

Кафедра физики

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине

« Ф И З И К А »

Раздел

«Электричество и магнетизм»

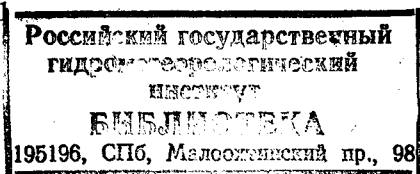
курс 2

Для направлений: Гидрометеорология
Экология и природопользование
Физика



Санкт-Петербург

2001



УДК 530.1

Одобрено методической комиссией РГГМУ

Лабораторный практикум по дисциплине «Физика». Раздел «Электричество и магнетизм» – СПб.: Изд. РГГМУ, 2001 – 100 с.

Составители: Н.В. Дьяченко, Е.Н. Бодунов, И.П. Арешев, С.А. Фокин, М.А. Мамаев, В.В. Косцов.

Ответственный редактор: А.П. Бобровский

Настоящее учебное пособие содержит описания 11 лабораторных работ по разделу: «Электричество и магнетизм» курса общей физики.

Цель данного учебного пособия – оказать помощь студентам в изучении курса физики. Каждая лабораторная работа рассчитана на два академических часа. Студент допускается к выполнению лабораторной работы после самостоятельного домашнего изучения необходимых сведений из теории, ознакомления с существом и порядком выполнения основных операций, и только при наличии должным образом оформленного рабочего журнала с формулами для обработки результатов измерений физических величин [1]. Выполнив измерения и произведя необходимые расчеты, студент оформляет отчет, который представляет преподавателю. При этом студент должен показать понимание физического содержания проведенных измерений и дать оценку их достоверности.

Лабораторный практикум предназначен для студентов первого курса факультетов: метеорологического, гидрологического, океанологического, экологии и физики природной среды.

[1] С.А.Фокин, А.М.Бармасова, М.А.Мамаев, Т.Ю.Яковлева. Обработка результатов измерений физических величин. Учебное пособие для лабораторного практикума по общей физике // СПб.: РГГМУ. – 1999. – 63 с.

Лабораторная работа № 201

ИЗУЧЕНИЕ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Задачи работы

1.1. Проверка выполнения 2-го закона Кирхгофа для цепи переменного тока.

1.2. Измерение реактивных (X_L и X_C) и активного (R) сопротивлений элементов цепи.

1.3. Измерение величин индуктивности катушки (L) и ёмкости конденсатора (C).

1.4. Измерение полного импеданса цепи (Z).

1.5. Измерение величины $\cos \varphi$.

1.6. Измерение мощности, выделяющейся во внешней цепи P .

ПРИМЕЧАНИЕ. В данной работе из величин Z , P и $\cos \varphi$ (пп. 1.4–1.6) следует измерять только две, предусмотренные индивидуальным заданием. Перед началом подготовки к работе получите номер своего варианта и запишите в рабочий журнал его содержание.

2. Предварительные сведения

Мгновенное значение переменного тока i , применяемого в народном хозяйстве, можно записать в виде

$$i = I_m \sin(2\pi ft + \varphi_0) \quad (1)$$

где I_m – амплитудное значение переменного тока,

f – частота переменного тока,

φ_0 – начальное значение фазы колебаний. В дальнейшем будем полагать, что $\varphi_0 = 0$.

Всякая реальная электрическая цепь состоит из сопротивлений, катушек и конденсаторов. Механизм прохождения переменного электрического тока через каждый из этих элементов различен и поэтому расчёт напряжения на этих элементах ведётся не только с использованием закона Ома, но и других физических законов.

При прохождении переменного тока через активное сопротивление R мгновенное напряжение на нём U_R можно определить по формуле

$$U_R = i R. \quad (2)$$

Подставляя в формулу (2) выражение (1), получим:

$$U_R = I_m R \sin 2\pi ft = U_{Rm} \sin 2\pi ft \quad (3)$$

где U_{Rm} — амплитудное значение напряжения U_R .

При сравнении уравнений (1) и (3) можно заметить, что напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с силой тока, протекающего через него. Мгновенное напряжение U_L переменного тока на катушке с индуктивностью L рассчитывается по формуле:

$$U_L = L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

Подставляя в формулу (4) выражение (1), получим:

$$U_L = 2\pi f L I_m \cos 2\pi ft = U_{Lm} \cos 2\pi ft = U_{Lm} \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

где U_{Lm} — амплитудное значение напряжения U_L .

При сравнении уравнений (1) и (5) можно заметить, что напряжение на катушке сдвинуто по фазе на $\pi/2$ относительно силы тока и опережает его.

Мгновенное напряжение U_C на конденсаторе емкостью C можно рассчитать по формуле

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t i \cdot dt \quad (6)$$

Подставляя в формулу (6) выражение (1), получим:

$$U_C = -\frac{I_m}{2\pi f C} \cos 2\pi ft = -U_{Cm} \cos 2\pi ft = U_{Cm} \sin\left(2\pi ft - \frac{\pi}{2}\right) \quad (7)$$

где U_{Cm} — амплитудное значение напряжения U_C .

Сравнивая уравнения (1) и (7) между собой, можно заметить, что напряжение на конденсаторе сдвинуто по фазе на $\pi/2$ относительно тока и отстает от него.

Элементы электрической цепи, для которых имеет место сдвиг фаз между током и напряжением, называются реактивными сопротивлениями в отличие от активного сопротивления, у которого нет сдвига фаз. В дальнейшем будем рассматривать сдвиг по фазе напряжения на реактивном сопротивлении (L или C) относительно напряжения на активном сопротивлении (R), которое, как уже указывалось, совпадает по фазе с силой тока.

Измеряя амплитудные значения силы тока и напряжения, а также используя уравнение (3), можно определить величину R по формуле

$$R = U_{Rm} / I_m \quad (8)$$

Аналогично из уравнения (5) можно найти величину индуктивного сопротивления X_L

$$X_L = U_{Lm} / I_m \quad (9)$$

и из уравнения (7) – величину ёмкостного сопротивления X_C :

$$X_C = U_{Cm} / I_m \quad (10)$$

Обращаем внимание на то, что величины X_L и X_C связывают между собой амплитудные (но не мгновенные) значения силы тока и напряжения. Величины индуктивного и ёмкостного сопротивлений измеряются, подобно активному сопротивлению, в Омах. Зная величины X_L и X_C из уравнений (5), (7) и (10), можно найти такие параметры элементов цепи как ёмкость конденсатора C и индуктивность катушки L

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (11)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (12)$$

Если переменный ток является квазистационарным (для сетевого тока это условие выполняется всегда), то для мгновенных значений силы тока и напряжения выполняются законы Кирхгофа (см. описание работы №224). Так, например, для цепи, изображённой на рис.1, второй закон Кирхгофа можно записать в виде

$$U = U_L + U_R + U_C \quad (13)$$

где U_L , U_R , U_C – мгновенные напряжения на катушке, сопротивлении и конденсаторе соответственно,

U – мгновенное напряжение на входе электрической цепи (сетевое напряжение).

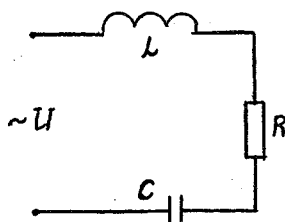


Рис. 1. Последовательное соединение элементов цепи переменного тока

Отсюда следует, что для амплитудных значений

$$U_m = U_{Lm} + U_{Rm} + U_{Cm}.$$

Математический вывод второго закона Кирхгофа для цепи переменного тока достаточно сложен из-за необходимости учёта фазовых сдвигов, поэтому обычно вывод этого закона проводят графически, построением векторной диаграммы (рис. 2).

При построении такой диаграммы мгновенное напряжение переменного тока на каждом элементе изображается вектором, длина которого равна амплитудному значению напряжения на рассматриваемом элементе цепи, а направление вектора такое, что угол между вектором и осью X равен фазовому сдвигу напряжения на рассматриваемом элементе.

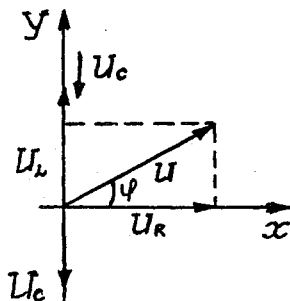


Рис. 2. Векторная диаграмма для цепи, изображённой на рис. 1

В начальный момент времени ($t = 0$) вектор U_R направлен вдоль оси X, вектор U_L повернут относительно U_R на $\pi/2$ и опережает его. Следовательно, в начальный момент времени направление вектора U_L совпадает с положительным направлением оси Y. Вектор U_C также

повёрнут относительно U_R на $\pi/2$, но отстаёт от него; таким образом, направление вектора U_C совпадает с отрицательным направлением оси Y . Внешнее напряжение U можно рассчитать, если найти векторную сумму векторов U_R , U_C и U_L . Длина этого вектора равна амплитуде внешнего напряжения, подаваемого на схему, а величина проекции вектора U на ось X равна мгновенному значению U в начальный момент времени. Мгновенное значение величины входного напряжения в любой момент времени можно определить по формуле

$$U = U_m \sin(2\pi ft + \varphi_0) \quad (14)$$

где φ_0 — начальный сдвиг фазы входного напряжения относительно напряжения на сопротивлении.

