \text{ Ом}.$$

2. Найдем среднее арифметическое значение величины по формуле (2):

$$\langle R \rangle = \frac{5,0 + 4,9 + 5,1}{3} = 5,0 \text{ (Ом)}$$

3. Вычислим абсолютные ошибки измерения по формуле (3):

$$\Delta R_1 = |5,0 - 5,0| = 0 \text{ (Ом)}; \quad \Delta R_2 = |5,0 - 4,9| = 0,1 \text{ (Ом)}; \quad \Delta R_3 = |5,0 - 5,1| = 0,1 \text{ (Ом)}$$

4. Вычислим среднюю абсолютную ошибку по формуле (4):

$$\langle \Delta R \rangle = \frac{0 + 0,1 + 0,1}{3} = 0,07 \text{ (Ом)}$$

5. Запишем результат измерения по формуле (5):

$$R = (5,0 \pm 0,07) \text{ Ом}.$$

6. Определим относительную ошибку измерения по формуле (6):

$$\varepsilon = \frac{\langle \Delta R \rangle}{\langle R \rangle} \cdot 100\% = \frac{0,07}{5,0} \cdot 100\% = 1,4\%$$

# Лабораторная работа № 1

## Изучение электроизмерительных приборов.

### Проверка закона Ома для участка цепи

**Цель работы:** изучить основные характеристики электрического тока и законы Ома, классификацию электроизмерительных приборов, их устройства, принцип работы, технические характеристики, правила отсчета и обработки результатов измерений.

**Приборы и принадлежности:** амперметры, вольтметры, многодиапазонные и комбинированные приборы разных систем и классов точности, источник тока, магазин сопротивлений.

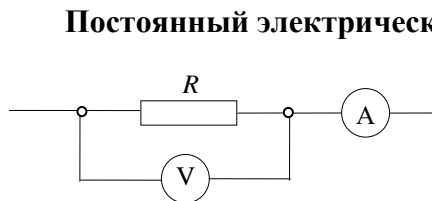


Рисунок 1.1

#### Теория работы

**Постоянный электрический ток** – это упорядоченное движение заряженных частиц.

В металлах – электронов, в электролитах – ионов, в газах – электронов и ионов. Основными характеристиками постоянного тока являются:

**сила тока** – скалярная физическая величина равная заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.1)$$

Размерность силы тока:  $[I] = \frac{[q]}{[t]} = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А}$  (Ампер).

**Плотность тока  $j$**  - векторная физическая величина, модуль которой определяется отношением силы тока к площади поперечного сечения проводника,

$$j = \frac{I}{S} \quad (1.2)$$

Размерность плотности тока:  $[j] = \frac{[I]}{[S]} = \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$ .

Когда мы помещаем проводник в постоянное электрическое поле с разностью потенциалов  $\Delta\phi$ , то со стороны электрического поля на заряды действует сила Кулона, которая совершает работу по перемещению зарядов, и в проводнике возникает постоянный электрический ток. Т.е., постоянный ток – это электрический ток одного направления. Разность потенциалов в теории электрического тока называется по-другому – электрическое напряжение (или просто – напряжение) и обозначается  $[\Delta\phi] = [U]$ . Размерность напряжения такая же, как и размерность разности потенциалов:  $[\Delta\phi] = [U] = \text{В}$  (Вольт)

Пусть электрический проводник – это металл. По своей химической структуре металл имеет металлическую решетку, в узлах которой находятся атомные остатки – положительные ионы, а электроны внешних орбиталей становятся коллективизированными. В металле, где атомные остатки связаны сильной металлической связью, атомные остатки не могут совершать поступательное хаотическое движение, но они находятся в состоянии непрерывного теплового колебательного движения. Если к металлу приложить внешнее электрическое поле, то, как было отмечено выше, электрическое поле начнет перемещать свободные коллективизированные электроны, которые будут двигаться по металлической решетке, испытывая постоянные соударения с атомными остатками, которые совершают тепловые колебания. Т.е., сам проводник оказывает сопротивление проходящему через него электрическому току.

Физическая скалярная величина, характеризующая свойство проводника препятствовать прохождению через него электрического тока называется **электрическим**



**сопротивлением проводника** (или просто – **сопротивлением**) –  $R$ . Сила тока в проводнике увеличивается с увеличением внешнего электрического поля, т.е. напряжения, и уменьшается при увеличении сопротивления самого проводника. Эти два фактора, от которых зависит сила тока в проводнике, объединяются **законом Ома для участка цепи** (для участка проводника) (Рис.1.1):

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.3)$$

*сила тока на однородном участке цепи прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.*

Из закона Ома определяется размерность сопротивления:

$$[R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}$$

*Величина, обратная сопротивлению проводника, называется **электропроводностью проводника*** (или просто **электропроводностью**):

$$K = \frac{1}{R} \quad (1.4)$$

Размерность электропроводности:

$$[K] = \frac{1}{[R]} = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{См (Сименс)}$$

Если участок проводника сопротивлением  $R$  подключен к источнику постоянного тока  $\mathcal{E}$  (рис.1.2), имеющему внутреннее сопротивление  $r$ , то в цепи возникнет постоянный ток, за направление которого принимается направление от положительного полюса источника тока к его отрицательному полюсу. Величина силы тока определяется **законом Ома для полной цепи, содержащей источник тока**:

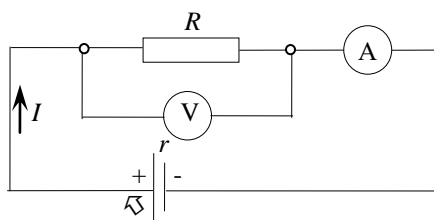


Рисунок 1.2

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \quad (1.5)$$

*сила тока в цепи содержащей источник тока прямо пропорциональна электродвижущей силе (ЭДС –  $\mathcal{E}$ ) источника тока и обратно пропорциональна сумме внешнего сопротивления  $R$  (участка цепи) и внутреннего сопротивления  $r$  источника тока.*

В данной работе необходимо изучить основные характеристики постоянного электрического тока, классификацию электроизмерительных приборов для их определения, научиться их определять и использовать для нахождения сопротивления.

## 1. Классификация электроизмерительных приборов

Существует следующая классификация измерительных приборов: метрологическая классификация, классификация по роду измеряемой величины, по принципу действия в зависимости от системы, классификация приборов и вспомогательных частей по степени точности, по устойчивости к механическим воздействиям, по степени защищенности корпусов, по габаритным размерам корпусов, по способу защиты от внешних магнитных или электростатических полей, по характеру применения, по способу представления отсчета.

**По роду измеряемой величины** приборы делятся на амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, счетчики электрической энергии, частотомеры, кулонометры, фазометры, генриметры, фарадометры, веберометры, гальванометры и др.

**По принципу действия** – на системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, индукционную, электростатическую, выпрямительную, термоэлектрическую, вибрационную, тепловую и электронную.

**По степени точности** – на следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4.

**Класс точности** характеризуется относительной приведенной погрешностью, равной отношению абсолютной погрешности прибора к максимальному значению шкалы прибора.

Таким образом, класс точности прибора:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_{\max}} 100\% . \quad (1.6)$$

Отсюда вытекает, что абсолютная погрешность измерений:

$$\Delta A = \frac{\varepsilon A_{\max}}{100\%} . \quad (1.7)$$

Однако в теории погрешностей доказывается более строгая формула абсолютной погрешности:

$$\Delta A = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon A_{\max}}{100\%} . \quad (1.8)$$

Относительная погрешность измерений:

$$\beta = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon A_{\max}}{A_{\text{изм}}} 100\% . \quad (1.9)$$

С учетом (1.8) выражение (1.9) примет вид:

$$\beta = \frac{\Delta A}{A_{\text{изм}}} 100\% , \quad (1.10)$$

где  $A_{\text{изм}}$  – это измеренное с помощью прибора значение физической величины (силы тока, напряжения и др.), т.е., это конкретные показания приборов.

Выражения (1.8), (1.10) используются для вычисления абсолютной и относительной погрешностей измерений по классу точности прибора  $\varepsilon$ , который указан на шкале прибора. Абсолютная погрешность для выбранной шкалы прибора величина постоянная, а относительная погрешность измерений – величина переменная и всегда больше класса точности прибора.

Соответствующую классификацию по степени точности имеют и вспомогательные части прибора: шунты, дополнительные сопротивления и делители напряжения, которые прилагаются к некоторым приборам.

## 2. Физические основы работы отдельных систем измерительных приборов

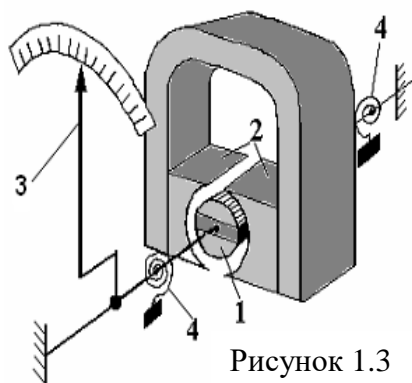


Рисунок 1.3

### Приборы магнитоэлектрической системы.

Принцип работы этой системы основан на взаимодействии магнитного поля проводника с током с магнитным полем постоянного магнита (Рис.1.3). Подвижными могут быть как проводник с током (прибор с подвижной рамкой), так и постоянный магнит (прибор с подвижным магнитом). При взаимодействии магнитного поля проводника с током (1) и магнитного поля постоянного магнита прибора (2) рамка прибора, к которой прикреплена стрелка прибора (3), поворачивается на определенный угол. Элементы (4) – это противодействующие, возвращающие спиральные пружины.

Таким образом, угол поворота рамки приборов магнитоэлектрической системы пропорционален величине тока в ней, поэтому шкала таких приборов равномерная.

Приборы этой системы используются только в цепях постоянного тока. Для использования в цепях переменного тока они обеспечиваются дополнительными выпрямителями (обычно полупроводниковыми).

**Приборы электромагнитной системы.** Измерительный механизм этой системы приборов складывается из неподвижной катушки, легкого ферромагнитного сердечника, закрепленного на оси вместе со стрелкой. Принцип действия приборов такой системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки с магнитным полем индукционных токов сердечника. Шкала таких приборов квадратичная: сильно сжатая в начале и растянутая в конце. Независимо от направления тока в катушке прибора сердечник всегда втягивается внутрь неё. Поэтому приборы этой системы используются для измерения как в цепях постоянного, так и переменного тока.

**Приборы электродинамической системы.** Измерительный механизм этой системы приборов состоит из подвижной и неподвижной катушки, на оси которой закреплена стрелка прибора. Принцип работы приборов этой системы основан на взаимодействии магнитных полей токов подвижной и неподвижной катушек. Шкала таких приборов квадратичная. Преимуществами этой системы приборов являются: возможность их использования в цепях как постоянного, так и переменного тока, высокая точность, недостатками - неравномерность шкалы, чувствительность к перегрузкам и к внешним магнитным полям.

### 3. Обозначения технических данных приборов

В целях удобства пользования приборами обычно на корпусе или на шкале наносятся в виде условных обозначений следующие их технические характеристики, условия эксплуатации и конструктивные данные:

#### 1) Название прибора.

Обозначение	Название. Предназначен для измерения	Разновидности		
		Обозначение	Название	Диапазон значений
<i>A</i>	Амперметр. Для измерения силы тока	кА mA μA или мкА	килоамперметр миллиамперметр микроамперметр	10 <sup>3</sup> А 10 <sup>-3</sup> А 10 <sup>-6</sup> А
<i>V</i>	Вольтметр. Для измерения напряжения	кV mV	киловольтметр милливольтметр	10 <sup>3</sup> В 10 <sup>-3</sup> В
<i>W</i>	Ваттметр. Для измерения мощности	MW кW	мегаваттметр киловаттметр	10 <sup>6</sup> Вт 10 <sup>3</sup> Вт
<i>Ω</i>	Омметр. Для измерения сопротивления	MΩ	мегаомметр	10 <sup>6</sup> Ом
<i>Wb</i>	Веберметр Для измерения индукции магнитного поля	mWb	милливебметр	10 <sup>-3</sup> Вб

Тип системы электроизмерительного прибора			Значок системы на шкале прибора
Магнито-электрическая система прибора	С механической противодействующей силой		
	Без механической противодействующей силы		
	Термоэлектрические приборы	С контактным преобразователем	
		С изолированным преобразователем	
	Электронно-ламповые приборы		
	Фотоэлектрические приборы		
Электро-магнитная система прибора	С механической противодействующей силой		
	Без механической противодействующей силы		
Электродинамическая система прибора	Без стали	Без механической противодействующей силы	
		С механической противодействующей силой	
	Ферродинамическая система	С механической противодействующей силой	
		Без механической противодействующей силы	
	Индукционная система	С механической противодействующей силой	
		Без механической противодействующей силы	
Электростатическая система прибора			
Тепловая система прибора			
Вибрационная (язычковая) система прибора			



3) **Класс точности:** 0,05; 1,0; 1,5; 2,0 или другие.

4) **Рабочее положение:**

а) горизонтальное: или

б) вертикальное:  $\perp$  или  $\uparrow$ .

в) наклоненный под углом:  $\angle 60^\circ$ .

5) **Измерительная цепь изолирована** от корпуса и изоляция испытана под напряжением (в киловольтах):  или .



б) **Условия работы** при соответствующих температурах и влажности обозначаются буквами:


**А** – нормальная работа прибора при температуре окружающего воздуха  $+20^\circ - +35^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха 80%.

**Б** – соответственно, при температуре  $-20^\circ - +50^\circ\text{C}$  и влажности 80%.

**В** – соответственно, при температуре  $-40^\circ - +60^\circ\text{C}$  и влажности 80%.

7) **Предназначение прибора** для цепи только постоянного тока (-); только переменного тока ( $\sim$ ); или для цепи как постоянного, так и переменного тока ( $\sim$ ).

8) **Наличие защиты**:  - от внешнего магнитного поля;  – от внешнего электростатического поля; АСТА – астатическая защита.

9)  – **знак Внимание**. Смотри дополнительные указания в паспорте и инструкции по эксплуатации прибора.

Кроме указанных обозначений, на шкале приборов имеются обозначения границ измерения приборов, счета фаз, границ допустимой частоты переменного тока, номер стандарта для данной группы приборов и другие обозначения. Иногда вместо внутреннего сопротивления для амперметров указывается падение напряжения, а для вольтметров – величина потребляемого тока, которые соответствуют максимальному отклонению стрелки. Величину внутреннего сопротивления в этом случае можно подсчитать по закону Ома, используют границу измерения прибора.