Как видно из рис.2, амплитудные значения напряжения на элементах цепи (рис.1) и внешнего напряжения связаны соотношением:

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2} \quad (15)$$

которое является следствием второго закона Кирхгофа для амплитудных значений напряжений в цепи переменного тока. Из рис. 2 можно также найти начальный сдвиг фазы входного напряжения относительно напряжения на активном сопротивлении; обычно определяют не сам угол φ_0 , а его функцию $\cos \varphi_0$.

$$\cos \varphi = \frac{U_{Rm}}{U_m} \quad (16)$$

Если разделить уравнение (15) на величину I_m , то получим

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (17)$$

Величина Z называется импедансом цепи и имеет смысл полного сопротивления цепи, изображённой на рис.1. Мгновенное значение мощности, выделяющейся в цепи переменного тока, можно рассчитать по формуле

$$P = iU \quad (18)$$

если в неё подставить выражения (1) и (14). Практический интерес представляет среднее по времени значение мощности $\bar{P}$, которое рассчитывается как среднее значение мощности за один период:

$$\begin{aligned}\bar{P} &= \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{1}{T} \int_0^T i U dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_m U_m \sin(2\pi ft) \sin(2\pi ft + \varphi_0) dt = \\ &= I_m U_m \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{\cos \varphi}{2} - \frac{\cos(4\pi ft + \varphi_0)}{2} \right] dt = I_m \frac{U_m}{2} \cos \varphi_0\end{aligned}\quad (19)$$

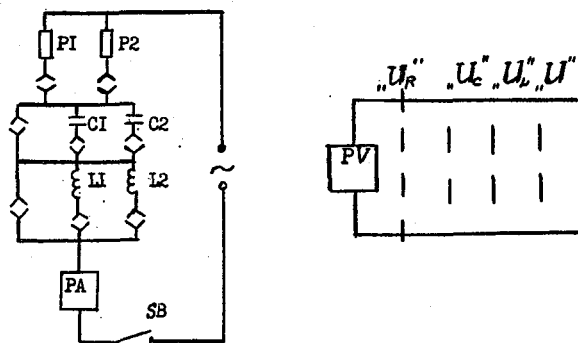
3. Метод исследования и описание установки

В настоящей работе необходимо собрать электрическую цепь в соответствии со своим индивидуальным заданием, измерить амплитудное значение силы тока в цепи, амплитудные значения напряжения на элементах цепи и внешнего напряжения. Схема лабораторной установки приведена на рис. 3. Она состоит из набора элементов (R , L и C) и двух электроизмерительных приборов: миллиамперметра и вольтметра. Электрическая схема собирается из элементов с помощью штекеров-перемычек, соединяющих данные элементы между собой. Если в гнезде нет штекера, то в данном месте цепь разомкнута. Миллиамперметр включён в цепь постоянно, подключение вольтметра к элементам цепи осуществляется с помощью переключателя, выведенного на переднюю панель. На переднюю панель выведен кнопочный выключатель, который в исходном положении размыкает электрическую цепь. При проведении измерений электрическую цепь следует подключать к внешнему источнику, при этом кнопку следует нажать и не отпускать до окончания измерения.

Следует отметить, что электроизмерительные приборы позволяют определить эффективные значения измеряемых величин, которые для синусоидальных токов связаны с амплитудными следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}I_3^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(2\pi ft) dt \\ U_3^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T U^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \sin^2(2\pi ft) dt \\ I_m &= \sqrt{2} I_3, \\ U_m &= \sqrt{2} U_3,\end{aligned}\quad \begin{matrix} (20) \\ (21) \end{matrix}$$

Перед началом работы следует узнать у преподавателя, какой вариант схемы следует собрать.



R1, R2 – сопротивления;
C1, C2 – конденсаторы;
L1, L2 – катушки;
PA – амперметр;
PV – вольтметр;
SB – кнопочный выключатель.

Рис. 3. Принципиальная схема лабораторной установки

4. Порядок выполнения работы

- 4.1. Получив индивидуальное задание у преподавателя, собрать соответствующую электрическую схему.
- 4.2. После проверки схемы лаборантом включить её в сеть.
- 4.3. Измерить силу тока в цепи I_3 .
- 4.4. Измерить напряжение на всех элементах цепи (U_{3R} , U_{3C} , U_{3L}) и суммарное напряжение во всей цепи (U_3).
- 4.5. Измерить частоту переменного тока f в цепи.
- 4.6. Результаты измерений записать в таблицу.

Таблица 1

Результаты измерений					
I_3 , мА	U_{3C} , В	U_{3L} , В	U_{3R} , В	U_3 , В	f , Гц

5. Обработка результатов измерений

5.1. Рассчитайте амплитудные значения силы тока и напряжений.

5.2. Проверьте, выполняется ли второй закон Кирхгофа для цепи переменного тока (15) построением векторной диаграммы напряжений в исследуемой цепи переменного тока (рис. 2).

5.3. Рассчитайте значения активных и реактивных сопротивлений (R , X_C и X_L) и полный импеданс цепи (Z).

5.4. Рассчитайте значение индуктивности (L) и ёмкости (C) элементов цепи.

5.5. Рассчитайте значение $\cos\varphi$.

5.6. Рассчитайте мощность электрического тока P , выделяющегося во внешней цепи.

Выполнение пп.5.3–5.6 проводится в соответствии с индивидуальным заданием.

При обработке результатов измерений считайте, что доверительная погрешность результата прямых измерений совпадает с систематической погрешностью.

6. Контрольные вопросы

6.1. Чем отличаются активное и реактивное сопротивления?

6.2. Как построить график – векторную диаграмму и что она позволяет определить?

6.3. Что характеризует величина $\cos\varphi$?

6.4. К источнику переменного напряжения подключён конденсатор ёмкостью C . Рассчитайте потребляемую конденсатором мощность.

7. Литература

7.1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1978.– Т.2.– §§ 88, 91, 92.

Лабораторная работа № 205

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

1. Задачи работы

1.1. Измерение магнитной индукции и напряжённости магнитного поля.

1.2. Построение кривой намагничивания.

1.3. Построение графика зависимости магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля.

1.4. Измерение работы перемещения ферромагнетика.

2. Предварительные сведения

Магнитное поле определяется двумя основными характеристиками: вектором напряжённости $\vec{H}$ и вектором магнитной индукции $\vec{B}$.

Вектор напряжённости магнитного поля $\vec{H}$ характеризует внешнее магнитное поле. *Вектор магнитной индукции* $\vec{B}$ характеризует результирующее магнитное поле, создаваемое внешним магнитным полем и микротоками (элементарными токами в атомах и молекулах вещества, помещённого в магнитное поле). Эти характеристики магнитного поля связаны между собой соотношением:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная в системе СИ,

μ – магнитная проницаемость среды.

Конкретный вид зависимости $\vec{B} = \vec{B}(\vec{H})$ зависит от магнитных свойств вещества, помещённого в магнитное поле.

Все вещества обладают магнитными свойствами, т.е. являются *магнетиками*. Свойства магнетиков обусловлены магнитными свойствами составляющих его частиц, и, в конечном счёте, движением электронов в атомах и молекулах.

Магнитные свойства разных веществ различаются по их поведению в магнитном поле. Все вещества в природе делятся на три основные группы: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Диамагнетиками являются, например, висмут, ртуть, фосфор, сера, золото, серебро, медь, гелий, вода и др. В отсутствие внешнего поля полный магнитный момент каждого атома диамагнетика равен нулю.

лю. Если такое вещество поместить во внешнее магнитное поле, то в веществе будет наведён магнитный момент, направленный против поля. Поэтому магнитное поле в диамагнетике слабее внешнего и, следовательно, магнитная проницаемость диамагнетиков $\mu < 1$.

К *парамагнетикам* относятся щелочные и щёлочноземельные металлы, кислород и др. В отсутствии внешнего магнитного поля полный магнитный момент каждого атома (молекулы) не равен нулю, а магнитный момент единицы объёма вещества в среднем равен нулю. При помещении парамагнитного вещества во внешнее магнитное поле устанавливается некоторое динамическое равновесие, при котором в веществе окажется в среднем больше атомарных магнетиков, магнитные моменты которых направлены по полю, чем атомов, магнитные моменты которых против поля. Следовательно, магнитная проницаемость парамагнетиков $\mu > 1$.

Ферромагнетики – железо, кобальт, никель, гадолиний и их сплавы. Ответственными за магнитные свойства ферромагнетиков являются собственные (спиновые) магнитные моменты электронов. При определённых условиях в кристаллах могут возникать силы, которые заставляют магнитные моменты электронов выстраиваться параллельно друг другу. В результате возникают *области спонтанного (самопроизвольного) намагничивания*, которые называют *доменами*, размеры их $10^{-4} - 10^{-3}$ см. В пределах каждого домена ферромагнетик намагничен до насыщения и обладает определённым магнитным моментом. Направления этих моментов для различных доменов различны (рис. 1), так что в отсутствии внешнего магнитного поля суммарный момент всего тела равен нулю. Для ферромагнетиков μ может быть значительно больше единицы и зависит от напряжённости $\vec{H}$ поля (рис. 2).

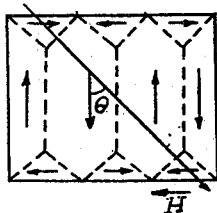


Рис. 1. Схематическое изображение доменов.

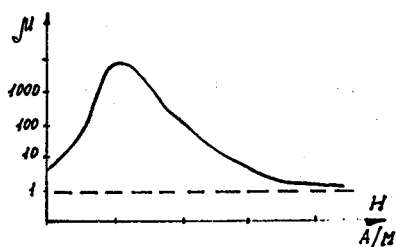


Рис. 2. Зависимость магнитной проницаемости μ ферромагнетика от напряжённости магнитного поля ($\vec{H}$).

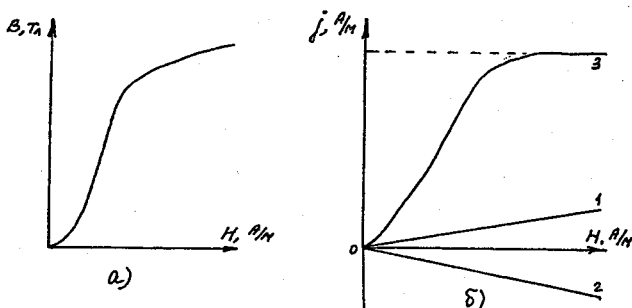


Рис. 3. Кривые намагничивания: а) $\vec{B} = \vec{B}(\vec{H})$, б) $\vec{j} = \vec{j}(\vec{H})$

- 1 – для парамагнетиков;
2 – для диамагнетиков;
3 – для ферромагнетиков.

Графики зависимости $\vec{B} = \vec{B}(\vec{H})$ для разных веществ представлены на рис. 3а, б соответственно. У ферромагнетиков в слабых полях круто возрастает с ростом $\vec{H}$ вследствие ориентации молекулярных токов по полю. В сильных полях $\vec{B}$ увеличивается только за счёт непосредственного увеличения $\vec{H}$. Мерой намагничивания материала служит вектор намагничивания $\vec{j}$:

$$\vec{j} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \mu \vec{H}.$$

Кроме нелинейной зависимости $B = B(H)$, называемой *основной кривой намагничивания*, для ферромагнетиков характерно также

наличие *гистерезиса*. Уже в полях порядка 100 А/м намагничивание j достигает насыщения (рис. 3б). При достижении насыщения $\vec{B}$ продолжает увеличиваться с ростом $\vec{H}$ по линейному закону:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} + \text{const.}$$

Если довести намагничивание до насыщения или выше (например, точка 1 на рис. 4) и затем уменьшить напряжённость магнитного поля, то намагничивание следует не первоначальной кривой 0 – 1, а изменяется в соответствии с кривой 1 – 2. В результате, когда напряжённость внешнего поля станет равной нулю (точка 2), намагничивание не исчезает и характеризуется величиной $\vec{B}_r$, которая называется *остаточной индукцией*. Намагничивание обращается в нуль (точка 3) лишь под действием поля $\vec{H}$, имеющего направление, противоположное полю, вызвавшему намагничивание. Напряжённость $\vec{H}_c$ называется *коэрцитивной силой*. Таким образом, при изменении величины поля от максимально положительного до максимально отрицательного значения и обратно, кривая, характеризующая намагничивание, образует петлю, которая называется *петлёй гистерезиса*.

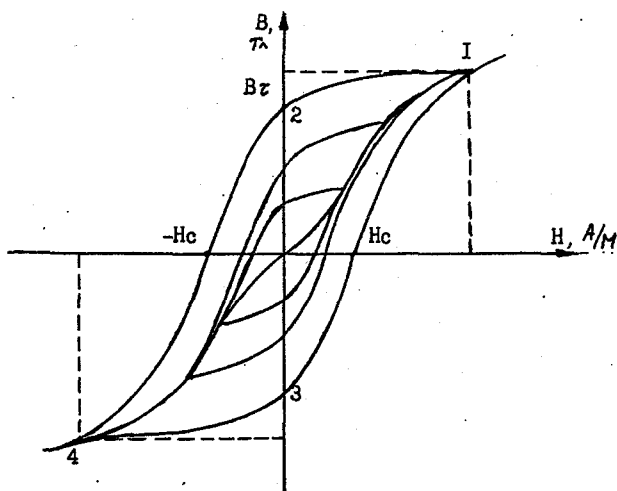


Рис. 4. Петля гистерезиса

Появление гистерезиса у ферромагнетиков связано с наличием в их структуре доменов. С увеличением напряжённости магнитного поля магнитные моменты доменов поворачиваются в направлении поля. При этом моменты электронов в пределах доменов поворачиваются, сохраняя строгую параллельность друг другу. Эти процессы необратимы, что и служит причиной гистерезиса.

Площадь петли гистерезиса пропорциональна работе, затраченной на перемагничивание ферромагнетика переменным магнитным полем. Эта энергия превращается во внутреннюю энергию ферромагнетика, т.е. идёт на его нагревание. Ферромагнетик с большой площадью петли называют жёстким, а с малой площадью – мягким. Площадь петли гистерезиса сильно зависит от примесей. У однородного ферромагнетика она меньше. Из специальной стали и сплавов с большим остаточным магнетизмом изготавливаются постоянные магниты.

3. Метод исследования и описание установки

В данной работе исследуются ферромагнитные свойства сердечника трансформатора. Для получения основной кривой намагничивания сердечника используется схема, приведённая на рис. 5:

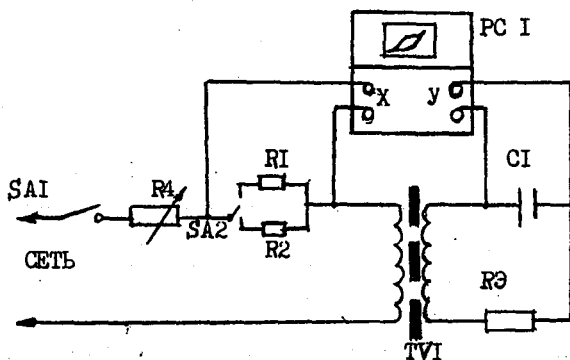


Рис. 5. Принципиальная схема установки

TV₁ – трансформатор;
R₁, R₂, R₃ – постоянные сопротивления;
R₄ – переменное сопротивление ("ток первичной обмотки");
C₁ – конденсатор в цепи вторичной обмотки трансформатора;
PG₁ – осциллограф.

На горизонтальные пластины электронно-лучевой трубки осциллографа подаётся напряжение U_x , пропорциональное напряжённости магнитного поля $\vec{H}$, а на вертикальные пластины – напряжение U_y , пропорциональное магнитной индукции $\vec{B}$.

Покажем, что для схемы, приведённой на рис. 5, $U_x \sim \vec{H}$ и $U_y \sim \vec{B}$.

1. Напряжённость поля, созданного первичной обмоткой трансформатора в сердечнике, определяется по формуле:

$$H = \frac{I_1 N_1}{L} \quad (1)$$

где I_1 – мгновенное значение силы тока в первичной обмотке;

N_1 – число витков первичной обмотки трансформатора;

L – длина сердечника трансформатора TV₁.

Используя закон Ома для участка цепи и соотношение (1), получаем напряжение на сопротивлении $R_{1,2}$ (сопротивление $R_{1,2}$ равно R_1 или R_2 в зависимости от положения переключателя SA₂):

$$U_x = I_1 R_{1,2} \frac{R_{1,2} L}{N_1} H. \quad (2)$$

Как видно из выражения (2), $U_x \sim H$.

2. ЭДС индукции во вторичной катушке трансформатора равна

$$E = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (3)$$

где $\Phi = BS$ – магнитный поток;

S – площадь сечения сердечника;

N_2 – число витков вторичной обмотки трансформатора.

Пренебрегая ЭДС самоиндукции во вторичной обмотке катушки, можно записать

$$E = U_c + I_2 R_3,$$

где U_c – разность потенциалов на обкладках конденсатора, которую находим из уравнения:

$$U_c = \frac{q}{C} = \int \frac{I_2}{C} dt. \quad (4)$$

Параметры элементов схемы подобраны таким образом, что

$$U_c \ll I_2 R_3,$$

УЧ.К. 1150
тогда

$$I_2 = -\frac{SN_2}{R_3} \cdot \frac{dB}{dt}.$$

Подставив полученное выражение для тока I_2 в равенство (4), получим

$$U_c = -\frac{SN_2}{CR_3} \int dB. \quad (5)$$

Поскольку $U_c = U_y$, окончательно имеем:

$$U_y \sim B.$$

3. В осциллографе отклонение X (или Y) электронного луча от центра экрана пропорционально подаваемому на вход прибора (вход "х" и вход "у") напряжению. При этом

$$U_x = \alpha_x X, \quad (6)$$

$$U_y = \alpha_y Y$$

где α_x и α_y – масштабные коэффициенты трактов горизонтального и вертикального отклонений.

Подставляя выражения (6) в формулы (2) и (5), получим:

$$H = X \frac{N_1 \alpha_x}{R_{1,2} l}, \quad (7)$$

$$B = Y \frac{\alpha_y \tau}{N_2 S}$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени интегрирующей цепи в тракте измерения B .

Размер изображения на экране осциллографа можно регулировать:

– по оси Y ручкой регулировки "Усилитель Y " на передней панели осциллографа. Этот переключатель выполняет ту же функцию, что и переключатель пределов измерений стрелочного электроизмерительного прибора. Показание переключателя соответствует значению величины α_y ;

– по оси X переключателем SA_2 , включающим в цепь сопротивления R_1 или R_2 . Этот переключатель изменяет значение силы тока в первичной обмотке трансформатора, а значит, и напряженность магнитного поля $\vec{H}$. Величина α_x при этом не меняется и

всегда $\alpha_x = 0,5$ В/см. Положение масштабных переключателей ("Усилитель Y" и SA2) следует выбирать таким образом, чтобы изображение петли гистерезиса занимало максимальную площадь в пределах экрана осциллографа.