Одной из главных технических характеристик прибора является его **чувствительность** – величина, характеризующая число делений шкалы прибора, которое приходится на единицу измеряемой величины при данном пределе измерения:

$$S = \frac{N_{\max}}{A_{\max}}, \quad \dots \quad (1.11)$$

где  $N_{\max}$  – максимальное количество делений шкалы прибора;  $A_{\max}$  – предел измерения, который указан на приборе.

Величина, обратная чувствительности, называется ценой деления шкалы прибора:

$$C = \frac{1}{S} = \frac{A_{\max}}{N_{\max}}. \quad (1.12)$$

**Цена деления** характеризует значение измеряемой величины, которое приходится на одно деление шкалы (для данного предела измерения).

Зная цену деления и количество делений шкалы  $N$ , на которое указывает стрелка прибора можно определить значение величины, измеренной прибором:

$$A = C \cdot N. \quad (1.13)$$

### Порядок выполнения работы

#### Задание № 1. Проведение классификации электроизмерительных приборов

1. Прочитать символы на шкалах приборов. Выяснить технические возможности приборов.

2. Выполнить классификацию приборов:

2.1. по роду измеряемой величины;

- 2.2. по роду тока;
- 2.3. по принципу действия;
- 2.4. по классу точности
3. По формулам (1.11) и (1.12) вычислить чувствительность и цену деления приборов для каждого предела измерения.
4. Результаты классификации и расчетов занести в таблицу 1.

Таблица 1. Классификация электроизмерительных приборов

Усл. обозн	Название прибора, расшифровка условных обозначений	Пределы измерений	Цена деления $C$	Чувствительность $S$
Прибор: _____				
Прибор: _____				

### Задание № 2. Вычисление показаний приборов и оценка погрешностей прямых измерений

1. Собрать электрическую схему по рис.1.2.
2. Записать в таблицу 2 значение используемого предела измерения, установленного на амперметре и вольтметре при снятии показаний.
3. Занести в таблицу 2 значения цены деления  $C$  для данного предела измерения, рассчитанного в таблице 1.
4. Установить на магазине сопротивлений  $R_m$  определенное значение сопротивления. Занести значение сопротивления в таблицу 3.
5. Записать в таблицу 2 количество делений шкалы  $N$ , на которое указывает стрелка амперметра и вольтметра.
6. Вычислить по формуле (1.13) показания приборов  $A_{изм}$ : на амперметре – силы тока; на вольтметре – напряжения.
7. Сделать измерения силы тока и напряжения при трех различных значениях сопротивления на магазине сопротивлений.
8. Оценить погрешность прямых электрических измерений исходя из класса приборов:
  - 8.1. абсолютную погрешность по формуле (1.8);
  - 8.2. относительную погрешность по формуле (1.10).
9. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

Таблица 2. Вычисление показаний приборов. Оценка погрешностей измерений

Измеряемая величина	Используемая граница	Цена деления $C$	Число делений шкалы $N$	Показания прибора $A_{\text{изм}}$	Абсолютная погрешность $\Delta A$	Относительная погрешность $\beta, \%$
Прибор: _____						
$U$						
Прибор: _____						
$I$						

### Задание № 3. Проверка закона Ома для участка цепи

1. Занести в таблицу 3 значения показаний приборов из таблицы 2.
2. Вычислить значения сопротивления и электропроводности по формулам (1.3) и (1.4) соответственно. Результаты вычислений занести в таблицу 3.

Таблица 3. Проверка закона Ома для участка цепи.

№ опыта	$R_m$ , Ом	$I$ , А	$U$ , В	$R$ , Ом	$K$ , См

3. Сравнить полученные в результате вычислений значения сопротивления со значениями сопротивления магазина сопротивлений. Сделать вывод о закономерности применения закона Ома для участка цепи.

4. Сравните таблицы 2 и 3 и сделайте вывод о точности вычисления сопротивления. При каких границах измерений точность наибольшая? Какая при этом чувствительность приборов?

### Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

1. Дайте определение электрического тока. Запишите формулы и дайте определения силы, плотности тока, их размерностей.
2. Нарисуйте схемы, запишите и сформулируйте законы Ома для участка цепи и для полной цепи, содержащей источник тока.
3. Объясните причины возникновения электрического сопротивления в металлических проводниках. На основании закона Ома для участка цепи укажите размерность сопротивления. Что такое электропроводность? Её размерность?
4. Запишите и объясните формулы для нахождения абсолютной и относительной погрешности приборных измерений по классу точности приборов.
5. Дайте классификацию электроизмерительных приборов по принципу действия, по роду тока.
6. Запишите формулы и объясните, что такое и как определить чувствительность, цену деления прибора. Объясните, как, зная цену деления прибора, узнать показания прибора.
7. При каких значениях цены деления и чувствительности точность измерения будет наибольшей?

## Лабораторная работа № 2 Исследование электростатического поля

**Цель работы:** познакомиться с электростатическими полями различной конфигурации, выполнить экспериментальное исследование электростатического поля в простейших случаях и описать его при помощи силовых линий и поверхностей равного потенциала.

**Оборудование:** ванна для исследования электростатического поля с пантографом, набор электродов, вольтметр, гальванометр, источник питания.

### Теория работы и описание установки

Ортогональность силовых линий и поверхностей равного потенциала существенно облегчает как экспериментальное, так и теоретическое исследование электростатического поля. Если найдены значения вектора напряженности поля, облегчается задача нахождения поверхностей равного потенциала. Справедливо и обратное: найденное положение поверхностей равного потенциала позволяет построить силовые линии поля. Последняя возможность и реализуется в настоящей лабораторной работе.

Теоретически, как правило, легче вести расчет потенциалов, чем напряжённостей поля, так как потенциалы величины скалярные, а напряженности – векторные. Экспериментально измерения потенциалов также оказываются проще, чем измерения напряжённостей поля, так как большинство приборов, пригодных для изучения полей, измеряет разность потенциалов, а не напряженности поля. Поэтому и в настоящей работе экспериментально изучается распределение потенциалов поля, а не напряжённостей этого поля. Силовые линии изучаемых полей строятся уже потом как ортогональные к экспериментально найденным поверхностям равного потенциала.

В основу изучения распределения потенциалов в электростатическом поле положен так называемый *метод зондов*. Его сущность заключается в следующем: в исследуемую точку поля вводится специальный дополнительный электрод – зонд, по возможности устроенный так, чтобы он минимально нарушал своим присутствием исследуемое поле. Этот зонд соединяется проводником с прибором, измеряющим приобретенный зондом в поле потенциал относительно потенциала какой-нибудь точки поля, принятого за нулевой. Сложности работы с зондами и вообще трудности электростатических измерений привели к разработке особого метода изучения электростатических полей путем искусственного воспроизведения их структуры в проводящих средах, по которым пропускается слабый постоянный ток ( $\sim 10^{-7}$ – $10^{-8}$  А).

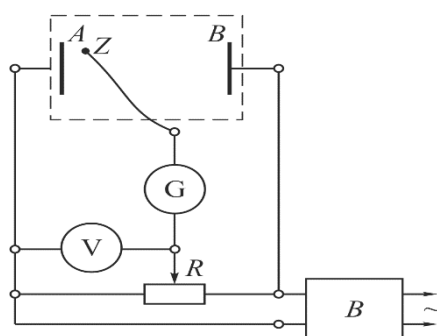


Рисунок 2.1

Таким образом, можно заменить изучение электростатического поля между системой заряженных проводников изучением электростатического поля постоянного тока между той же системой проводников, если потенциалы проводников поддерживаются постоянными и соотношение проводимостей среды и проводника допускает предположение об эквипотенциальности последних.

Надо иметь в виду, что электрическая цепь зонда должна обладать большим сопротивлением по сравнению с сопротивлением проводящих слоев вещества между точкой, в которую помещен зонд, и ближайшим электродом. В противном случае включение зонда исказит распределение потенциалов в исследуемом поле.



*Описание экспериментальной установки.* В ванну, сделанную из материала с хорошими электроизолирующими свойствами (например, из оргстекла), помещают металлические электроды  $A$  и  $B$ , поле между которыми хотят изучить (рис.2.1): контуры ванны показаны пунктирными линиями. Ванна заполняется жидким электролитом, проводимость которого мала по сравнению с проводимостью металла (например, водой). Электроды опираются на дно ванны и возвышаются над поверхностью налитого в ванну электролита.

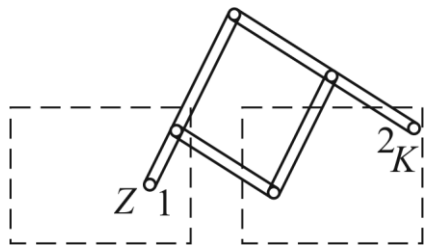


Рисунок 2.2

Напряжение на электроды подается с потенциометра  $П$ , включенного на выходе выпрямителя  $B$  (см.рис.2.1). В измерительную часть, схемы входят зонд  $Z$ , нулевой гальванометр  $G$  и вольтметр  $V$ . Нулевым гальванометром называется стрелочный гальванометр, нулевое деление шкалы которого расположено посередине шкалы, и стрелка прибора может отклоняться от него симметрично в обе стороны.

Перемещая движок на делителе напряжения  $R$ , этому движку можно придавать различные значения потенциала относительно электродов, погруженных в ванну. Наличие или отсутствие тока в цепи гальванометра зависит при этих условиях от того, в какой точке поля находится зонд. 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 в цепи зонда ток будет равен нулю (при данном положении движка на делителе), образует эквипотенциальную поверхность в исследуемом поле. Для измерения потенциала этой поверхности (относительно электродов, помещенных в ванну) служит вольтметр, включенный между движком и одним из электродов.

Процесс изучения исследуемого поля сводится, таким образом, к следующему: перемещая по этапам движок на делителе напряжения, придают движку различные значения потенциала. Для каждого установленного на движке значения потенциала находят путем перемещения зонда в ванне соответствующую эквипотенциальную поверхность исследуемого поля.

Для фиксации положения и формы эквипотенциальных поверхностей служит пантограф (см.рис.2.2). Необходимо в ходе опытов обеспечивать безопасные для гальванометра условия работы. Именно, устанавливая то или иное положение движка на делителе напряжения, надо перемещать и зонд в соответствующем направлении. При необдуманных действиях между зондом и движком реостата легко создать разность потенциалов, равную полной разности потенциалов между электродами, а это приведет к сгоранию обмотки рамки гальванометра.

### Порядок выполнения работы

#### 1. Поле плоских электродов.

1.1. Установить в ванне систему двух плоских электродов. Поместить зонд вблизи одного из электродов, движок на делителе напряжения установить вблизи того конца реостата делителя, к которому присоединен этот электрод. Включить питание установки.

1.2. Исследовать зондом и зарисовать пантографом эквипотенциальные поверхности поля между электродами, надписывая соответствующие показания вольтметра около каждой линии на бумаге, обозначающей эквипотенциальную поверхность.

1.3. При всех измерениях особенно подробно обследовать зондом все участки сильных неоднородностей в поле, где эквипотенциальные поверхности, построенные через

равные интервалы напряжения, располагаются особенно густо.

1.4. По полученной системе эквипотенциальных поверхностей построить картину силовых линий.

2. *Поле плоских электродов при наличии между ними металлического цилиндра.*

2.1. Положить в середину ванны, в только что исследованное поле, металлический цилиндр и исследовать поле в новых условиях.

2.2. Получить картину эквипотенциальных поверхностей и силовых линий.

3. *Поле цилиндрических электродов.*

3.1. Заменить плоские электроды цилиндрическими, удалить металлический цилиндр из середины ванны.

3.2. Исследовать поле цилиндрических электродов. Представить картину эквипотенциальных поверхностей и силовых линий.

4. *Поле коаксиальных электродов.*

4.1. Поместить в ванну систему двух коаксиальных электродов и исследовать поле в пространстве между ними. Получить картину эквипотенциальных поверхностей и силовых линий.

4.2. Построить графики распределения потенциала в поле между электродами в зависимости от расстояния от оси внутреннего электрода.

### **Контрольные вопросы**

1. Какими параметрами характеризуется электростатическое поле? Какая связь существует между ними в общем случае и в случае однородного поля? Какой из этих параметров предпочтительней измерять экспериментально и рассчитывать теоретически и почему?

2. Какие экспериментальные методы существуют для изучения электростатического поля? В чем состоят трудности электростатических измерений?

3. Как создается модель электростатического поля в данной задаче? Какие экспериментальные преимущества имеет эта модель? Как на практике применяется метод подобия потенциальных полей?

4. Как влияет на электростатическое поле внесение в него металлических и диэлектрических тел?

5. Построить график  $U(R)$  для коаксиальных цилиндрических электродов.

6. Оценить точность выполнения измерений.

## Лабораторная работа № 3

### Изучение катодного электронного осциллографа

**Цель работы:** Изучить принцип действия электронного осциллографа, освоить методику работы с осциллографом, измерить параметры электрических сигналов.

**Оборудование:** осциллограф С1-93, два генератора напряжения (диапазон частот 20 Гц – 10 МГц), комбинированный прибор ТЛ-4, электронный вольтметр В7-37.

#### Краткие теоретические сведения

Электронный осциллограф (ЭО) является основным и широко распространенным прибором для наблюдения формы электрических сигналов в диапазоне частот от постоянного тока до десятков ГГц.

По назначению и принципу действия осциллографы можно разделить на универсальные, стробоскопические, скоростные, запоминающие и специальные. Все они могут быть одно-, двух- и многолучевыми, а также одно- и двухканальными. Упрощенная структурная схема ЭО представлена на рисунке 3.1.