При построении кривой намагничивания необходимо измерить координаты точки 1 (см. рис. 4) значения H_{max} и B_{max} для каждой петли. Для облегчения измерений этих величин в схеме установки предусмотрены две кнопки. При нажатии на кнопку "пластина X" изображение петли вырождается в вертикальную линию, проходящую через точку А (прямая 1, рис. 6). Отрезок, отсекаемый этой прямой от оси X, даёт значение X_{max} . При нажатии на кнопку "пластина Y" изображение петли выражается в горизонтальную линию, проходящую через точку А (прямая 2, рис. 6). Отрезок, отсекаемый этой прямой от оси Y, даёт значение Y_{max} . Подставляя значения X_{max} и Y_{max} в формулы (7), получим

$$H_{max} = X_{max} \frac{N_1 \alpha_x}{R_{1,2} L} \quad (8)$$

$$B_{max} = Y_{max} \frac{\alpha_y \tau}{N_2 S} \quad (9)$$

Магнитную проницаемость ферромагнетика можно рассчитать по формуле

$$\mu = \frac{B_{max}}{\mu_0 H_{max}} \quad (10)$$

4. Порядок выполнения работы

Перед выполнением работы обязательно ознакомьтесь с кратким описанием осциллографа в приложении.

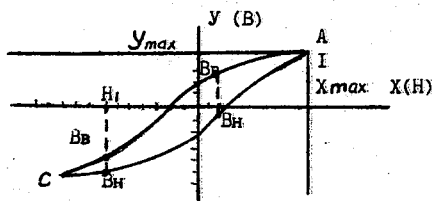


Рис. 6. Определение значений X_{max} и Y_{max} на экране осциллографа

4.1. Включите осциллограф, установите органы управления в рабочее положение (указано на панели установки). После прогрева осциллографа при выключенном тумблере "Сеть 36/220" (SA_1) на панели установки получите точку на экране осциллографа, отрегулируйте её яркость (минимально необходимую, иначе можно прожечь экран) и ручками $\longleftrightarrow$ и $\updownarrow$ установите эту точку в центр экрана — на пересечение координатных осей. После этого ручки $\longleftrightarrow$ и $\updownarrow$ не трогать!

4.2. Включите тумблер "Сеть 36/220", установите переключатель (SA_2) в положение (R_2). На экране появится изображение петли гистерезиса. Установите максимальный ток первичной обмотки (потенциометр "ток первичной обмотки" поставьте в крайнее положение). Выберите положение переключателя "Усиление Y" осциллографа такое, чтобы вертикальный размер петли не превышал размеров шкалы. Если при этом горизонтальный размер петли выходит за пределы экрана, уменьшите ток первичной обмотки. Измерения начинайте с тока, при котором горизонтальный размер петли равен ~ 8 дел, т.е. $X_{\max} = 4$ дел.

4.3. Измерьте величину $X_{\max}$ для полученной петли, нажимая и удерживая 3–5 сек кнопку "Пластина X", на правой боковой панели осциллографа (см. предыдущий раздел). Аналогично измерьте величину $Y_{\max}$ (кнопка "Пластина Y" расположена на левой стенке прибора). Повторите наблюдения $X_{\max}$ и $Y_{\max}$ несколько раз при данном токе первичной обмотки.

4.4. Уменьшая ток первичной обмотки, проведите аналогичные измерения при $X_{\max} = 3,5; 3; 2,5; 2; 1,5$ дел., после чего переведите переключатель (SA_2) в положение (R_1) и проделайте аналогичные измерения в интервале $X_{\max}$ от 4 до 1,5 дел.

Не забывайте при первой возможности изменять положение переключателя "Усиление Y" так, чтобы вертикальный размер петли был возможно большим, но не выходил за пределы сетки-шкалы. Результаты занесите в таблицу 1.

4.5. Для измерения площади петли установите снова максимальную петлю при положении (R_2) переключателя (SA_2), когда $X_{\max}$ точно равно 4 дел, при этом вершины находятся на крайних вертикальных линиях сетки шкалы. Измерьте ординаты точек пересечения с центральной вертикальной координатной линией верхней

части петли $Y_{в1}$ и нижней части петли $Y_{н1}$ гистерезиса (рис. 6). Ручкой $\longleftrightarrow$ сместите изображение петли вправо на ~ 1 дел, так, чтобы левая вершина петли совпала со следующей вертикальной линией сетки-шкалы. Теперь по центральной вертикальной линии можно определить величины $Y_{в2}$, $Y_{н2}$. Переместите изображение петли влево так, чтобы правая вершина петли совпала с ближайшей к правой вертикальной координатной линией вертикальной линией сетки-шкалы, и получите величины $Y_{в3}$, $Y_{н3}$, снова сместите изображение петли вправо так, чтобы вершина петли совпала со второй вертикальной линией сетки-шкалы, и определите $Y_{в4}$ и $Y_{н4}$.

Перемещая последовательно петлю вправо и влево, измерьте ординаты точек пересечения верхней части петли ($Y_{вi}$) и нижней части петли ($Y_{нi}$) с центральной вертикальной координатной линией. В точках 1 и 9 значения $Y_{в}$ и $Y_{н}$ совпадают (вершины петли). Результаты измерений занесите в таблицу 2.

5. Обработка результатов измерений

5.1. По формулам (8) и (9) рассчитайте значения $H_{\max}$ и $B_{\max}$. При обработке результатов прямых измерений величин $X_{\max}$ и $Y_{\max}$ необходимо учитывать следующее:

— предельная приборная погрешность h рассчитывается по формуле

$$h(X_{\max} \alpha_x) = 0,05 (X_{\max} \alpha_x)$$

или

$$h(Y_{\max} \alpha_y) = 0,05 (Y_{\max} \alpha_y);$$

— погрешность отсчитывания измерения ($C_{\min} d$) принимается равной $0,7 C_{\min}$ (ширина линии луча осциллографа), причём $C_{\min}$ принимается равной $0,1 \alpha_x$ или $0,1 \alpha_y$ большего деления шкалы (малое деление).

Рассчитайте средние значения $X_{\max}$ и $Y_{\max}$ для каждой петли гистерезиса, а также систематические и случайные составляющие погрешности измерения и доверительную границу погрешности измерений $X_{\max}$ и $Y_{\max}$. Постройте график зависимости $B_{\max}$ от $H_{\max}$.

5.2. Рассчитайте величины μ и $\Delta\mu$ по формуле (10) для каждой петли гистерезиса и постройте графики зависимости μ от $H_{\max}$.

5.3. Рассчитайте значение работы перемагничивания A для одной петли гистерезиса по формуле

$$A = \int_{-H_{\max}}^{H_{\max}} (B_B - B_H) dH, \quad (11)$$

где B_H и B_B – значения магнитной индукции соответственно для нижней и верхней ветвей петли при заданном H (см. рис. 6).

Приближённое значение величины A можно получить численным интегрированием по формуле трапеции

$$A = \frac{2H_{\max}}{n} \left(\frac{(B_B - B_H)_1}{2} + (B_B - B_H) + \dots + (B_B - B_H)_8 + \frac{(B_B - B_H)_9}{2} \right), \quad (12)$$

где n – число делений интервала измерения H .

В данной работе $n = 8$, в начальной и конечной точках кривой

$$(B_B - B_H)_1 = 0$$

$$(B_B - B_H)_9 = 0$$

При расчёте значений $(B_B - B_H)_i$ следует учитывать знак величин B : величина B отрицательна для тех частей петли, которые находятся ниже оси X (см. рис. 6). Расчёт значений величины B следует производить по формуле (7).

6. Контрольные вопросы

6.1. Как классифицируются магнетики?

6.2. Почему значение μ велико для ферромагнетиков?

6.3. В чём заключается явление ферромагнетизм?

6.4. Что называется коэрцитивной силой?

6.5. Докажите, что напряжение на горизонтальной и вертикальной пластинах пропорционально H и B соответственно.

6.6. Получите размерность работы из формулы (11).

Таблица 1

№	$X_{\max}$, дел	$Y_{\max}$, дел	$H_{\max}$, А/м	$B_{\max}$, Тл
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				

Таблица 2

№	Ув, дел	Ун, дел

7. Литература

7.1. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1978. – §§51, 55, 59.

7.2. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М.: Наука, 1969.– Т.2.– §§46, 47, 48.

7.3. Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики. – М.: Наука, 1974.– Т.2.

ПРИЛОЖЕНИЕ

РАБОТА С ОСЦИЛЛОГРАФОМ

Электронно-лучевой осциллограф — это измерительный прибор, использующий электронно-лучевую трубку (ЭЛТ) для наблюдения исследуемого сигнала, представляющего собой, как правило, функциональную зависимость от времени или от другой величины. С помощью осциллографа очень наглядно измеряются различные параметры электрических сигналов, как, например, частота следования, амплитуда, длительность и т.д.

В осциллографе отклонение луча по вертикали и по горизонтали пропорционально напряжению, поданному на входы Y и X соответственно. Для отсчёта этого отклонения используется измерительная сетка-шкала, имеющая равноотстоящие вертикальные и горизонтальные линии, образующие отсчётные деления. Она наносится либо на прозрачный листовой материал, установленный перед экраном ЭЛТ, либо непосредственно на внутреннюю сторону стекла экрана для исключения ошибки отсчёта за счёт параллакса.

Площадь, занимаемая шкалой, является рабочей площадью, в пределах которой гарантированы технические параметры прибора. Осевые горизонтальные и вертикальные линии, проходящие через центр экрана, дополнительно разбиты на 10 вспомогательных малых делений для точных измерений.

С помощью шкалы, используя значения масштабных коэффициентов по вертикали и горизонтали, можно непосредственно измерить на экране параметры сигнала.

Масштабным коэффициентом измерения напряжения является коэффициент отклонения — напряжение на входе канала (X или Y), соответствующее отклонению луча ЭЛТ на 1 деление шкалы. В большинстве современных осциллографов значение коэффициента α_y может изменяться плавно и скачками в широких пределах, а значение коэффициента α_x неизменно.

Основные технические характеристики осциллографа С1-68, применяемого в данной работе:

1) Рабочая площадь экрана имеет 6 делений по вертикали и 8 делений по горизонтали (1 деление равно 1 см). Измеренные значения величин "X" и "Y" следует выражать в больших делениях сетки-шкалы. Например, если между светящейся линией на экране и

осевой линией находится 3 больших деления и 7 малых делений, то значение измеряемой величины " $X_{\max}$ " (или " $Y_{\max}$ ") равно $X_{\max}=3,7$ или $Y_{\max}=3,7$;

2) Ширина линии луча – 0,7 малого деления;

3) Калибровочный коэффициент отклонения от оси $Y(\alpha_y)$ от мВ/дел до 5В/дел устанавливается ступенями в последовательности 1, 2, 5 умножением на 1 или 10, а также плавно.

Осциллограф позволяет наблюдать на экране форму петли гистерезиса и измерить её параметры, в частности $H_{\max}$, $B_{\max}$, а также площадь кривой.

Метод измерения по калибровочной шкале является основным методом измерения большинства осциллографов. Значение приборной погрешности при этом даётся для величины $X \cdot \alpha_x$ (или $Y \cdot \alpha_y$) в виде относительной погрешности и составляет

$$\delta(X \cdot \alpha_x) = \delta(Y \cdot \alpha_y) = 0,05 = 5 \, \%.$$

Лабораторная работа № 208

ИЗУЧЕНИЕ РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА

1. Задачи работы

1.1. Измерение постоянной времени разряда конденсатора.

1.2. Измерение ёмкости конденсатора.

2. Предварительные сведения

Конденсаторами называются устройства, которые при небольшом относительно окружающих тел потенциале способны накапливать на себе заметные по величине электрические заряды. Конденсатор обычно состоит из двух проводящих поверхностей (обкладок), разделённых слоем изолятора. Обкладки конденсатора заряжены равными по абсолютной величине и противоположными по знаку зарядами $+q$ и $-q$.

Основной характеристикой конденсатора является его ёмкость (C). Ёмкость – это физическая величина, равная отношению заряда q , накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов между его обкладками

$$C = \frac{q}{U} \quad (1)$$

За единицу ёмкости в системе единиц СИ принимается фарада (Φ) – это ёмкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл.

Величина ёмкости конденсатора определяется его геометрией (формой и размерами обкладок, величиной зазора между ними), а также диэлектрическими свойствами среды, заполняющей пространство между обкладками.

Ёмкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных металлических пластин площадью S каждая, расположенных на расстоянии d друг от друга, выражается в системе единиц СИ формулой

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между пластинами;

ε_0 – электрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Эта формула справедлива лишь при малых расстояниях d между пластинами ($d \ll S^{1/2}$), когда можно пренебречь нарушением однородности электростатического поля у краёв обкладок конденсатора.

Конденсатор не проводит постоянный электрический ток, но в цепях переменного тока представляет собой реактивное сопротивление, величина которого зависит от ёмкости конденсатора и частоты переменного тока (см. описание работы № 201).

3. Методы исследования и описание установки

Если пластины конденсатора постоянной ёмкости C , заряженного до разности потенциалов U , соединить между собой проводником через резистор сопротивлением R (рис. 1) и замкнуть ключ K , то по резистору пойдёт ток, и конденсатор разрядится.

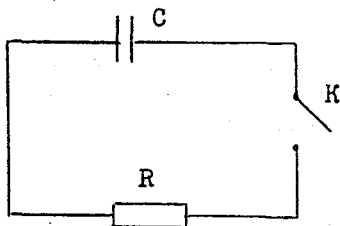


Рис. 1. Принципиальная схема установки для изучения разряда конденсатора

Разряд конденсатора сопровождается уменьшением величины заряда q на обкладках, причём это уменьшение, отнесённое к интервалу времени, за которое это изменение произошло, равно силе тока I , проходящего по цепи:

$$-\frac{dq}{dt} = I \quad (2)$$

Знак "минус" в формуле (2) означает, что величина заряда уменьшается. Пренебрегая сопротивлением проводов и учитывая соотношение $q = CU$ и $I = \frac{U}{R}$, уравнение (2) можно преобразовать к виду

$$\frac{1}{U} dU = -\frac{1}{CR} dt \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (3) в пределах от начального момента времени ($t_0 = 0$), когда напряжение на обкладках равно U_0 , до момента времени t , когда напряжение равно U , то есть

$$\int_{U_0}^U \frac{dU}{U} = -\frac{1}{CR} \int_0^t dt ,$$

получаем решение уравнения (3) в виде линейной зависимости $\ln U$ от t :

$$\ln U \Big|_{U_0}^U = -\frac{1}{CR} t \Big|_0^t$$

$$\ln U - \ln U_0 = -\frac{1}{CR} t, \quad (4)$$

откуда получается экспоненциальная зависимость U от t

$$U = U_0 \exp\left(-\frac{t}{CR}\right), \quad (5)$$

где $\exp\left(-\frac{t}{CR}\right)$ — показательная функция с основанием, равным основанию натуральных логарифмов (e).

Полученная зависимость напряжения U на обкладках конденсатора от времени t (U_0 , C и R — величины постоянные) графически представлена на рис. 2.

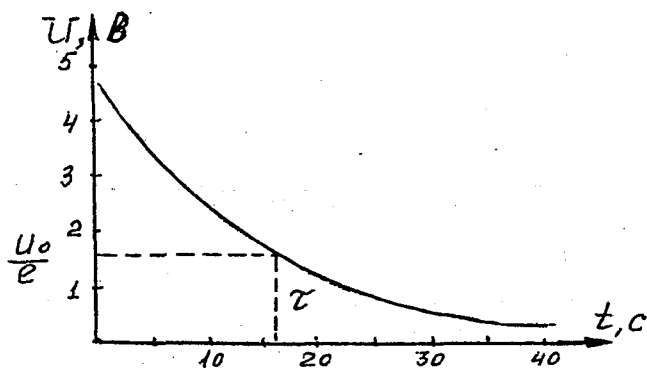


Рис. 2. Зависимость напряжения от времени при разряде конденсатора.

Уравнение (5) представляет нелинейную зависимость величины напряжения U от времени t и для графического анализа удобнее использовать уравнение (4), представленное в виде

$$\ln U = \ln U_0 - \frac{1}{CR} t \quad (6)$$

Это уравнение представляет линейную зависимость ($y = ax + b$) величины $\ln U$ ("y") от величины t ("x"), причём величина $-\frac{1}{CR}$ является угловым коэффициентом этой линейной зависимости ("a"). График этой функции представлен на рис. 3.

Величина CR имеет размерность времени и называется постоянной времени разряда конденсатора τ .

$$\sqrt{\tau} = CR \quad (7)$$

Физический смысл постоянной времени разряда конденсатора τ заключается в том, что она показывает, через сколько секунд после начала разряда напряжение на конденсаторе (а также и сила разрядного тока в цепи) становится меньше начальных значений в "e" раз (где $e = 2,718$, основание натурального логарифма).

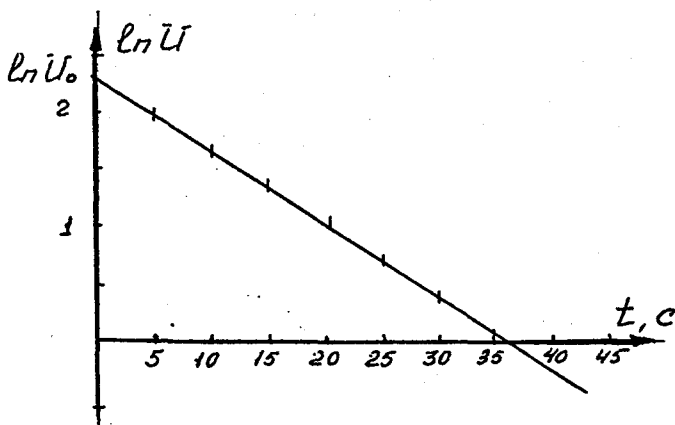


Рис. 3. Зависимость напряжения от времени при разряде конденсатора в полулогарифмическом масштабе

Зная величину постоянной времени разряда конденсатора τ и сопротивление R , можно определить ёмкость конденсатора

$$\sqrt{C} = \frac{\tau}{R} \quad (8)$$

Работа состоит из двух частей. В первой части измеряют величину сопротивления, через которое разряжается конденсатор, во второй – измеряют напряжение на конденсаторе в процессе его разряда.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 4. Установка может работать в трёх режимах: 1) заряд конденсатора, 2) разряд конденсатора, 3) измерение величины сопротивления. Изменение режима работы установки осуществляется переключателем SA1.