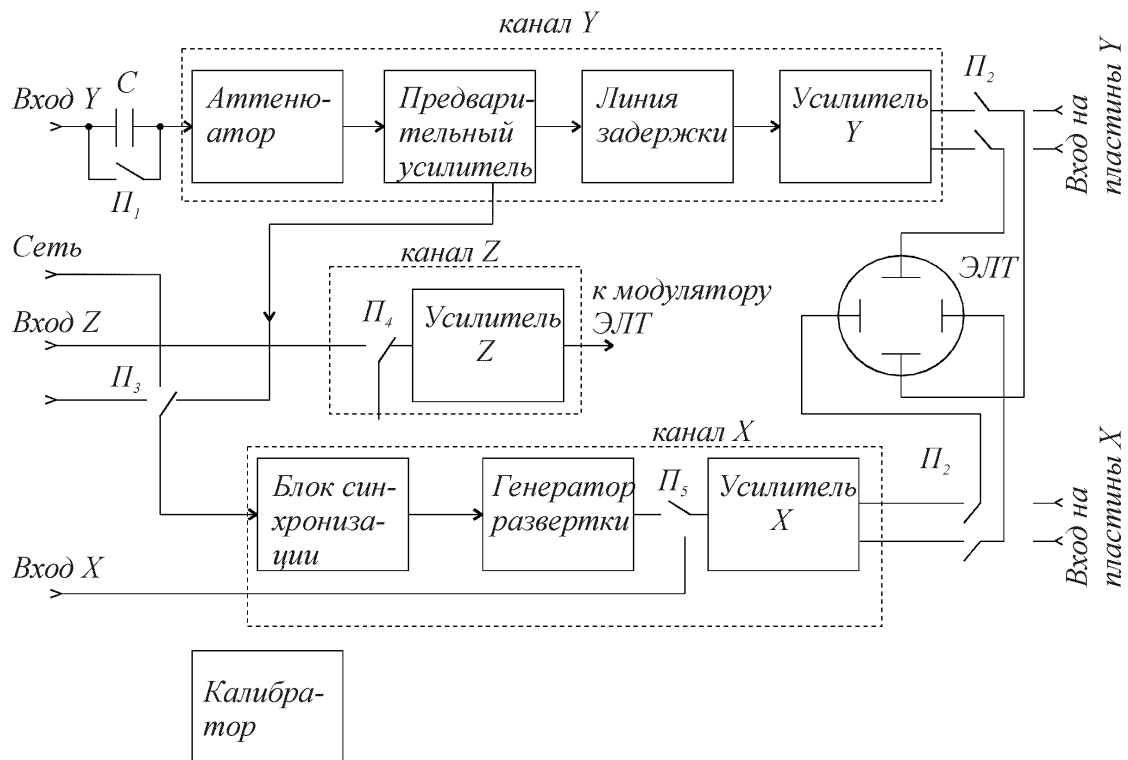


Рисунок 3.1

Любой осциллограф состоит из электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), каналов управления лучом (каналы X и Y), измерительных устройств и блока питания.

Основным элементом осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), как правило, с электростатическим управлением. Однолучевая ЭЛТ представляет собой стеклянный баллон с высоким вакуумом, внутри которого расположены источник электронов, система формирования электронного луча и две пары взаимно перпендикулярных отклоняющих пластин (рис. 3.2). Экран ЭЛТ покрыт слоем люминофора.

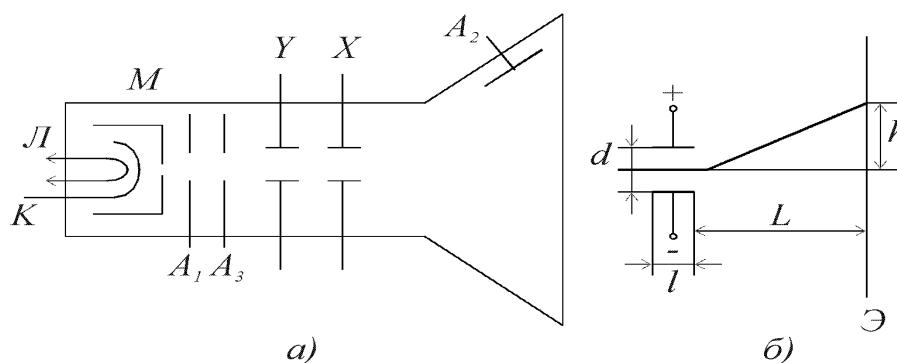


Рисунок 3.2

Источником электронов является оксидированный катод  $K$ , окруженный модулирующим электродом  $M$ , содержащим отверстие для выхода электронов. Изменяя напряжение на модуляторе, можно изменять интенсивность луча, т.е. яркость свечения экрана. Первый анод служит для фокусирования луча, а второй и третий – для ускорения электронов. При подаче на отклоняющие пластины напряжения, между ним создается электрическое поле, управляющее положением луча на экране. При одновременной подаче на пластины  $Y$  и  $X$  напряжений  $U_y$  и  $U_x$  вид осциллограммы будет характеризовать функциональную зависимость  $U_y = f(U_x)$ .

Исследуемое напряжение поступает через вход  $Y$  в канал вертикального отклонения луча (канал  $Y$ ). Вход, при котором возможна передача постоянного напряжения, называется открытым. Вход, не пропускающий постоянной составляющей, называется закрытым. Выбор входа осуществляется переключателем  $П$ .

В канал  $Y$  входят: делитель напряжения, служащий для ослабления больших сигналов, предварительный усилитель для усиления малых сигналов, линия задержки для создания небольшой временной задержки сигнала (в низкочастотных осциллографах он отсутствует), усилитель  $Y$ , сигнал с которого поступает на вертикально отклоняющие пластины  $Y$ .

В канал  $X$  входят: генератор развертки, блок синхронизации и усилитель  $X$ .

Генератор развертки вырабатывает напряжение пилообразной формы (рис. 3.3), которое поступает через усилитель канала  $X$  на горизонтально отклоняющие пластины трубки.

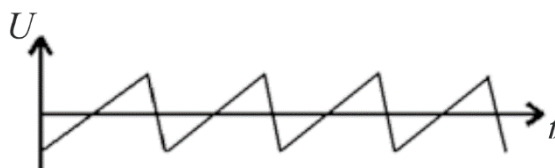


Рисунок 3.3

В отсутствие входного сигнала луч движется по экрану осциллографа с равномерной скоростью, достигает края экрана и мгновенно перебрасывается в начальную точку. В результате на экране осциллографа луч чертит прямую линию развертки. Если при этом на пластины  $Y$  подать напряжение исследуемого сигнала, то луч будет дополнительно отклоняться по вертикали и на экране появится осциллограмма этого напряжения, описываемая функцией  $U_y = f(t)$ .

Генератор развертки может работать в трех режимах: автоматическом, ждущем и режиме однократного (одинокного) запуска. Длительность развертки задается переключателем, шкала которого отградуирована в значениях коэффициента развертки,

определяющего время, необходимое для пробега лучом расстояния в одно деление (1 см) вдоль оси  $X$ .

Для того, чтобы осциллограмма была неподвижна, необходимо, чтобы длительность развертки  $T_x$  была кратна периоду сигнала  $T_c$  :

$$T_x = nT_c, n = 1, 2, 3, \dots$$

Это достигается синхронизацией генератора развертки при помощи кратковременных импульсов, вырабатываемых цепью запуска. Напряжение развертки может быть получено от внешнего источника напряжения (вход  $X$ ).

При работе генератора развертки в автоколебательном режиме осуществляется непрерывная развертка, которая пригодна для наблюдения любых непрерывных периодических сигналов и последовательности импульсов с малой скважностью.

В каждом осциллографе имеются калибраторы амплитуды и длительности, представляющие собой генераторы сигналов с точными значениями амплитуды и частоты следования.

Часто для калибровки коэффициента по амплитуде и коэффициента развертки по периоду повторения используется один и тот же сигнал, представляющий последовательность прямоугольных импульсов с частотой 1–2 кГц и скважностью, равной 2.

Основными характеристиками осциллографов являются: диапазон измеряемых напряжений, полоса пропускаемых частот канала  $Y$ , диапазон значений коэффициента отклонения канала  $Y$  (В/дел), диапазон значений коэффициента развертки (время/дел), входные сопротивления и емкости каналов  $Y$  и  $X$ , диапазон частот и амплитуд напряжения внешней синхронизации, погрешности амплитудных и временных измерений.

#### **Органы управления осциллографом**

- **Переключатель «В/дел.»** – изменяет степень ослабления входного напряжения аттенуатором, задает коэффициент отклонения луча по вертикали. **Ручка «В/дел. плавно»** – обеспечивает плавную регулировку коэффициента отклонения луча по вертикали. Значения коэффициента отклонения верны только тогда, когда ручка находится в крайнем правом положении.

- **Переключатель входа «~», «~»** выбирает способ подачи исследуемого сигнала в канал  $Y$ . Положение «~» соответствует закрытому (для постоянной составляющей) входу, когда исследуемый сигнал поступает через разделительный конденсатор. Положение «~» соответствует открытому входу. Измерение постоянного напряжения производится только при положении переключателя «~».

- **Переключатель синхронизации «внутр.», «сеть», «внешняя 1:1», «внешняя 1:10»** – выбирает источник синхронизирующего сигнала. В положении «внутр.» синхронизация осуществляется исследуемым сигналом, в положении «сеть» – сигналом с частотой, питающей осциллограф сети (50 Гц), в положении «внешняя 1:1» – сигналом, подаваемым на вход внешней синхронизации. В положении «внешняя 1:10» подаваемый сигнал ослабляется в 10 раз.

- **Ручка «Уровень»** – выбирает уровень сигнала, при котором происходит запуск генератора развертки исследуемым сигналом.

- **Переключатель «Время/дел.»** – устанавливает калиброванный коэффициент развертки – время, необходимое для прохождения лучом расстояния равного одному делению. **Ручка «время/дел. плавно»** – обеспечивает плавную регулировку коэффициента развертки. При измерении временных параметров исследуемого сигнала ручка должна находиться в крайнем правом положении.

- **Переключатель «×1, ×0,1»** – служит для растяжки изображения по горизонтали. Цифра показывает, во сколько раз изменяется коэффициент развертки.

## Осциллографические измерения

**1. Измерение постоянных напряжений.** Измерение постоянных напряжений производится при их подаче на открытый вход осциллографа. Генератор развертки должен работать в автоколебательном режиме.

Перед началом измерений нужно установить нулевую линию осциллографа – линию, прочерчиваемую разверткой при отсутствии входного сигнала. Для этого входной провод осциллографа следует замкнуть на корпус и ручкой вертикального перемещения луча установить нулевую линию на одну из крайних горизонтальных линий измерительной шкалы.

Измеряемое напряжение подают на открытый вход осциллографа и переключателем «В/дел» устанавливают луч в пределах экрана. Измеряют число делений, на которое переместится луч и умножают это число на значение коэффициента отклонения. Ручка «плавно» должна находиться в крайнем правом положении.

**2. Измерение переменных напряжений.** Для измерения переменного напряжения исследуемый сигнал подается на закрытый вход осциллографа. Осциллограф может работать в режиме внутренней и внешней синхронизации. Переключатель «В/дел» ставится в такое положение, при котором размах осциллограммы максимален и находится в пределах экрана. Коэффициент развертки устанавливается таким, чтобы на экране наблюдалось несколько периодов исследуемого сигнала. Ручка «плавно» переключателя коэффициента отклонения должна находиться в крайнем правом положении.

Амплитуда напряжения равна половине числа делений между крайними точками размаха осциллограммы, умноженной на показания переключателя «В/дел.».

**3. Измерение частоты периодических сигналов.** Частоту периодического сигнала находят путем измерения периода его повторения. Для этого на осциллограмме измеряют расстояние между точками, соответствующими периоду сигнала и умножают его на показания переключателя коэффициента развертки «Время/дел.». Частоту сигнала рассчитывают по формуле  $f_x = 1/T$ .

**4. Измерение сдвига фаз.**

*Метод линейной развертки.*

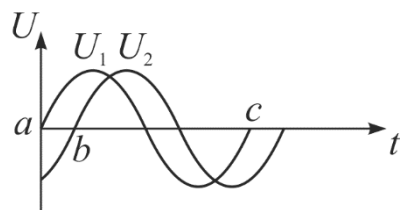


Рисунок 3.4

Для проведения фазовых измерений этим методом необходим двухлучевой или двухканальный осциллограф. На один вход подается опорный сигнал, а на второй вход – сравниваемый сигнал. Осциллограф работает в режиме непрерывной развертки, при этом, синхронизация развертки осуществляется по первому (опорному сигналу). При этом амплитуды сигналов подбираются одинаковыми (рис. 3.4). Тогда фазовый сдвиг  $\varphi$  в градусах определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{ab}{ac} \cdot 360^\circ.$$

*Метод эллипса.*

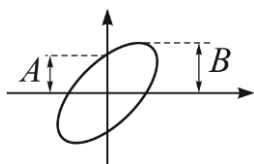


Рисунок 3.5

При измерении сдвига фаз по фигурам Лиссажу один из сигналов подают на вход  $Y$  осциллографа, второй – на вход  $X$  (при отключенной развертке). При этом на экране в общем случае будет наблюдаться эллипс (рис. 3.5). Если центр эллипса совмещен с началом координат, то фазовый сдвиг  $\varphi$  можно определить по формуле  $\varphi = \pm \arctg \frac{A}{B}$ .

### Выполнение работы

1. Изучите инструкции к осциллографу, генераторам низкой и высокой частоты, частотомеру, электронному вольтметру.

2. Установите на генераторе низкой частоты сигнал 100 Гц. Используя аттенюатор генератора последовательно установите напряжение выходного сигнала равное 100 мВ, 500 мВ, 1 В, 5 В. Измерьте напряжение вольтметром, осциллографом и прибором ТЛ-4. Результаты измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

$U, В$	0,1	0,5	1	5

3. Устанавливая частоты 100 Гц, 1кГц, 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц, 5 МГц, 10 МГц повторите измерения по пункту 2. Напряжение сигнала 1В. Данные занесите в таблицу 2, сделайте вывод.

Таблица 2

$f$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$5 \cdot 10^6$	$10^7$

4. Получите фигуры Лиссажу для соотношения частот 1:1, 1:2, 1:3.

### Контрольные вопросы

1. Рассмотрите задачи, связанные с движением заряженных частиц в продольном и поперечном электрическом поле. Какова будет траектория электрона в первом и втором случае?

2. Каково назначение функциональных узлов электронного осциллографа?

3. Как осуществляют в осциллографе режимы внутренней и внешней синхронизации?

4. Как с помощью осциллографа можно определить амплитуду и частоту переменного напряжения?

5. Как с помощью осциллографа можно определить сдвиг фаз между гармоническими сигналами?

## Лабораторная работа № 4

### Изучение зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры

**Цель:** исследовать зависимость сопротивления металлов и полупроводников от температуры, определить температурный коэффициент сопротивления металла и энергию активации полупроводника.

**Оборудование:** прибор для определения термического коэффициента сопротивления вольфрамовой нити, термометр до 100°C, электрическая плитка, стакан с водой, источник переменного тока (ЛАТР), электрическая лампочка на панели, амперметр переменного тока 1 А, вольтметр переменного тока 30 В, мост Уитстона типа ММВ.

#### Теория работы и описание установки

Хорошая электропроводность (малое сопротивление) металлов объясняется особенностями их строения, т.е. наличием свободных электронов внутри кристаллической решетки. Вследствие хаотического теплового движения электронов при отсутствии внешнего электрического поля ток в металле не возникает. При наложении поля на свободные электроны действуют дополнительные силы, вызывающие их направленное перемещение, т.е. возникает электрический ток. Но из-за непрерывных соударений электронов с ионами металла всегда имеет место сопротивление прохождению электрического тока. Величина сопротивления зависит от рода проводника, его размеров, формы и температуры. Чем выше температура, тем интенсивнее колебательные движения ионов и чаще происходят соударения с электронами, а значит, сопротивление проводника возрастает.