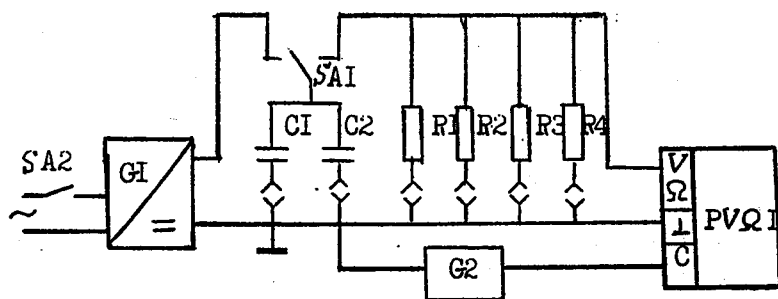


Рис. 4. Принципиальная схема установки

- G1 – источник питания электрической схемы;
- G2 – генератор импульсов, включающих измерительный прибор (задающий генератор);
- PVQ1 – цифровой вольтметр;
- SA1 – переключатель режима работы;
- SA2 – выключатель сетевого напряжения;
- R1 ... R4 – измеряемые сопротивления;
- C1, C2 – измеряемые конденсаторы.

В положении SA1 "заряд, измерение R" происходит заряд конденсатора C от источника питания G1, одновременно с этим производится измерение величины сопротивления R цифровым вольтметром PVQ1 типа BK7-10A/1.

В положении переключателя SA1 "разряд" происходит разряд конденсатора C через сопротивление R; при этом цифровой вольт-

омметр PVΩ1 измеряет напряжение на конденсаторе С. В этом режиме включается внешний задающий генератор G2, который включает вольтметр с интервалом времени, который можно подобрать самостоятельно, вращая ручку (0,5S ÷ 5S) на панели прибора. Это позволяет вести измерение напряжения на конденсаторе дискретно. Выбор промежутка времени между показаниями прибора определите исходя из удобства записи результатов.

Схема предусматривает несколько вариантов сборки: включение одного из конденсаторов (C1, C2) и включение одного из сопротивлений (R1, R2, R3, R4, R5). Прежде чем приступить к работе, узнайте номер своего варианта и выпишите содержащееся в нём задание.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Установите штекеры в гнезда С и R в соответствии со своим вариантом.

4.2. Подготовьте вольтметр к работе в соответствии с указаниями п.п.1–3 "Приложения".

4.3. Включите тумблер "Сеть" (SA2) на панели установки.

4.4. Прочтите пункт "Измерение сопротивления" Приложения и выполните в соответствии с указаниями измерение Вашего сопротивления.

4.5. Прочтите пункт "Измерение напряжения" Приложения, установите переключатели на панели прибора в положения, указанные в пункте.

4.6. Переведите тумблер режима работы на панели установки в положение "разряд" и проведите измерение падения напряжения на конденсаторе. При измерении заранее определите промежуток времени между высвечиванием цифр на индикаторе вольтметра. Удобно настроить прибор на высвечивание цифр через 5 с. Измерение следует начать через 5 – 10 с после переключения тумблера на "разряд" и проводить в течение 50 – 60 с (всего получится 10 – 12 точек).

Данные заносите в таблицу 1.

4.7. Переведите тумблер режима работ на панели установки в положение "измерение R, заряд", затем снова выполните п.п. 4.6.

Проведите 5 серий измерений.

Таблица 1

№ п/п	$t, \text{с}$	$U, \text{В}$					$R, \text{кОм}$
		1 серия	2 серия	3 серия	4 серия	5 серия	
1							
2							
...							
11							
12							

5. Обработка результатов измерений

5.1. Постройте график зависимости напряжения на конденсаторе (U) от времени (t) для одной серии измерений.

5.2. Постройте графики зависимости $\ln U$ от t для каждой серии измерений (таблица 2).

5.3. Графической обработкой зависимостей $\ln U$ от t найдите значения угловых коэффициентов (a_i) для каждой серии измерений.

5.4. Используя полученные значения a_i , найдите среднее значение этих величин $\bar{a}$. Рассчитайте абсолютную погрешность Δa_i как абсолютную погрешность тангенса угла наклона прямой линии для серии, у которой a_i наиболее близко к $\bar{a}$. В дальнейшем полученное значение Δa_i считайте равным систематической составляющей $\theta(a)$ погрешности измерения величины a .

5.5. Используя полученные значения a_i , найдите случайную составляющую $\varepsilon(a)$ погрешности величины a .

5.6. Рассчитайте доверительную погрешность Δa величины a .

5.7. Используя связь величин a и τ (6 и 7), найдите результат измерения величины τ .

5.8. Используя формулу (8), рассчитайте ёмкость конденсатора C и определите ее погрешность ΔC как погрешность косвенного измерения.

Таблица 2

№ п/п	$t, \text{с}$	$\ln U$				
		1 серия	2 серия	3 серия	4 серия	5 серия
1						
2						
...						
12						

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Что называется ёмкостью конденсатора?
- 6.2. От чего зависит величина ёмкости конденсатора?
- 6.3. Что называется постоянной времени разряда конденсатора?
- 6.4. От чего зависит величина постоянной времени разряда конденсатора?
- 6.5. Как влияет величина τ на зависимость $\ln U$ от времени при разряде конденсатора?
- 6.6. Какова форма линий напряжённости электрического поля, создаваемого:
 - а) плоским конденсатором;
 - б) сферическим конденсатором;
 - в) цилиндрическим конденсатором?
- 6.7. Как зависит ёмкость конденсатора от наличия между его обкладками диэлектрика?
- 6.8. Как ведет себя конденсатор в цепи постоянного и переменного тока? Объясните различие.

7. Литература

- 7.1. *Калашиников Г.С.* Электричество. – М.: Наука, 1964. – §§ 35, 62.
- 7.2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1978. – т.2, §§26, 27, 82.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Внешний вид лицевой панели прибора ВК7-10А/1 показан на рисунке 5.

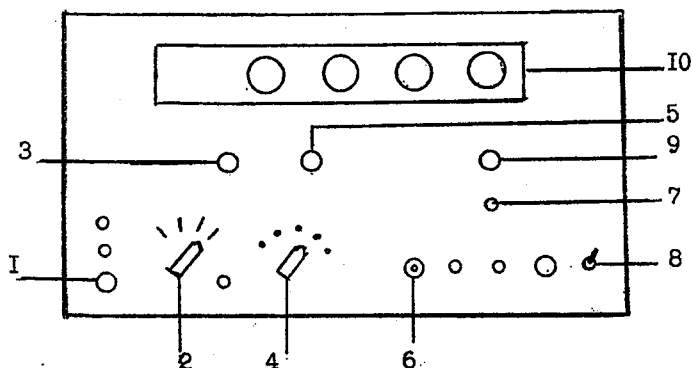


Рис. 5. Схема лицевой панели цифрового вольтметра

- 1 – входной разъём;
- 2 – переключатель пределов измерений;
- 3 – ручка УСТ. НУЛЯ;
- 4 – переключатель рода работы;
- 5 – ручка КАЛИБРОВКА ВОЛЬТМЕТРА;
- 6 – кнопка ПУСК;
- 7 – тумблер ВНЕШН-АВТОМ;
- 8 – тумблер СЕТЬ;
- 9 – ручка установки периода измерений;
- 10 – индикаторное табло.

Ручки, не используемые при настройке прибора, на рисунке цифрами не обозначены.

Включение и настройка прибора

1. Включите прибор тумблером СЕТЬ, дайте ему прогреться не менее 15 мин.
2. Тумблер ВНЕШН-АВТОМ поставьте в положение АВТОМ, ручку установки периода измерений – в крайнее левое положение.
3. Установите переключатель рода работы в положение УСТ. НУЛЯ и соответствующей ручкой установите на индикаторе показание 0000.

После этого прибор готов к работе. Если не удаётся выполнить п.3, обратитесь к лаборанту.

Работа с прибором

1. Измерение сопротивления

Для измерения сопротивления резистора установите переключатель рода работы в положение "R", переключатель пределов измерений в положение "1000". Индикатор показывает измеренное значение сопротивления (обратите внимание на положение десятичной запятой и единицу измерения, $K\Omega = k\Omega$).

2. Измерение напряжения

Для измерения напряжения на конденсаторе в процессе разряда установите переключатель рода работы в положение "=", переключатель пределов измерений в положение "10В". Для того, чтобы измерять значения напряжения в фиксированные моменты времени, переведите тумблер ВНЕШН-АВТОМ в положение АВТОМАТ.

3. Определение абсолютной погрешности

Абсолютная погрешность прямых измерений вычисляется по формулам:

$$\Delta U = 0,002 \cdot U + 2 \text{ единицы младшего разряда величины } U,$$

$$\Delta R = 0,003 \cdot R + 2 \text{ единицы младшего разряда величины } R.$$

(Младший разряд – последняя индуцируемая цифра).

Например, для значения $R = 31,25 \text{ кОм}$ единица младшего разряда есть 0,01 кОм, поэтому $\Delta R = 0,003 \cdot 31,25 + 2 \cdot 0,01 = 0,094 + 0,02 \approx 0,12 \text{ кОм}$.

$$R = (31,25 \pm 0,12) \text{ кОм}$$

Лабораторная работа № 211

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

1. Задачи работы

1.1. Измерение удельного заряда электрона.

2. Предварительные сведения

Удельным зарядом электрона называется отношение величины заряда e электрона к его массе m . При движении электрона в электрических и магнитных полях его траектория определяется конфигурацией этих полей и его удельным зарядом.

Метод магнетрона, в котором используется отклонение движущегося электрона магнитным полем, основан на следующем положении. Если задана конфигурация электрического и магнитного полей и из опыта известна траектория электрона в этих полях, то значение e/m может быть найдено.

На электрон, который движется во внешних электрическом и магнитном полях со скоростью $\vec{V}$, действует сила Лоренца

$$F_L = F_E + F_M = -eE - eV \cdot B, \quad (1)$$

где $F_E = -eE$ — сила электрического поля;

$F_M = -eV \cdot B$ — магнитная сила;

$-e$ — заряд электрона (элементарный заряд $e > 0$);

E — напряженность электрического поля;

B — вектор магнитной индукции.