Простейшим образом зависимость сопротивления металлов от температуры можно выразить соотношением:  $R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$ , где  $R_0$  и  $R_t$  – значения сопротивления соответственно при 0°C и при температуре  $t$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  – индивидуальные константы металла, определяемые из опыта.

Приближенно можно считать зависимость сопротивления от температуры линейной:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t). \quad (4.1)$$

Для определения  $\alpha$  надо произвести измерения при двух значениях температуры. Например, измерим  $R_{тк}$  – сопротивление металла при комнатной температуре  $t_{тк}$ :

$$R_{тк} = R_0(1 + \alpha t_{тк}). \quad (4.2)$$

Разделим уравнение (4.2) на (4.1):

$$\frac{R_{тк}}{R_t} = \frac{R_0(1 + \alpha t_{тк})}{R_0(1 + \alpha t)},$$
$$\alpha = \frac{R_t - R_{тк}}{R_{тк}t - R_t t_{тк}}, \quad (4.3)$$

Температурный коэффициент сопротивления показывает изменение сопротивления при нагревании на один градус. Температурный коэффициент сопротивления для одного и того же вещества различен при разных температурах. Но во многих случаях это изменение в довольно широком интервале температур незначительно, и можно пользоваться значением  $\alpha$  в этом интервале.

Численное значение температурного коэффициента сопротивления может быть определено опытным путем для любого металла. Зная его, можно использовать точный и удобный способ определения температуры металлических проводников.



Для определения температуры металлического проводника преобразуем формулы (4.2) и (4.1):

$$t = \frac{R_t (1 + \alpha t_k) - R_{тк}}{\alpha R_{тк}}, \quad (4.4)$$

где  $R_t$  – сопротивление при температуре  $t^\circ\text{C}$ ,

$R_{тк}$  – сопротивление при комнатной температуре,

$t_k$  – комнатная температура,

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Иногда сопротивление  $R_t$  раскаленного проводника удобно определять по закону Ома:

$$R_t = \frac{U}{I}, \quad (4.5)$$

где  $U$  – разность потенциалов на концах проводника,

$I$  – ток, протекающий через проводник.

Учитывая формулу (4.5), преобразуем равенство (4.4):

$$t = \frac{R_t (1 + \alpha t_k) - R_{тк}}{\alpha R_{тк}} = \frac{\frac{U}{I} (1 + \alpha t_k) - R_{тк}}{\alpha R_{тк}}. \quad (4.6)$$

В диэлектриках и полупроводниках при температурах близких к абсолютному нулю, свободных электронов нет. Чтобы оторвать электроны от атомов и сделать их свободными, необходимо передать им некоторую энергию, которая называется *энергией активации*. Такая энергия может быть передана при повышении температуры кристалла или другими внешними действиями: светом, сильным электрическим полем и др. В диэлектриках видимая электропроводность возникает только при температурах, превышающих температуру их испарения. Поэтому при обычных условиях они являются изоляторами. В полупроводниках значительная электропроводность наблюдается при комнатной температуре. Характерной особенностью полупроводников является сильная зависимость их электрических свойств от ряда физических факторов: температуры, освещения, электрического поля, наличия примесей.

В этой работе исследуется зависимость сопротивления полупроводников и металлов от температуры.

Удельная электропроводность вещества зависит от концентрации носителей заряда и их подвижности. Для металлов удельная электропроводность:

$$\sigma = enb_n, \quad (4.7)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $n$  – концентрация электронов,  $b_n$  – их скорость.

В полупроводниках носителями заряда являются электроны и дырки, поэтому вместо (4.7) получим:

$$\sigma = en_n b_n + ep_p b_p, \quad (4.8)$$

где  $n_n$  и  $b_n$  – концентрация и скорость электронов,  $n_p$  и  $b_p$  – дырок.

Из формул (4.7) и (4.8) следует, что температурная зависимость удельной электропроводности  $\sigma(T)$  обусловлена зависимостью от температуры концентрации свободных носителей зарядов  $n(T), p(T)$  и их скоростей  $b_n(T)$  и  $b_p(T)$ .

В металлах изменение температуры не влияет на концентрацию свободных электронов, поэтому зависимость  $\sigma(T)$  определяется только температурной зависимостью скорости электронов  $b_n(T)$ . Температурная зависимость скорости определяется тепловыми колебаниями атомов. Зависимость скорости от температуры имеет вид:

$$b \sim T^{-\alpha}, \quad (4.9)$$

где для металлов  $\alpha = 1$ , а для атомных полупроводников  $\alpha = 3/2$ .

В полупроводниках при изменении температуры изменяется не только скорость, но и концентрация носителей заряда. Если повысить температуру беспримесного полупроводника, то часть атомов ионизируется, в результате чего возникают свободные электроны и дырки в одинаковом количестве. Зависимость концентрации электронов  $n$  от температуры определяется формулой:

$$n = n_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (4.10)$$

где  $n_0$  – наибольшая возможная концентрация электронов проводимости в полупроводнике,  $\Delta W$  – энергия активации,  $T$  – абсолютная температура.

В примесном полупроводнике температурная зависимость концентрации носителей заряда тоже определяется формулой (4.10), но энергия ионизации примесей значительно меньше энергии ионизации атомов основного вещества, и поэтому примесная проводимость наблюдается при значительно низких температурах.

В этой работе исследуется полупроводник с собственной проводимостью. В этом случае электропроводность определяется формулой (4.8). Температурную зависимость электропроводности можно выразить формулой:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (4.11)$$

На практике используют удельное сопротивление:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \rho_0 e^{\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (4.12)$$

С учетом того что  $R = \rho \frac{l}{S}$ , формула (4.12) дает возможность определить сопротивление при температуре  $T$ :

$$R_T = A e^{\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (4.13)$$

Используя (4.13) можно определить  $\Delta W$ :

$$\ln R_T = \ln A + \frac{\Delta W}{2k} \frac{1}{T}. \quad (4.14)$$

Если на опыте определить сопротивление полупроводника  $R_T$  при разных температурах и построить график  $\ln R_T = f\left(\frac{1}{T}\right)$ , то по тангенсу угла наклона прямой  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta W}{2k}$  можно определить энергию активации:

$$\Delta W = 2k \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.15)$$

### Порядок выполнения работы

**Задание 1.** Изучение зависимости сопротивления вольфрама от температуры и определение  $\alpha$ .

*Описание установки:* В работе применяется прибор для измерения термического коэффициента сопротивления металлов. Внутри стеклянной пробирки находится картонный каркас, к которому крепится вольфрамовая спираль от электрической лампочки. На колодке находится две клеммы, соединенные с концами спирали. В пробирке закреплен термометр. Сопротивление проводника в работе измеряется линейным мостом Уитстона типа ММВ.

1.1. Напряжение на лампу подается от сети 36 В через ЛАТР, ток в цепи измеряется с помощью многопредельного амперметра, напряжение измеряется многопредельным вольтметром типа Э515.

1.2. Пробирку, внутри которой находится исследуемый проводник вместе с термометром, погрузить в сосуд с водой. Через несколько минут после установки температуры, снять показания термометра  $t_k$  и измерить сопротивление вольфрамового проводника  $R_k$  мостом ММВ.

1.3. Включить электрическую плитку и нагреть стакан с водой, в котором находится прибор для измерения температурного коэффициента сопротивления. По мере повышения температуры  $t$  измерить сопротивление проводника  $R_t$  через каждые  $10^\circ\text{C}$  до температуры  $t = 70^\circ\text{C}$ .

1.4. Данные измерений занести в таблицу 4.1, построить график зависимости сопротивления вольфрама от температуры.

1.5. Согласно данным таблицы, по формуле (4.3) найти температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  для трех-пяти значений температур. Вычислить среднее значение  $\alpha_{\text{ср}}$ .

Таблица 4.1

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$\alpha_{\text{ср}}$

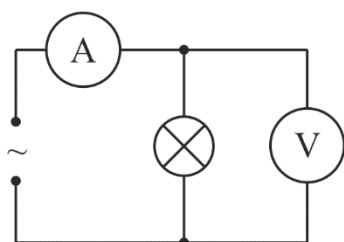


Рисунок 4.1

**Задание 2.** *Определение температуры нити накала электрической лампы.*

2.1. По схеме (рис.4.1) собрать цепь, состоящую из лампы, ЛАТРа, амперметра и вольтметра. Установить амперметр на предел измерения 1А; вольтметр – на предел измерения 30 В. Установить ручку ЛАТРа в крайнее положение против часовой стрелки.

2.2. Вращая рукоятку ЛАТРа по часовой стрелке, подать на лампу напряжение от 5 В до 25 В через каждые 5 В, фиксируя показания вольтметра и амперметра в таблице 4.2. По формуле (4.6) определить температуру  $t$  нити накала, взяв из первого задания значение  $\alpha_{\text{ср}}$ .

Таблица 4.2

$U, В$	$I, А$	$t, ^\circ C$

2.3. Рассчитать погрешности для одного из значений температуры,  $\alpha_{ср}$  в данном опыте постоянно, (случайные погрешности не учитывать  $\Delta U_{сл} = 0, \Delta I_{сл} = 0$ ).

**Задание 3.** Изучение зависимости сопротивления полупроводников от температуры.

*Описание установки:* Схема установки такая же, как в задании 1. Исследуемый полупроводник помещен в стеклянную пробирку, которая опускается в термостат, заполненный водой. Термостат нагревается с помощью электронагревателя. Температура измеряется термометром. Сопротивление образца измеряется с помощью моста ММВ.

### Порядок выполнения работы

3.1. Измерить сопротивление образца при комнатной температуре.

3.2. Аналогичные измерения сделать при других температурах в интервале от  $20^\circ C$  до  $70^\circ C$  через каждые  $10^\circ C$ .

3.3. Постройте график зависимости  $\ln R_T = f(1/T)$ . По формуле (4.15) вычислите энергию активации  $\Delta W$ . Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

№	$t, ^\circ C$	$T, K$	$R_e, \text{Ом}$	$10^3/T$	$\ln R_T$	$\Delta W, \text{эВ}$

**Вывод:**

**Контрольные вопросы**

1. Почему сопротивление металлов возрастает с увеличением температуры?
2. Что называется температурным коэффициентом сопротивления?
3. Как зависит от температуры подвижность носителей зарядов в металлах и полупроводниках?
4. При каких условиях в полупроводниках наблюдается собственная проводимость?
5. Как зависит от температуры сопротивление полупроводников?
6. Как по зависимости сопротивления полупроводников от температуры определить его энергию активации?

## Лабораторная работа № 5

### Исследование полупроводникового диода. Выпрямители

**Цель работы:** В данной лабораторной работе снимается вольт- амперная характеристика полупроводникового диода, изучается применение диодов в различных схемах выпрямления переменного тока.

**Оборудование:** осциллограф, источник переменного тока (генератор, имеющий симметричный и несимметричный выходы, обеспечивающий 2 В на частотах 20–1000 Гц), вольтметр (1,5 В), миллиамперметр (1,5 мА), монтажная плата с полупроводниковым диодом типа Д226Б.

#### Теория работы

Контакт разнородных проводников обладает преимущественно односторонней проводимостью: его сопротивление току в одном направлении (пропускном) меньше, а в другом (запорном) – больше. Особенно сильно этот эффект выражен на границе дырочного  $p$  и электронного  $n$  полупроводников. Такой контакт называют электронно-дырочным, или  $p$ - $n$ -переходом. Электронно-дырочный переход невозможно получить механическим прижатием двух кусков полупроводника. Его получают, например, введением донорной и акцепторной примесей с разных сторон в чистый монокристалл полупроводника. Для германия или кремния донором (обеспечивающим электронную проводимость) может служить мышьяк или фосфор, а акцептором (обеспечивающим дырочную проводимость) – индий или бор. В пластинку германия с одной стороны вваривают шарик индия, который при нагревании в процессе сваривания диффундирует в германий на некоторую глубину, с другой – оловянный шарик электрод с примесью мышьяка, который также диффундирует в германий. В результате в одной части полупроводникового кристалла возникает электронная проводимость ( $n$ -область), а в другой – дырочная ( $p$ -область). Между этими областями расположен тонкий (порядка  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  м) переходный слой –  $p$ - $n$  переход.

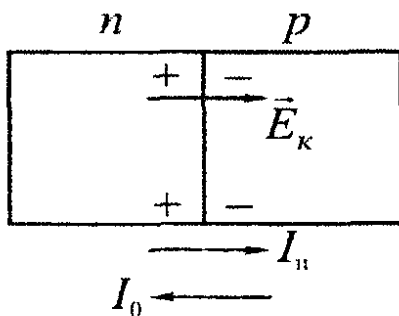


Рисунок 5.1

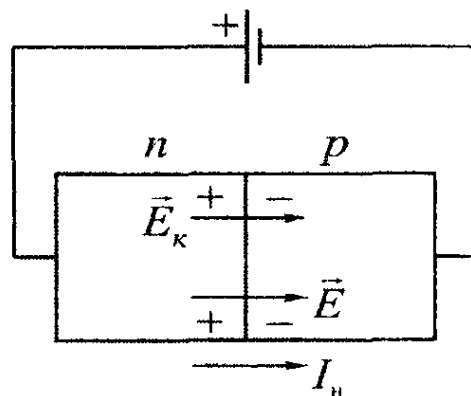


Рисунок 5.2

Свойства  $p$ - $n$ -перехода существенно отличаются от свойств остальной части полупроводника. Вследствие теплового движения электрона из  $n$  области диффундируют в  $p$ -область и там рекомбинируют с дырками, а дырки из  $p$ -области диффундируют в  $n$ -область и рекомбинируют с электронами. В результате переходный слой на границе  $p$ - и  $n$ -областей полупроводника сильно обедняется носителями тока: электронами и дырками. Кроме того, в  $n$ -области вблизи границы возникает объемный положительный заряд ионов донорной примеси (ранее он компенсировался отрицательным зарядом электронов проводимости), а в  $p$ -области – отрицательный заряд акцепторных ионов (ранее он был скомпенсирован зарядом дырок). Образуется двойной электрический слой (рис. 5.1),

создающий контактное поле  $E_k$ , направленное от  $n$ - к  $p$ -области. Это поле препятствует дальнейшей диффузии. Оно выталкивает электроны в глубь электронного, а дырки – в глубь дырочного полупроводника, поддерживая зазор, своеобразный коридор между  $p$ - и  $n$ -областями, почти лишенный носителей тока. Поэтому электрическое сопротивление  $p$ - $n$ -перехода несмотря на его малую ширину, во много раз больше сопротивления всей остальной части полупроводника.

Через  $p$ - $n$ -переход из  $n$ -области при тепловом движении могут прорваться только те электроны, энергия которых достаточна для преодоления контактного поля  $E$ . То же относится и к дыркам, диффундирующим из  $p$ -области в  $n$ -область. В результате создается некоторый диффузионный ток, текущий из  $p$ -области в  $n$ -область. Сила этого тока  $I_0$  сильно зависит от величины поля  $E_k$ .

В любом проводнике кроме основных носителей тока всегда имеется некоторое, как правило, небольшое, количество неосновных носителей, возникающих, например, в результате тепловой ионизации. Поэтому в  $n$ -области, наряду с электронами проводимости (основными носителями), имеется небольшое количество дырок (неосновных носителей), а в  $p$ -области кроме дырок – небольшое количество электронов. Контактное поле способствует переходу неосновных носителей через  $p$ - $n$ -переход. В результате из  $n$ -области течет ток неосновных носителей. Сила этого тока  $I_n$  слабо зависит от контактного поля. Она определяется количеством неосновных носителей, образующихся в приконтактной области в единицу времени (все они и создают ток силой  $I_n$ ). При равновесии  $I_0 = I_n$ , а полная сила тока в образце  $I = I_0 + I_n = 0$  (см. рис. 5.1).

Рассмотрим влияние внешнего электрического поля на свойства  $p$ - $n$ -перехода. Включим образец в цепь источника тока, соединив  $n$ -область с положительным полюсом источника,  $p$ -область – с отрицательным (рис. 5.2). В этом случае поле  $E$ , созданное источником внутри переходного слоя (а оно будет довольно значительным ввиду большого сопротивления  $p$ - $n$ -перехода), заметно усилит контактное поле что приведет к еще большему уменьшению концентрации дырок и электронов проводимости в переходном слое и, следовательно, к значительному увеличению его сопротивления. Ток основных носителей практически прекратится. Через переход будет течь только ток неосновных носителей, который, как отмечалось выше, практически не изменится. Сила тока  $I_n$  неосновных носителей обычно весьма мала, т.к. мала их концентрация.

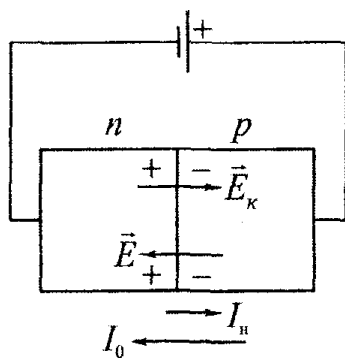


Рисунок 5.3

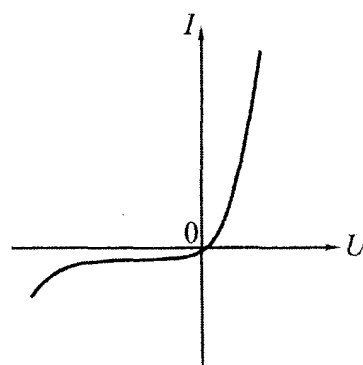


Рисунок 5.4

Если изменить полярность источника тока (рис. 5.3), то поле  $E$  частично или полностью компенсирует контактное поле  $E_n$  и обеспечит проникновение в переходной слой дырок и электронов проводимости. Сопротивление  $p$ - $n$  перехода уменьшится, а сила тока основных носителей  $I_0$  возрастет. Электроны проводимости из  $n$ -области и дырки из  $p$ -области, подходя к  $p$ - $n$ -переходу, рекомбинируют, а из глубины полупроводника подходят все новые и новые носители тока - в цепи течет ток.

Вольтамперная характеристика  $p-n$ -перехода изображена на рисунке 5.4. В пропускном направлении сила тока велика и быстро возрастает при увеличении напряжения. Так, для германия при площади контакта около  $1 \text{ мм}^2$  уже при напряжении  $1 \text{ В}$  сила тока становится  $1 \text{ А}$ . В запиорном направлении сила тока не превышает нескольких микроампер. С увеличением площади контакта сила тока в прямом направлении может достигать нескольких сотен ампер.

Если в запиорном направлении значительно увеличить напряжение, то может произойти разрушение контакта, сила тока резко увеличится, произойдет электрический пробой.

С повышением температуры полупроводника возрастает концентрация неосновных носителей и, следовательно, увеличивается сила тока в запиорном направлении. Контакт разнородных полупроводников ( $p-n$  переход), обладает односторонней проводимостью. Его сопротивление току в одном направлении (пропускном) малое, а в другом (запиорном) – большое. Свойство односторонней проводимости  $p-n$  перехода используется в полупроводниковых диодах.

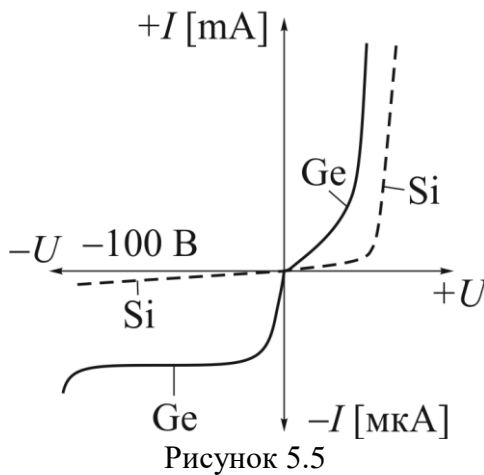


Рисунок 5.5

Вольтамперная характеристика реального  $p-n$ -перехода изображена на рисунке 5.5. Вольтамперная характеристика проходит через ноль, но заметный ток появляется после преодоления потенциального барьера. При значительной величине обратного напряжения наступает электрический и тепловой пробой. С повышением температуры полупроводника возрастает концентрация неосновных носителей и, следовательно, увеличивается сила тока в запиорном направлении.

### Порядок выполнения работы

**Задание 1.** Снятие вольт-амперной характеристики диода.

1.1. Собрать схему, изображенную на рисунке 5.6.

1.2. Перед включением приборов в сеть убедиться в том, что ручка потенциометра, регулирующего выходное напряжение источника постоянного тока, находится в крайнем положении против часовой стрелки, что соответствует минимальному выходному напряжению.

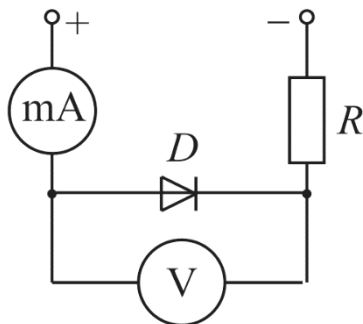


Рисунок 5.6

1.3. Увеличивая ступенями напряжение, подаваемое на схему от источника постоянного тока, снять зависимость между током  $I$ , текущим через диод, и напряжением  $U$ , действующим на нем.

1.4. Результаты измерений занести в таблицу 5.1 и построить график.



Таблица 5.1

$I, A$	$U, B$

**Задание 2.** Наблюдение вольтамперной характеристики диода на экране осциллографа.

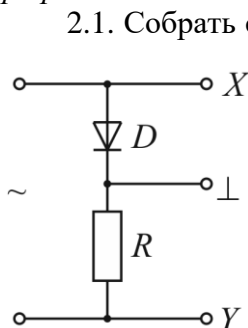


Рисунок 5.7

- 2.1. Собрать схему, изображенную на рисунке 5.7. Переменное напряжение  $U\sim$  частотой несколько сотен герц подать на схему с генератора.
- 2.2. Осциллограф подсоединить к схеме и установить его в режим внешней развертки.
- 2.3. Увеличивая переменное напряжение, подаваемое на схему с генератора, наблюдать на экране осциллографа изображение вольтамперной характеристики, зарисовать ее.

**Задание 3.** Изучение различных выпрямительных схем. Однополупериодный выпрямитель.

- 3.1. Собрать схему, изображенную на рисунке 5.8а.
- 3.2. Подать на схему переменное напряжение  $U\sim$  с генератора.
- 3.3. Установить на экране осциллографа изображение двух-трех периодов сигнала. Зарисовать наблюдаемую осциллограмму напряжения, действующего на резисторе  $R$ .

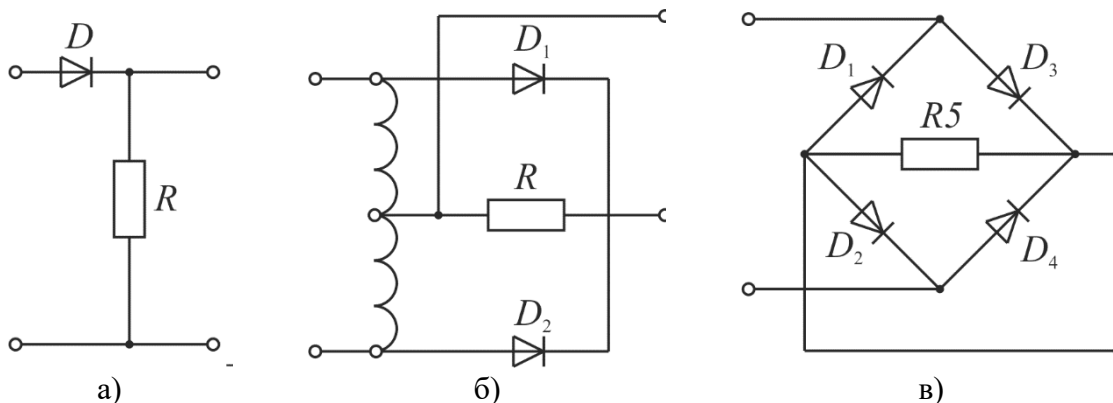


Рисунок 5.8. Схемы выпрямителей переменного тока:  
 а) однополупериодный; б) двухполупериодный со средней точкой;  
 в) двухполупериодный мостовой.

*Двухполупериодный выпрямитель.*

3.4. Собрать схему, изображенную на рисунке 5.8б.

3.5. Зарисовать осциллограмму напряжения, действующего на резисторе  $R$ , сопоставив ее с осциллограммой для однополупериодного выпрямителя.

*Двухполупериодный мостовой выпрямитель.*

3.6. Собрать схему в соответствии с рисунке 5.8в.

3.7. Зарисовать осциллограмму напряжения, действующего на резисторе  $R$ , сопоставив ее с осциллограммами в двух предыдущих случаях.

*Задание 4. Сглаживание выпрямленного напряжения.*

Если на выходе выпрямителя параллельно резистору нагрузки включить конденсатор, то этот конденсатор будет заряжаться, когда диод открыт, и разряжаться через резистор  $R$ , когда диод закрыт. Таким образом, напряжение на резисторе окажется менее пульсирующим, сглаженным.

4.1. Собрать одну из схем, изображенных на рисунке 5.8, подключив параллельно резистору нагрузки один из имеющихся на панели конденсаторов. Чтобы отклонение луча на экране осциллографа было пропорционально также и постоянной составляющей исследуемого напряжения, использовать открытый вход осциллографа.

4.2. Зарисовать осциллограммы напряжения, действующего на резисторе  $R$  для каждого из трех конденсаторов, подключаемых к резистору. Частоту переменного напряжения при этом взять равной примерно 200 Гц.

4.3. Для случая, когда к резистору  $R$  подключен конденсатор наименьшей емкости, увеличивать частоту переменного напряжения, действующего на резисторе. Зарисовать осциллограммы для нескольких частот. Обратит внимание на изменение среднего уровня выпрямленного напряжения.

### Контрольные вопросы

1. Какова природа электропроводности полупроводников?
2. Каким образом создается примесная электронная или дырочная электропроводность?
3. Что происходит в *p-n*-переходе при действии внешнего напряжения?
4. Объяснить ход вольтамперной характеристики диода.
5. Как вольтамперная характеристика диода изменяется с температурой?
6. Какова точность приборов, используемых при измерениях?
7. В чем заключаются особенности соединения полупроводниковых диодов последовательно и параллельно?
8. Поясните назначение выпрямительных устройств.
9. Поясните принцип действия одно и двухполупериодной схем выпрямления.
10. В чем заключаются преимущества и недостатки изучаемых выпрямительных схем?
11. Укажите, какие требования предъявляются к диодам, используемым в выпрямительных устройствах.
12. Каковы основные преимущества и недостатки полупроводниковых диодов по сравнению с вакуумными?

## Лабораторная работа № 6

### Определение удельного заряда электрона

**Цель работы:** В задаче экспериментально определяется удельный заряд электрона  $e/m$  двумя методами. Первый основан на использовании закона Богуславского–Ленгмюра или закона «трех вторых». Во втором, так называемом «методе магнетрона», рассматривается движение электронов во взаимно перпендикулярных однородном магнитном и радиальном электрическом полях.

**Оборудование:** монтажная плата с соленоидом и электронной лампой (3Ц18П), источники питания (ВС-24, ВУП-2), вольтметр (150 В), миллиамперметр (3 мА).

#### Теория работы и описание установки

1. *Метод, основанный на использовании закона Богуславского–Ленгмюра или закона «трех вторых».* Рассмотрим диод с электродами в виде коаксиальных цилиндров, длина которых  $l$ , а радиусы  $r_k$  (катод) и  $r_a$  (анод). При термоэлектронной эмиссии из катода в пространстве вокруг него образуется облако отрицательного заряда (пространственный заряд). Если обеспечить условия, при которых часть электронов, образующих это облако, возвращается на катод, а часть увлекается электрическим полем на анод, то анодный ток будет подчиняться закону «трех вторых»:

$$I = \frac{8\sqrt{2}\pi\epsilon_0}{9} \frac{l}{r_a} \left(\frac{e}{m}\right)^{\frac{1}{2}} U^{\frac{3}{2}}, \quad (6.1)$$

где  $U$  – разность потенциалов между анодом и катодом, а  $r_a \gg r_k$ . Упомянутые условия состоят в том, что электроны должны иметь нулевую начальную скорость, а электрическое поле вблизи катода должно отсутствовать  $\left(\frac{\partial U}{\partial r} = 0\right)$  – этим обеспечивается возможность почти беспрепятственного обмена электронами между катодом и облаком.

Таким образом, можно сказать, что закон «трех вторых» описывает «вытягивание» электронов из облака, в котором вытягиваемые электроны составляют лишь малую часть. При достижении анодным напряжением достаточно большой величины все электроны облака будут устремляться к аноду – при этом ток анода перестанет зависеть от анодного напряжения (это ток насыщения).

Выполнение условия  $\frac{\partial U}{\partial r} = 0$  вблизи катода достигается подбором тока накала лампы, определяющего эмиссию катода.

Задача состоит в экспериментальной проверке закона «трех вторых» и определении величины  $e/m$ .

*Движение электрона в радиальном электрическом и однородном магнитном полях. "Метод магнетрона".*

Диод, описанный выше, поместим в соленоид так, чтобы, вектор магнитной индукции поля, создаваемого соленоидом, был направлен вдоль оси диода. В таком случае на электроны, вылетающие из катода, помимо радиального электрического поля действует однородное магнитное поле. Можно показать, что при достижении значения индукции магнитного поля

$$B_{кр} = \frac{2}{r_a} \sqrt{\frac{2U_a}{e/m}} \quad (6.2)$$

электроны перестанут долетать до анода вследствие искривления их траектории магнитным полем, и анодный ток диода резко упадет. Таким образом, измерение величины  $B$  дает возможность определить удельный заряд электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{r_a^2 B_{кр}^2}. \quad (6.3)$$

Следует иметь в виду, что распределение электронов по скоростям приводит к «размазыванию» спада анодного тока диода, что затрудняет измерение критического значения индукции магнитного поля.

Индукция магнитного поля, создаваемого соленоидом, вычисляется по формуле:

$$B = \mu_0 n I_c, \quad (6.4)$$

где  $n$  – число витков на единицу длины соленоида,  $I_c$  – ток через соленоид.

*Описание экспериментальной установки* (рис. 6.1). В лабораторной работе используется вакуумный диод ЗЦ18П ( $U_a \approx 100$  В,  $I_a \approx 8$  мА,  $I_n = 210$  мА,  $r_k = 0,45$  мм,  $r_a = 5,5$  мм,  $l = 4,38$  мм).

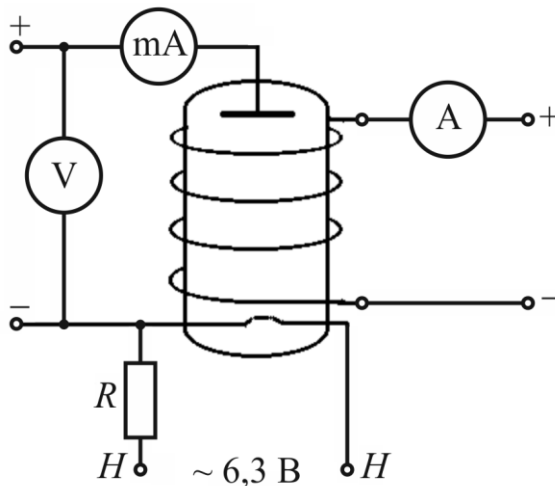


Рисунок 6.1

Диод установлен в вертикальном положении на цилиндрической подставке, на которую надевается соленоид так, что диод расположен на оси соленоида в его середине, где магнитное поле наиболее однородно.

Подставка с диодом укреплена на монтажной панели с основной электрической схемой. Для подводки питания к схеме имеются специальные гнезда. Напряжение накала диода берут с одной из пар клемм  $\sim 6,3$  В блока питания. Резистор  $R$ , смонтированный на панели, предназначен для гашения избытка напряжения, так как для накала диода ЗЦ18П нужно всего 3,15 В. На анод лампы напряжение подается с выхода источника питания.

Питание соленоида  $L$  осуществляется от источника постоянного тока ВС-24. Регулируется ток через соленоид ручками, выведенными на лицевую сторону источника постоянного тока. Ток соленоида измеряется амперметром.

*Подготовка установки к работе:* Сборка схемы производится в следующем порядке: сначала собрать цепь накала лампы, анодную цепь, цепь питания соленоида. До включения источников убедиться, что все регуляторы выходного напряжения установлены на минимум. Включить в сеть источники питания. После прогрева приборов в течение 5 мин приступить к измерениям.

### Порядок выполнения работы

**Задание 1.** Проверка закона «трехвторых» и определение удельного заряда электрона.

1.1. Снять зависимость тока диода  $I$  от анодного напряжения  $U_a$ , изменяя напряжение до 90 В.

1.2. Построить график зависимости  $I(U_a)$ . Закон «трех вторых» можно записать в виде:

$$I = \beta X, \quad (6.5)$$

где

$$\beta = \frac{8\sqrt{2}\pi\epsilon_0 l}{9r_a} \left(\frac{e}{m}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad X = U^{3/2}. \quad (6.6)$$

Метод наименьших квадратов позволяет по определенным формулам вычислить коэффициент  $\beta$  и его квадратичную ошибку. Значение коэффициента  $\beta$  в свою очередь позволяет на основе соотношений (6.6) вычислить величину  $e/m$  и ее ошибку.

Построить зависимость  $I(U^{3/2}) = I(X)$ , нанеся на плоскость  $(I, X)$  точки  $[I, X]$ , а прямую линию через них провести под углом, тангенс которого есть  $\beta$ . Эта линия – лучшая в смысле МНК.

**Задание 2.** *Определение удельного заряда электрона методом магнетрона.*

Включить ток через соленоид  $I_c$ . Снять 2–3 кривые зависимости  $I = f(I_c)$  при разных анодных напряжениях  $U_a$  и построить графики  $I(B)$ . Отметив на каждой кривой индукцию  $B_0$  соленоида, при которой анодный ток начинает уменьшаться, подставить это значение индукции  $B_0$  в формулу (6.3).

Значения  $B_0$  на графике выбирать в самом начале спада кривой тока. Проанализировать возможные погрешности определения  $e/m$  за счет «размазывания» спада.

### Контрольные вопросы

1. Сформулировать закон «трех вторых». При каких условиях он выполняется?
2. Почему ток диода должен быть далёк от насыщения?
3. Как влияет объемный заряд на распределение потенциала в пространстве между анодом и катодом?
4. Каков характер электрического и магнитного полей в диоде, помещенном внутрь соленоида?
5. Какие траектории описывает электрон при разных индукциях магнитного поля?
6. Чему равно отношение  $e/m$  в системе СИ?
7. Нарисовать электрическую схему установки. Объяснить порядок действий при измерениях. Перечислите основные правила техники безопасности при работе на установке.
8. Чем определяется «размазывание» спада анодного тока диода при увеличении индукции магнитного поля?

## Лабораторная работа № 7

### Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли. Изучение принципа суперпозиции магнитных полей

**Цель работы:** изучить основные характеристики постоянного магнитного поля, магнитного поля Земли; научиться определять горизонтальную составляющую магнитного поля Земли с помощью тангенс – гальванометра.

**Приборы и принадлежности:** источник постоянного тока, миллиамперметр, тангенс – гальванометр, двухполюсный ключ, провода.

#### Теория работы

**Магнитное поле** – это особый вид материи, с помощью которой осуществляется взаимодействие между движущимися электрическими зарядами или проводниками с током.

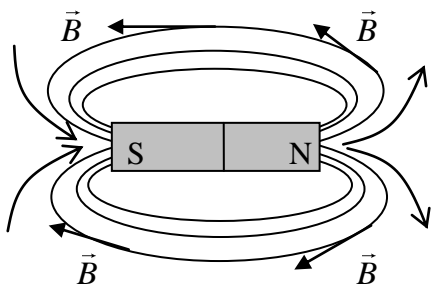


Рисунок 7.1

Источниками магнитного поля могут быть: постоянные магниты (Рис.7.1), проводники с током или движущиеся электрические заряды. Графически магнитное поле изображается с помощью силовых линий магнитного поля. За направление силовых линий – линий индукции магнитного поля условились считать направление от северного (N) к южному (S) магнитному полюсу. В отличие от электрического магнитное поле нигде не начинается и нигде не заканчивается, т.е. линии индукции маг-

нитного поля замкнуты, поэтому магнитное поле полностью пронизывает все вещество, например, постоянный магнит (Рис. 7.1). Т.к. магнитных зарядов в природе не существует, то деление на северный и южный магнитный полюс чисто условное. Если «разрезать» постоянный магнит по линии, разделяющий S и N на рисунке 7.1, то каждый «кусочек» магнита опять разобьется на северный и южный магнитный полюс.

Если в постоянное магнитное поле внести проводник с постоянным током, то со стороны магнитного поля на него будет действовать сила Ампера – это сила, с которой магнитное поле действует на внесенный в него проводник с током. Ее численное значение рассчитывают по закону Ампера: сила Ампера прямо пропорциональна вектору ин-

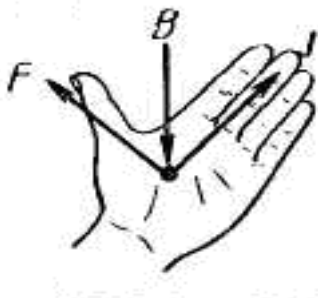


Рисунок 7.2

дукции магнитного поля, силе тока в проводнике, длине проводника и синусу угла между направлением тока и вектора магнитной индукции:

$$F_A = BI\ell \sin \alpha, \quad (7.1)$$

где  $I$  – сила тока в проводнике;  $\ell$  – длина проводника;  $\alpha$  – угол между направлением поля и тока;

$B = \frac{F_A}{I\ell}$  – вектор индукции магнитного поля, численно

равный силе Ампера, с которой магнитное поле действует на проводник с током единичной длины, по которому те-

чет ток 1 А, если угол между направлением поля и тока равен  $90^\circ$  (т.к. тогда  $\sin 90^\circ = 1$ ).

Размерность индукции:  $[B] = \text{Н}/(\text{А}\cdot\text{м}) = \text{Тл}$  (Тесла).

**Вектор индукции** является силовой характеристикой магнитного поля.

**Направление вектора индукции магнитного поля совпадает с направлением касательной к силовой линии магнитного поля в каждой ее точке** (Рис.7.1).

Направление силы Ампера определяется по **правилу «левой руки»** (Рис.7.2): *если направление силы тока в проводнике совпадает с направлением вытянутых четырех пальцев левой руки, а линии индукции магнитного поля входят в ладонь, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы Ампера.*

**Магнитное поле называется однородным**, если величина индукции магнитного поля в каждой точке пространства постоянна. Графически это означает, что «густота» линий индукции магнитного поля должна быть постоянной. И наоборот, если индукция магнитного поля не постоянна, т.е. «густота» линий индукции не постоянна, то магнитное поле называется **неоднородным**. Примером неоднородного магнитного поля может быть рисунок 7.1 – поле постоянного магнита; рисунок 7.3 – магнитное поле Земли.

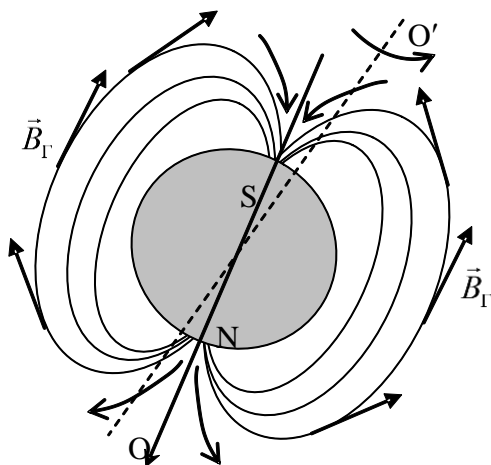


Рисунок 7.3

Земля представляет собой огромный шаровой магнит. Поэтому в любом пункте поверхности Земли и в окружающем пространстве проявляется действие магнитных сил. Магнитные полюса Земли не совпадают с географическими. Южный полюс магнитного поля Земли размещается около северных берегов Америки, приблизительно под  $74^\circ$  северной широты и  $100^\circ$  западной долготы, а северный полюс – в Антарктиде, под  $60^\circ$  южной широты и  $143^\circ$  восточной долготы. Схема силовых линий магнитного поля Земли показана на рисунке 7.3 (пунктиром показана ось вращения Земли –  $OO'$  и направление вращения Земли). Направление магнитных силовых линий Земли определены с помощью магнитной стрелки (стрелки компаса). Если подне-

сти магнитную стрелку на нитке так, чтобы пункт подвеса совпал с центром тяжести стрелки, то последняя устанавливается по направлению касательной к силовой линии магнитного поля Земли. В северном полушарии южный конец стрелки будет наклонен к Земле и она будет создавать с горизонтом угол наклона  $\theta$  (греч. «тета») – магнитное наклонение. Вертикальная плоскость, в которой разместится стрелка, называется плоскостью магнитного меридиана. Угол  $\alpha$  между магнитным и географическим меридианами называется магнитным склонением. Значения индукции магнитного поля  $\vec{B}$  Земли невелики и меняются от  $0,42 \cdot 10^{-4}$  Тл на экваторе до  $0,7 \cdot 10^{-4}$  Тл около магнитных полюсов.

Вектор индукции магнитного поля Земли можно разложить на две составляющие: горизонтальную  $\vec{B}_H$  и вертикальную  $\vec{B}_V$ . Закрепленная на вертикальной оси магнитная стрелка устанавливается в направлении горизонтальной составляющей магнитного поля Земли –  $\vec{B}_H$ . Магнитное наклонение  $\theta$ ; магнитное склонение  $\alpha$  и горизонтальная составляющая  $\vec{B}_H$  являются основными параметрами магнитного поля Земли.

Горизонтальную составляющую магнитного поля Земли определяют с помощью прибора, который называется тангенс-гальванометр. Схематическое устройство прибора показано на рисунке 7.4. Он состоит из катушки – нескольких круговых проводников, размещенных вертикально в плоскости магнитного меридиана (диаметр катушки и количество витков указывается на приборе). В центре размещается магнитная стрелка. Она должна быть небольшой, чтобы можно было считать индукцию магнитного поля в пределах стрелки равной индукции в центре кругового витка с током.



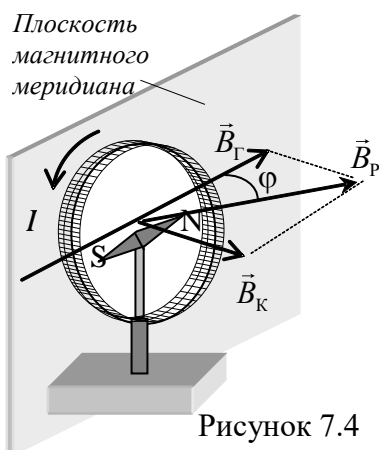


Рисунок 7.4

Плоскость контура устанавливается перпендикулярно горизонтальной плоскости так, чтобы она совпала с направлением магнитной стрелки  $N-S$ . Ток  $I$ , который протекает по контуру, создает магнитное поле, которое действует на магнитную стрелку. Направление вектора индукции магнитного поля, созданного катушкой с током, определяется **правилом «буравчика»**: если направление вращения ручки «буравчика» (правого винта) совпадает с направлением тока в рамке, то поступательное движение «буравчика» покажет направление вектора индукции магнитного поля. Вектор индукции магнитного поля катушки  $\vec{B}_к$  направлен перпендикулярно горизонтальной составляющей поля Земли  $\vec{B}_Г$ . В результате, на магнитную стрелку  $N-S$  бу-

дут действовать сразу два магнитных поля: поле Земли и поле, созданное катушкой с током. Согласно **принципу суперпозиции**, вектор индукции результирующего магнитного поля есть векторная сумма векторов индукции всех полей. При сложении индукции горизонтальной составляющей магнитного поля Земли  $\vec{B}_Г$  и индукции магнитного поля катушки с током  $\vec{B}_к$  возникает индукция результирующего магнитного поля  $\vec{B}_р$ , действующая на магнитную стрелку. Вектор  $\vec{B}_р$  направлен под углом  $\varphi$  к плоскости магнитного меридиана. В результате, на магнитную стрелку действует вращающий момент, который поворачивает – ориентирует магнитную стрелку по направлению вектора результирующего магнитного поля  $\vec{B}_р$ .

Из рисунка 7.4 видно, что: 
$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{|\vec{B}_к|}{|\vec{B}_Г|}. \quad (7.2)$$

Индукция магнитного поля контура  $B_к$  в центре кругового витка равна:

$$B_к = \mu_0 \frac{nI}{2R}, \quad (7.3)$$

где  $n$  – количество витков контура;  $I$  – сила тока, который протекает в контуре;  $R$  – радиус контура;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

Из (7.2) и (7.3) находим, что: 
$$B_Г = \mu_0 \frac{nI}{2R \cdot \operatorname{tg}\varphi}. \quad (7.4)$$

Необходимо помнить, что формула (7.4) является приближительной, т.е. верной только в том случае, если размер магнитной стрелки много меньше радиуса катушки  $R$ . Наименьшая погрешность при измерениях получается при углах отклонения стрелки  $\varphi = 45^\circ$ .

### Порядок выполнения работы

1. Собрать рабочую схему (Рис. 7.5).
2. Установить плоскость катушки в плоскости магнитного меридиана (по направлению магнитной стрелки компаса).
3. Переключателем  $S$  подключить цепь к источнику тока и измерить величину силы тока  $I$ .
4. После успокоения стрелки компаса отсчитать на его шкале угол  $\varphi_1$ .
5. Изменить направление тока в катушке с помощью переключателя  $S$ , подождать успокоения стрелки компаса и отсчитать по его шкале угол  $\varphi_2$ .

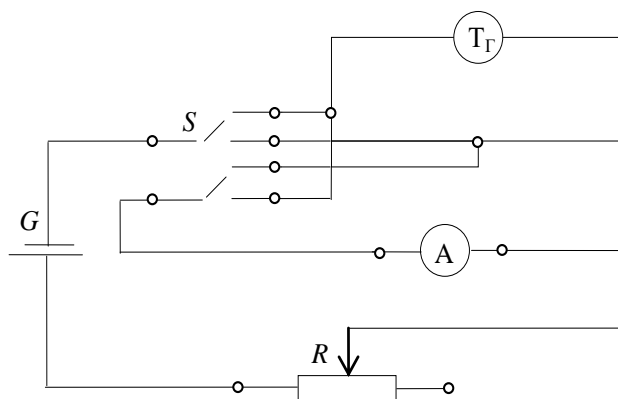


Рисунок 7.5

6. Найти среднее значение угла отклонения  $\varphi$  при данном значении силы тока:

$$\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}. \quad (7.5)$$

7. По формуле (7.4) найти значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли, где  $R=0,075$  м – радиус витков катушки;  $n=200$  – количество витков.

8. Измерения повторить еще два раза при других значениях тока, изменяя положением движка реостата  $R$ .

9. Найти среднее значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли  $B_{\Gamma}$ . Произвести расчет абсолютной и относительной погрешностей измерений.

10. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 7.1.

11. На основании анализа относительной погрешности сделать вывод, при каких значения угла отклонения магнитной стрелки точность определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли наибольшая и почему?

Таблица 7.1.

$N$	$I$ , А	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi$	$B_{\Gamma}$ , мТл	$\langle B_{\Gamma} \rangle$ , мТл	$\Delta B_{\Gamma}$ , мТл	$\langle \Delta B_{\Gamma} \rangle$ , мТл	$\frac{\langle \Delta B_{\Gamma} \rangle}{\langle B_{\Gamma} \rangle} 100\%$
1									
2									
3									

**Вывод:**

### Контрольные вопросы

1. Что такое магнитное поле? Что является источником магнитного поля? Нарисуйте магнитное поле постоянного магнита, Земли. Как направлены силовые линии магнитного поля?
2. Запишите и сформулируйте закон Ампера для проводника с током в магнитном поле. Как определяется направление силы Ампера?
3. Запишите и сформулируйте определение вектора индукции магнитного поля. Как он направлен по отношению к силовым линиям? Как определить направление индукции магнитного поля, созданного катушкой с током?
4. Что такое однородное и неоднородное магнитное поле? Приведите их примеры.
5. Как можно определить плоскость магнитного меридиана Земли?
6. Нарисуйте рис.8.4, объясните методику проведения опыта и на основании принципа суперпозиции получите формулу для вычисления горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

## Лабораторная работа № 8

### Определение коэффициента трансформации и коэффициента полезного действия трансформатора

**Цель работы:** Изучить физические основы трансформатора, познакомиться с устройством и приближенной теорией трансформатора.

**Оборудование:** школьный трансформатор, два вольтметра (0–250В, 0–15В), два амперметра (0–1 А, 0–5А), реостат.

#### Теория работы

1. *Назначение трансформатора.* Для многих технических и лабораторных целей необходимо использовать более высокие и более низкие напряжения, чем те, которые могут быть получены генераторами тока. Преобразование напряжений осуществляется с помощью трансформаторов. Они играют огромную роль в современной электротехнике. Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

При передаче электроэнергии от электрических генераторов к потребителям происходят потери энергии в проводах на выделение тепла Джоуля-Ленца, пропорциональные квадрату тока. Мощность тепловых потерь

$$Q = I^2 R. \quad (8.1)$$

Поэтому для уменьшения вредных потерь электроэнергии выгодно использовать высокие напряжения и соответственно малые токи. Осуществляется это с помощью повышающих трансформаторов, преобразующих низкое напряжение генераторов в высокое. В местах потребления электроэнергии ток высокого напряжения преобразуется с помощью понижающих трансформаторов в токи низкого напряжения (220В, 110В и др.). В настоящее время с увеличением длины линий, передающих напряжение, напряжение в линии электропередачи переменного тока может достигать 1150В.

Впервые трансформаторы были изобретены и использовались на практике русскими электротехниками П.Н.Яблочковым (1876) и И.Ф.Усагиным (1882).

2. *Физические основы трансформатора.* Физической основой работы трансформатора служит явление электромагнитной индукции, открытое английским физиком М.Фарадеем в 1831 году.

Принципиальная схема трансформатора имеет следующий вид (рис.8.1). На замкнутый сердечник (магнитопровод), изготовленный из мягкого железа или иного магнито-мягкого ферромагнетика, надеты две катушки.

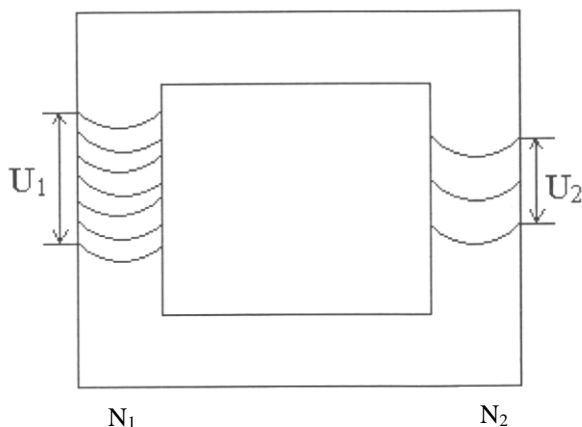


Рисунок 8.1

Концы первичной катушки, содержащей  $N_1$  витков (вход трансформатора), подключены к сети питающего переменного тока, а концы вторичной катушки, имеющей  $N_2$  витков (выход) — к потребителю электрической энергии. Переменный ток, текущий в первичной обмотке, изменяется

$$i = i_0 \sin \omega t, \quad (8.2)$$

где  $i$  — мгновенное значение тока,  $i_0$  — максимальное (амплитудное) значение тока,  $\omega$  — угловая частота переменного тока.

Ток создает переменное магнитное поле, которое намагничивает сердечник. Если намагничение сердечника далеко от насыщения, то магнитный поток в нем так же будет изменяться по синусоидальному закону.

$$\Phi = \Phi_0 \sin \omega t \quad (8.3)$$

где  $\Phi$  – мгновенное значение потока,  $\Phi_0$  – максимальное мгновенное значение потока (его амплитуда). Будем считать, что магнитный поток полностью проходит внутри сердечника. В таком случае один и тот же поток, меняющийся по закону (3), пронизывает витки обеих катушек. В первичной катушке он вызывает появление ЭДС самоиндукции  $\varepsilon_1$ . Т.к. для каждого витка ЭДС самоиндукции равна  $-\frac{d\Phi}{dt}$ , то

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (8.4)$$

Аналогично во вторичной катушке будет взаимодействовать ЭДС взаимной индукции

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (8.5)$$

3. *Коэффициент трансформации.* Пусть цепь вторичной катушки разомкнута (режим холостого хода). Применяя к первичной катушке трансформатора закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС, найдем напряжение на входе трансформатора:

$$U_1 = i_1 R_1 - i_2 R_2 + \frac{d\Phi}{dt} N_1, \quad (8.6)$$

где  $i_1$  – сила тока в первичной катушке,  $R_1$  – ее сопротивление.

Обычно у трансформаторов в режиме холостого хода коэффициент самоиндукции первичной катушки велик, и ЭДС самоиндукции  $\varepsilon_1, i_1, R_1$ , поэтому напряжение на входе трансформатора:

$$U_1 = -\varepsilon_1 = \frac{d\Phi}{dt} N_1, \quad (8.7)$$

Т.к.  $i_2 = 0$  (ток в цепи второй катушки), то на концах вторичной катушки возникает напряжение ЭДС взаимной индукции

$$U_2 = -\varepsilon_2 = \frac{d\Phi}{dt} N_2. \quad (8.8)$$

Учитывая уравнения (8.7) и (8.8) получим:

$$\eta = \frac{U_2 i_2}{U_1 i_1} \left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{N_2}{N_1} = K, \quad (8.9)$$

где  $\frac{N_2}{N_1} = K$  называется коэффициентом трансформации.

Он показывает во сколько раз вторичное напряжение больше первичного напряжения в режиме холостого хода.

4. *К.П.Д. трансформатора.* При замыкании цепи вторичной катушки индуцируемый в ней ток создает свое магнитное поле, компенсирующее по правилу Ленца магнитное поле первичной катушки. Это ведет к возрастанию тока. Таким образом, мощность, потребляемая в первичной цепи, зависит от мощности, которая берется во вторичной цепи. Вредные потери энергии в трансформаторе идут на выделение тепла Джоуля-Ленца в витках катушек, на рассеяние магнитного поля, на вихревые токи в сердечнике и на работу перемагничивания, обусловленную гистерезисом сердечника. Для уменьшения роли двух последних причин сердечники трансформаторов делают из магнито-мягких ферромагнитных листов, разделенных изолирующими слоями. В современных трансформаторах потери удается снизить до 2% от общей мощности.

К.п.д. трансформатора определяется соотношением:

$$\eta = \frac{U_2 i_2}{U_1 i_1}, \quad (8.10)$$

где  $U_2 i_2$  – мощность, расходуемая во вторичной цепи,  $U_1 i_1$  – мощность, потребляемая в первичной цепи.

Рассмотренная теория трансформатора является приближенной. Более строгая теория рассматривается в электротехнике.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рисунок 8.2.)

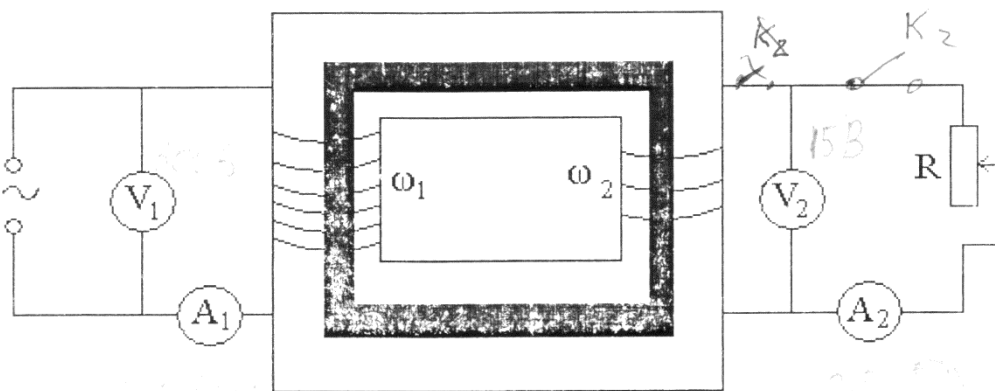


Рисунок 8.2

2. Замкните ключ  $K_1$ , не замыкая ключ  $K_2$ , снимите показания вольтметров  $U_1$  и  $U_2$ .
3. Определите коэффициент трансформации по формуле (8.9).
4. Введите полностью реостат, замкните ключ  $K_2$ .
5. Изменяя сопротивление реостата, запишите 8–10 показаний токов и напряжений в первичной и вторичной цепях.
6. Определите к.п.д. трансформатора по формуле (8.10).
7. Постройте график зависимости  $i_1 = \Phi(i_2)$ , откладывая в одинаковом масштабе на горизонтальной оси значение тока  $i_2$ , и на вертикальной  $i_1$ . Данные занесите в таблицу 8.1.

Таблица 8.1

$J_1$	$U_1$	$J_2$	$U_2$	$K$	$\eta$

### Контрольные вопросы

1. Расскажите принцип устройства трансформатора. Какой трансформатор называют повышающим, а какой понижающим?
2. Какое физическое явление лежит в основе работы трансформатора? Объясните подробно возникновение ЭДС в катушках трансформатора. Почему нельзя трансформировать постоянный ток?
3. Какова роль сердечника трансформатора?
4. Почему сердечник изготавливается из отдельных листов магнитомягкого ферромагнетика, разделенных слоем диэлектрика?
5. Как приближенно определяется коэффициент трансформации?
6. Как определить к.п.д. трансформатора? Укажите причины потерь энергии при работе трансформатора.
7. Изменяет ли трансформатор частоту преобразуемого переменного тока?

## Лабораторная работа № 9 Исследование явления гистерезиса ферромагнетиков осциллографическим методом

**Цель работы:** получить с помощью осциллографа кривую намагничивания и петлю гистерезиса для ферромагнетиков, определить коэрцитивную напряженность магнитного поля, остаточную индукцию и индукцию насыщения.

**Оборудование:** источник переменного напряжения, трансформатор с двумя обмотками с исследуемым образцом ферромагнетика, два резистора, конденсатор, осциллограф.

### Теория работы и описание установки

Все предметы являются магнетиками потому, что тем или иным способом реагируют на внешнее магнитное поле. Если магнетик поместить в внешнее магнитное поле  $\vec{B}_0$ , то в нем возникает дополнительное поле с индукцией  $\vec{B}'$ , которое будет накладываться на первоначальное поле.

Индукция магнитного поля внутри магнетика

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \quad (9.1)$$

Намагничивание предмета характеризуется вектором, который называется намагниченностью:

$$\vec{I}_m = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V}, \quad (9.2)$$

где  $\Delta V$  – физически бесконечно малый объем в окрестности рассматриваемой точки, а  $\vec{p}_m$  – магнитный момент отдельной молекулы.

В любом случае индукция магнитного поля

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{I}_m, \quad (9.3)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Гн/м}$ ),  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля,  $\vec{I}_m$  – намагниченность предмета.

В общем случае направление векторов  $\vec{H}$  и  $\vec{I}_m$  может не совпадать, но у большинства предметов намагниченность не зависит от направления магнитного поля. Для изотропного однородного магнетика

$$\vec{I}_m = \chi_m \vec{H}, \quad (9.4)$$

где  $\chi_m$  – магнитная восприимчивость.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi_m \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H}, \quad (9.5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (9.6)$$

где  $\mu = 1 + \chi_m$  – магнитная проницаемость предмета.

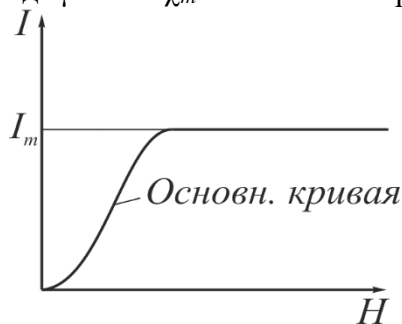


Рисунок 9.1

Материалы, у которых  $\vec{B}$  совпадает по направлению с  $\vec{B}'$ , называются парамагнетиками (Al, Sn, Mn и др.). У них  $\chi_m > 0$ , а  $\mu > 1$ . Материалы, у которых  $\vec{B}$  и  $\vec{B}'$  противоположны по направлению, называются диамагнетиками (Cu, Pb, Zn, и др.). У них  $\chi_m < 0$ , а  $\mu < 1$ .

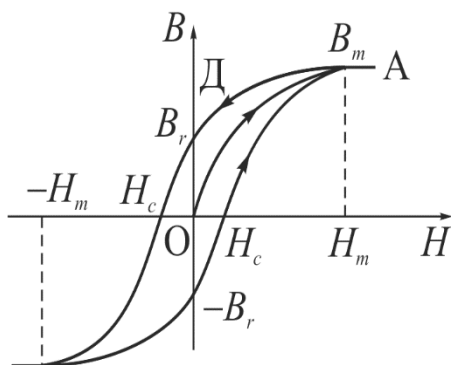


Рисунок 9.2

Среди парамагнетиков есть предметы, которые могут быть намагничены даже при отсутствии внешнего поля. По своему наиболее распространенному представителю – железу, они и получили название ферромагнетиков. К ним относятся железо, никель, кобальт, гадолиний, их сплавы и соединения, а также некоторые сплавы и соединения марганца и хрома с неферромагнитными элементами. У ферромагнетиков  $\chi_m > 0$ , а  $\mu \gg 1$ . Намагниченность пара- и диамагнетиков меняется с напряженностью поля линейно, у ферромагнетиков эта зависимость более сложная (рис. 9.1). Уже при напряженности поля порядка 100 А/м намагничивание достигает насыщения.

Кроме нелинейной зависимости между  $\vec{H}$  и  $\vec{I}_m$  (или  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ ), для ферромагнетиков характерно явление гистерезиса. Если не намагниченный ферромагнетик поместить во внешнее магнитное поле, которое последовательно будем увеличивать от нуля до  $H_m$ , то зависимость  $B=f(H)$  выразится кривой ОА (рис. 9.2), которая называется первоначальной, или основной кривой намагничивания. Если намагничивание довести до насыщения (точка А, рис.9.2), а потом уменьшать напряженность магнитного поля, то изменение магнитной индукции  $\vec{B}$  будет происходить по кривой АД, которая не совпадает с АО. При  $H=0$  магнитная индукция имеет значение ОД, которое называется остаточной индукцией  $B_r$ .

Для того, чтобы индукция  $B$  была равна нулю, необходимо приложить поле противоположного направления напряженностью  $H_c$ . Это значение напряженности называется коэрцитивным полем.

При дальнейшем увеличении напряженности поля до  $(-H_m)$  ферромагнетик намагнитится в противоположном направлении до насыщения  $(-B_m)$ . Если напряженность поля снова уменьшить до нуля, то получим остаточную индукцию  $(-B_r)$ . При дальнейшем увеличении  $H$  индукция снова достигнет значения  $B_m$ . Замкнутая кривая  $B=f(H)$  называется петлей гистерезиса.

Петлю гистерезиса можно наблюдать на экране осциллографа, если на вертикально отклоняющие пластины подавать напряжение  $U_y$ , пропорциональное индукции  $B$ , а на горизонтально отклоняющие –  $U_x$ , пропорциональное напряженности магнитного поля  $H$ .

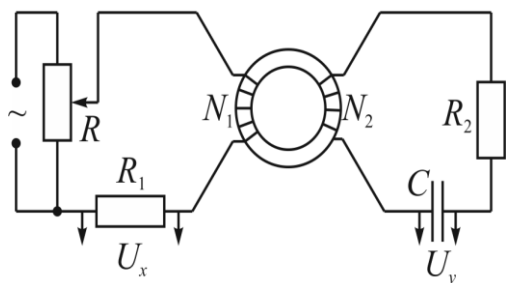


Рисунок 9.3

Принципиальная схема установки приведена на рисунке 9.3. Исследуемый ферромагнитный образец имеет форму тора. На нем намотаны две обмотки – первая  $N_1$  и вторая  $N_2$ .

Переменный ток, что проходит через первую обмотку  $N_1$  создает магнитное поле, напряженность которого

$$H = n_1 i, \quad (9.8)$$

где  $n_1$  – число витков на единицу длины исследуемого образца.

Напряжение  $U_x$ , что подается на горизонтально отклоняющие пластины осциллогра-

фа  $U_x = R_1 i$  или, с учетом (9.8):

$$U_x = \frac{R_1}{n_1} H. \quad (9.9)$$



Таким образом, на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение  $U_x \sim H$ .

При прохождении переменного тока в первой обмотке, в другой возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (9.10)$$

где  $\Phi = N_2 SB$  – поток вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ ,  $S$  – площадь сечения исследуемого образца,  $N_2$  – число витков второй обмотки, в которой возникает ток  $i = \frac{\varepsilon}{R_2 + R_C}$ , где

$R_C = \frac{1}{(\omega C)^2}$  – емкостное сопротивление конденсатора. При условии, что  $R_2 \gg R_C$  можно

записать:  $i = \varepsilon/R_2$ , а с учетом (9.10):

$$i = \frac{N_2 S dB}{R_2 dt}. \quad (9.11)$$

Очевидно, что  $U_y = U_C = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t i dt$ , или с учётом (9.11)

$$U_y = \frac{N_2 S}{R_2 C} \int_0^B dB = \frac{N_2 S}{R_2 C} B, \quad (9.12)$$

это значит, что на вертикально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение  $U_y$  пропорционально  $B$ .

Таким образом, если использовать схему как на рисунке 9.3, на экране осциллографа можно наблюдать петлю гистерезиса  $B=f(H)$ . Если с помощью потенциометра  $R$  увеличивать напряжение, подводимое к обмотке  $N_1$ , то будет увеличиваться амплитуда колебаний напряженности поля  $H$  и на экране осциллографа последовательная очередь разных по своим размерам петель гистерезиса. Верхняя точка этих петель гистерезиса находится на начальной кривой намагничивания. Для того чтобы построить кривую намагничивания, нужно с помощью цифрового вольтметра определить  $U_x$  и  $U_y$  и высчитать значения  $H$  и  $B$ , пользуясь формулами (9.9) и (9.12):

$$H = \frac{U_x}{n_1 R_1} = \frac{N_1}{l R_1} U_x, \quad (9.13)$$

где  $N_1$  – число витков первичной обмотки,  $l$  – длина исследуемого образца;

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y. \quad (9.14)$$

Только нужно иметь в виду, что в формулах (9.13) и (9.14)  $U_x$  и  $U_y$  – амплитудные значения переменного напряжения, а цифровой вольтметр показывает их эффективные значения.

Именно поэтому выражения (9.13) и (9.14) необходимо записывать в виде:

$$H = \sqrt{2} \frac{N_1}{l R_1} U_x, \quad (9.15)$$

$$B = \sqrt{2} \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y, \quad (9.16)$$

где  $U_x$  и  $U_y$  – показания вольтметров  $V_1$  и  $V_2$ .

### Порядок выполнения работы

1. Соберите цепь согласно с рисунком 9.4.

2. Включите в цепь цифровые электронные приборы Щ-4313 и М-890G и подготовьте их к измерению напряжений до 5 и 2 В соответственно.

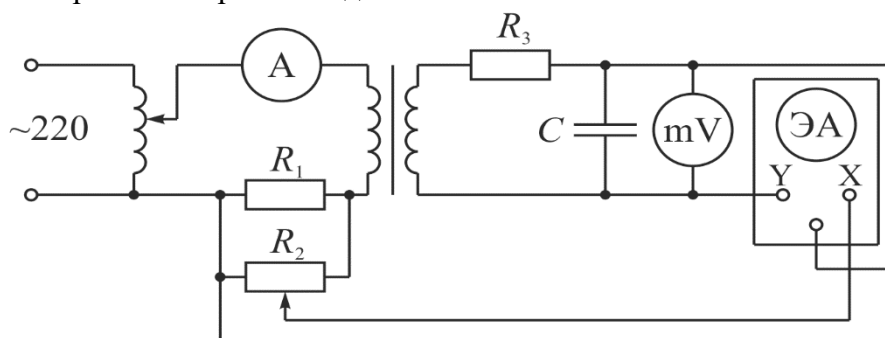


Рисунок 9.4

3. Установите ручку источника питания ВС-24М в крайнее левое положение.
4. Подайте на намагничивающую обмотку  $N_1$  трансформатора напряжение 20–25 В, получите петлю гистерезиса, добейтесь чтобы она занимала почти весь экран.
5. Уменьшите напряжение  $U$ , что подведено к намагничивающей обмотке  $N_1$ , до нуля и затем последовательно увеличивать его до максимального значения. Через каждые 1–2 В записывайте показания вольтметров (Щ-4313 и М-890G)  $U_x$  и  $U_y$ . Результаты измерений запишите в таблицу 9.1.
6. Пользуясь формулами (9.15), (9.16) и (9.7), вычислите  $H$ ,  $B$  и  $\mu$  и запишите их значения в таблицу 9.1.

Таблица 9.1

$U$ , В	$U_x$ , В	$U_y$ , В	$H$ , А/м	$B$ , Тл	$\mu$

7. Постройте графики  $B=f(H)$  и  $\mu=f(H)$ .

### Контрольные вопросы

1. Какие вещества называют пара-, диа- и ферромагнетиками?
2. Назовите характерные особенности ферромагнетиков.
3. Что такое магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость вещества?
4. Укажите на кривой  $B=f(H)$  область максимального значения  $\mu$ .
5. В чем сущность явления гистерезиса?
6. Почему отклонение электронного луча на экране осциллографа по горизонтали пропорционально  $H$ ?
7. Что называется коэрцитивным полем?
8. Какие ферромагнетики называются мягкими и жесткими и где они используются?
9. Почему отклонение электронного луча на экране осциллографа пропорционально  $B$ ?
10. Можно ли в этой работе определить величину коэрцитивного поля и остаточную индукцию?

## Литература

1. Ташлыкова-Бушкевич, И.И. Физика: учеб. пособие для студ. технических спец. учреждений, обеспечивающих получение высш. образования: в 2 ч. Ч. 1 : Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество и магнетизм / И.И. Ташлыкова-Бушкевич. – 2-е изд., испр. – Минск : АСАР, 2010. – 287 с.
2. Ташлыкова-Бушкевич, И.И. Физика: учеб. пособие для студ. учреждений, обеспечивающих получение высш. образования по техническим спец.: в 2 ч. Ч. 2: Оптика. Квантовая физика. Строение и физические свойства вещества / И.И. Ташлыкова-Бушкевич. – 2-е изд., испр. – Минск: АСАР, 2010. – 236 с.
3. Общая физика. Практикум: учеб. пособие для студ. физико-мат. спец. учреждений, обеспечивающих получение высш. пед. образования / В. А. Бондарь [и др.]; под общ. ред. В.А. Яковенко. – Минск: Выш. шк., 2008. – 572 с.
4. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электродинамика: рабочая тетрадь для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика» студентами математического факультета. / И.Ф. Кашевич [и др.]. – Витебск: Изд-во УО «ВГУ им. П.М. Машерова», 2011. – 50 с.
5. Электричество: лабораторный практикум по дисциплине «Физика» для студентов физического факультета / В.И. Жидкевич. – Витебск: ВГУ имени П.М. Машерова, 2013. – 73 с.
6. Электродинамика. Оптика. Квантово-оптические явления: рабочая тетрадь для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика» студентами биологического факультета / О.В. Пышненко [и др.]. – Витебск: УО «ВГУ им. П.М. Машерова», 2010. – 75 с.

Учебное издание

**ОБЩАЯ ФИЗИКА (ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ)**

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Составители:

**КАШЕВИЧ** Ирина Федоровна

**САПЕЛКО** Татьяна Ивановна

Технический редактор

*Г.В. Разбоева*

Компьютерный дизайн

*Л.Р. Жигунова*

Подписано в печать 2021. Формат 60x84<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2,99. Тираж экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение – учреждение образования  
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

Свидетельство о государственной регистрации в качестве издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/255 от 31.03.2014.

Отпечатано на ризографе учреждения образования  
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

210038, г. Витебск, Московский проспект, 33.