Магнитная сила F_M всегда перпендикулярна к направлению скорости электрона V , поэтому не изменяет модуля его скорости. Когда электрон движется в однородном магнитном поле, перпендикулярном к плоскости, в которой происходит его движение ($B \perp V$), траектория электрона является окружностью. Если радиус этой окружности R , то центростремительное ускорение электрона равно V^2/R , и по второму закону Ньютона связь между этим ускорением и модулем силы F_M выразится соотношением: $mV^2/R = F_M$. Подставляя сюда вместо силы F_M ее выражение по формуле (1), получим: $mV^2/R = eVB \sin \alpha$, где угол α между векторами V и B равен 90° . Отсюда следует, что

$$\frac{e}{m} = \frac{V}{R} \cdot B \quad (2)$$

Тем самым удельный заряд e/m электрона можно вычислить по формуле (2), если известны его скорость V , радиус окружности R и магнитная индукция B внешнего поля.

Иногда бывает удобно исключить скорость электрона в формуле (2), выразив ее через ускоряющую разность потенциалов U . При движении электрона в вакууме работа электрических сил eU идет на увеличение его кинетической энергии $mV^2/2$, откуда

$$mV^2/2 = eU, \quad (3)$$

и, следовательно, $V = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$. Подставляя это значение в (2), после преобразований удельный заряд e/m электрона выражается через радиус окружности R , магнитную индукцию B внешнего поля и ускоряющую разность потенциалов U :

$$e/m = 2U/R^2 B^2. \quad (4)$$

3. Метод исследования и описание установки

Магнетроном называют вакуумный электронный прибор, в котором электроны движутся в электрическом и магнитном полях. В данной работе магнетроном служит двухэлектродная лампа (6Е5С), помещенная в магнитное поле соленоида. Катод К магнетрона (рис. 1), подогреваемый нитью накала Н, имеет форму цилиндра и соосно помещен внутри цилиндрического анода А. Лампа расположена внутри соленоидальной катушки С так, чтобы оси симметрии лампы и соленоида совпадали.

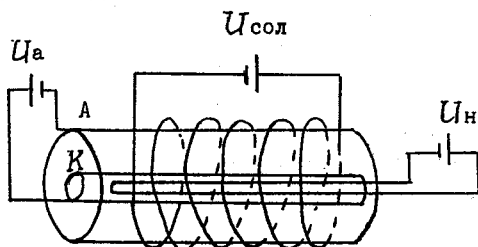


Рис. 1. Схема магнетрона

- 1 — в отсутствии магнитного поля;
- 2 — при включении магнитного поля $B < B_{кр}$;
- 3 — при значении магнитного поля $B = B_{кр}$;
- 4 — при значении магнитного поля $B > B_{кр}$.

На электроны, вылетающие с поверхности нагретого катода в результате термоэлектронной эмиссии, одновременно действует как электрическое, так и магнитное поле. Электрическое поле создается разностью потенциалов между анодом и катодом (анодным напряжением) U_A . Силовые линии электрического поля направлены по радиусам цилиндров. К соленоиду приложено постоянное напряжение U_C и через него протекает постоянный ток I_C . Внутри соленоида при этом возникает магнитное поле, линии индукции которого параллельны оси симметрии прибора. Векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу. Значение магнитной индукции B пропорционально току соленоида I_A :

$$B = \mu_0 \mu n I_C, \quad (5)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, равная $1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м;

μ — магнитная проницаемость среды (для вакуума $\mu = 1$);

n — число витков на единицу длины соленоида.

Если магнитное поле отсутствует, то электроны движутся от катода к аноду под действием только электрического поля прямо по радиусам (рис. 2). Через лампу протекает анодный ток I_A , величина которого определяется температурой катода и анодным напряжением U_A (см. описание лабораторной работы № 240).

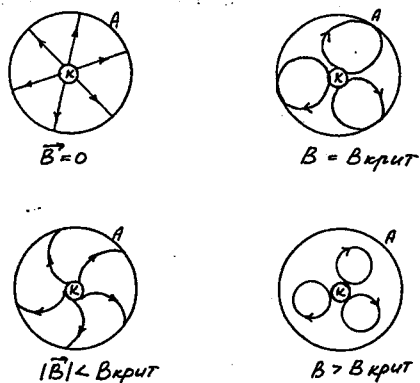


Рис. 2. Траектории электронов в магнетроне

При включении тока в цепи соленоида под действием отклоняющего магнитного поля, индукция которого B перпендикулярна к плоскости чертежа на рис. 2, траектория электронов становится кри-

волинейной. Однако траектория начинается на катоде и кончается на аноде, и через лампу продолжает протекать ток. При дальнейшем увеличении магнитного поля, величина магнитной силы возрастает и кривизна траектории движения электронов увеличивается. Когда значение индукции магнитного поля достигнет *критического значения* $B_{кр}$, скорость электронов вблизи анода становится направленной по касательной к его поверхности (см. рис. 2). При дальнейшем увеличении B радиус кривизны траектории электронов уменьшится настолько, что электроны будут возвращаться к катоду, не долетая до анода (см. рис. 2). Эффект действия на электроны отклоняющего магнитного поля проявится в прекращении анодного тока.

В эксперименте по определению удельного заряда электрона к лампе прикладывается постоянное анодное напряжение, создающее постоянный анодный ток. Затем, изменяя ток в соленоиде, увеличивают индукцию магнитного поля и добиваются прекращения анодного тока. Зная геометрию магнетрона, т.е. радиусы r_k и r_A соответственно его катода и анода, величину анодного напряжения U_A и индукцию $B_{кр}$ критического магнитного поля, можно найти значение e/m . В критическом режиме ($U = U_A$, $B = B_{кр}$) траектория движения электронов касается поверхности анода, т.е. $R = r_A/2$. Подставляя в (4) значения величин, отвечающих критическому режиму, получим

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_A}{r_A^2 B_{кр}^2}. \quad (6)$$

Более детальный расчет движения электрона, в котором учитывается зависимость скорости электрона от расстояния до оси симметрии магнетрона, а также конечность размеров его катода, приводит к формуле

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_A}{r_A^2 B_{кр}^2 \left(1 - \frac{r_{кс}^2}{r_A^2}\right)^2}. \quad (7)$$

На рис. 3. изображена идеальная характеристика магнетрона, показывающая зависимость анодного тока I_A от модуля магнитной индукции B . Для всех значений B , которые меньше критического $B_{кр}$, анодный ток постоянен. Напротив, если, $B > B_{кр}$, анодный ток $I_A = 0$. Однако в эксперименте анодный ток прекращается не мгновенно, а постепенно спадает с увеличением индукции B (см. рис.3).

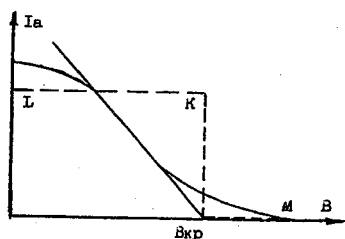


Рис. 3. Зависимость анодного тока от индукции магнитного поля (пунктиром обозначена теоретическая зависимость, сплошная кривая – зависимость в реальном случае)

Такой характер изменения анодного тока на экспериментальной характеристике магнетрона, обусловлен разбросом скоростей электронов, покидающих катод, а также отклонением от строгой симметрии в форме и расположении электродов лампы.

Так как магнитная индукция B пропорциональна току соленоида I_A , то зависимость анодного тока $I_A = f(I_C)$ от тока соленоида I_C (рис. 4) подобна характеристике магнетрона $I_A = f(B)$. (рис. 3). Кроме того, используя соотношение (5), критическое значение индукции $B_{кр}$ можно рассчитать по критическому значению тока соленоида $I_{кр}$, которое проще измерить в эксперименте. Тогда формула (7) принимает вид:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_A}{\mu_0^2 n^2 I_{эст}^2 r_A^2 \left(1 - \frac{r_{эс}^2}{r_A^2}\right)^2}. \quad (8)$$

В настоящей лабораторной работе в качестве критического тока соленоида $I_{кр}$ (а значит индукции $B_{кр}$) принято такое его значение, при котором анода не достигает основная масса электронов, т.е. анодный ток I_A практически прекращается. Для определения значения $I_{кр}$ применяется графический метод. По экспериментальным данным строят график зависимости $I_A = f(I_C)$, который имеет вид ниспадающей кривой (см. рис. 4). В окрестности точки перегиба кривой находят линейный участок dc и продолжают его до пересечения с осью абсцисс, определяя тем самым значение $I_{кр}$.

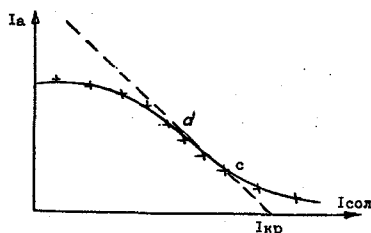


Рис. 4. Зависимость анодного тока (I_a) от тока соленоида (I_c).

Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис.5. Напряжение питания установки подаётся от трёх источников питания: постоянного тока (G1) и двух регулируемых постоянного тока (G2 и G3). Источники G1 и G2 осуществляют питание электронной лампы, G3 обеспечивает питание соленоида, создающего магнитное поле. Регулируемый источник питания G2 позволяет изменять анодное напряжение на электронной лампе (A), а источник G3 позволяет менять силу тока в соленоиде, изменяя тем самым величину магнитного поля. Анодное напряжение измеряется вольтметром PV1, анодный ток – миллиамперметром PA1, сила тока в соленоиде (катушке C) измеряется амперметром PA2. Напряжение на экране в процессе работы не меняется (источник G1). На передней панели установки выведены тумблеры "СЕТЬ" (SA1), "НАПРЯЖЕНИЕ ЭКРАНА" (SA2) и "ТОК СОЛЕНОИДА" (SA3), а также регуляторы: "НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА" и "ТОК СОЛЕНОИДА".

4. Порядок выполнения работы

4.1. Наблюдение траекторий движения электронов по светящемуся экрану лампы.

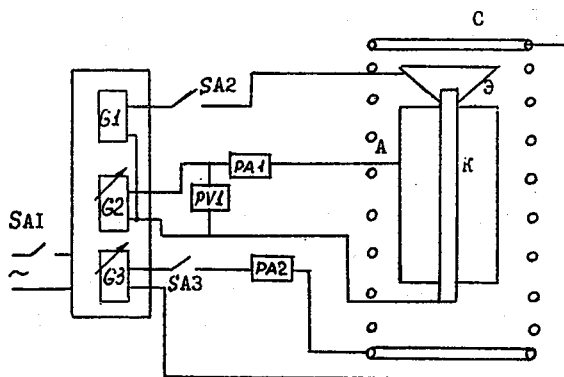
4.1.1. Включить тумблер "СЕТЬ" (SA1).

4.1.2. Ручкой "НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА" установить напряжение 30 В ($U_a = 30В$).

4.1.3. Включить тумблер "НАПРЯЖЕНИЕ ЭКРАНА" (SA2).

4.1.4. Нажать ключ (SA3) "ТОК СОЛЕНОИДА", изменять ток от 0 до 0,75 А и при этом наблюдать за светящимся экраном лампы. Изменение положения краёв тёмного сектора экрана моделирует траектории движения электронов. Определите значение силы тока соленоида, при которой траектория электрона касается поверхности анода.

4.1.5. Выключить тумблер "НАПРЯЖЕНИЕ ЭКРАНА" (SA2).



G1 – источник постоянного тока (питание экрана лампы);
 G2 – регулируемый источник постоянного тока (питание анода лампы);
 G3 – регулируемый источник постоянного тока (питание соленоида);
 PA1 – миллиамперметр (измерение анодного тока лампы);
 PA2 – амперметр (измерение тока соленоида);
 PV1 – вольтметр (измерение анодного напряжения лампы);
 SA1 – выключатель сетевого напряжения ("СЕТЬ");
 SA2 – выключатель питания экрана лампы ("НАПРЯЖЕНИЕ ЭКРАНА");
 SA3 – выключатель питания соленоида ("ТОК СОЛЕНОИДА");
 С – соленоид;
 А – анод лампы;
 К – катод лампы;
 Э – экран лампы.

Рис. 5. Принципиальная схема установки

4.2. Определение удельного заряда электрона.

4.2.1. Включить тумблер "СЕТЬ".

4.2.2. Ручкой "НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА" установить напряжение 30 В.

4.2.3. Ручкой "ТОК СОЛЕНОИДА" изменять ток соленоида от 0 до 0,7А через 0,1А.

4.2.4. Для каждого значения тока соленоида при замкнутом ключе SA3 измерить силу анодного тока (следите, чтобы напряжение анода во время измерения оставалось неизменным).

4.2.5. Постройте предварительный график зависимости I_a от I_c и найдите диапазон изменения I_c вблизи точки перегиба, где кривая близка к линейной зависимости. Произведите в этой области дополнительные измерения I_a и I_c (6–8 точек).

4.2.6. Повторить измерения п.п. 4.2.3. – 4.2.5. при анодных напряжениях $U_a = 35\text{В}$ и $U_a = 40\text{В}$. Результаты измерений занести в таблицу.

5. Обработка результатов измерений

5.1. По полученным данным совместных измерений постройте три графика зависимости анодного тока от тока соленоида $I_a = f(I_c)$ для каждого значения анодного напряжения (все три графика выполнять на одном рисунке). При расчёте погрешности токов I_a и I_c считайте, что она определяется их систематической погрешностью.

5.2. По графикам определите критический ток соленоида $I_{кр}$ для всех трёх опытов. Для этого:

- определите границы прямолинейного участка (участок сд графика $I_a = f(I_c)$, рис. 4);

- определите параметры построенной прямой (значения параметров a, b

- и их погрешностей Δa и Δb линейной зависимости $y = ax + b$);

- учитывая, что $y = I_a$ и $x = I_c$, величину $I_{крит.}$ вычислите по формуле $I_{крит.} = -b/a$;

- рассчитайте значения $I_{крит.}$ для трех опытов.

5.3. Рассчитайте значение e/m для каждого полученного значения $I_{крит.}$, среднее значение величины e/m и случайную составляющую погрешности e/m .

5.4. Для графика, у которого удельный заряд e/m имеет значение, наиболее близкое к среднему, рассчитайте погрешности Δa , Δb и $\Delta I_{крит.}$ и по формулам для расчёта погрешности величины e/m рассчитайте систематическую составляющую погрешности величины e/m .

По случайной и систематической составляющим погрешности рассчитайте суммарную погрешность величины e/m .

Таблица

Сила тока в соленоиде $I_{\text{сол}}$, А	Сила анодного тока I_a при различных напряжениях анода U_a , А			I , А	U , В
	$U_a = 30$ В	$U_a = 35$ В	$U_a = 40$ В		

6. Контрольные вопросы

6.1. По какой траектории движутся электроны в магнетроне в отсутствии магнитного поля?

6.2. Как движутся электроны в магнетроне при наличии магнитного поля?

6.3. Чему равна сила Лоренца? Как направлена сила Лоренца?

6.4. Как меняется траектория электронов при увеличении индукции магнитного поля?

6.5. От чего зависит величина анодного тока I_a в магнетроне?

6.6. Почему при изменении тока в соленоиде меняется анодный ток?

6.7. Какой ток называется критическим? Как его определить?

6.8. Почему при разных значениях анодного напряжения величина критического тока различна?

7. Литература

7.1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М.: Наука, 1974. – §§23, 36.

7.2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1998. – Т. 2, §§6.5; 6.12; 10.1 – 10.3.

Лабораторная работа № 224
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА
ЗАКОНОВ КИРХГОФА

1. Задачи работы

1.1. Измерение силы тока на участках электрической цепи и проверка выполнения первого закона Кирхгофа.

1.2. Измерение напряжения на участках электрической цепи и величины ЭДС и проверка выполнения второго закона Кирхгофа.

2. Предварительные сведения

Расчёт разветвлённых цепей постоянного тока значительно упрощается, если пользоваться законами, сформулированными Кирхгофом.

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum_k I_k = 0 \quad (1)$$

Узлом называется точка в электрической схеме, в которой сходится не менее трёх проводников (рис. 1).

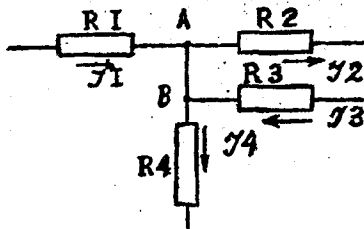


Рис. 1. Принципиальная схема узла электрической цепи

При определении, какие проводники сходятся в данном узле, следует учитывать, что в принципиальных электрических схемах сопротивление соединительных проводов считается равным нулю, и следовательно, падение напряжения на каждом из соединительных проводов также равно нулю. В схеме, изображённой на рис. 1, напряжение на участке АВ, учитывая вышеизложенное, равно нулю ($U_{AB} = 0$). Таким образом, все четыре сопротивления можно считать подключёнными к узлу А.

Предполагается, что все величины токов I_k имеют знак, причём токи, текущие по направлению к узлу, считаются положительными, а текущие от узла – отрицательными, поэтому уравнение (1) для узла А (рис. 1) примет вид:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0.$$

Для произвольной электрической схемы, имеющей N узлов, можно написать N уравнений подобного вида, но из них только $(N - 1)$ уравнения будут независимыми.

Второй закон Кирхгофа: для любого замкнутого контура алгебраическая сумма падений напряжения $I_k R_k$ на всех участках этого контура равна алгебраической сумме ЭДС E_i источников тока в этом же контуре:

$$\sum_k I_k R_k = \sum_i E_i \quad (2)$$

Падение напряжения $I_k R_k$ на участке цепи считается положительным, если направление обхода контура совпадает с направлением тока на этом участке (от положительного полюса источника к отрицательному, вне источника). Значение ЭДС источника тока E_i считается положительным, если направление обхода контура совпадает с переходом от отрицательного полюса источника к положительному (внутри источника тока). На схеме, изображённой на рис. 2, можно выделить три замкнутых контура: ACDB (I), ABFE (II) и CDFE (III). Применительно к замкнутому контуру (I) в соответствии с вторым законом Кирхгофа получим уравнение:

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 - E_2 \quad (2.1)$$

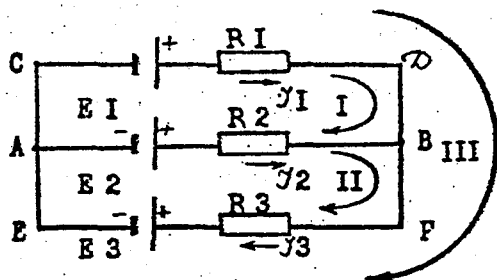


Рис. 2. Принципиальная схема электрической цепи

Также и для остальных замкнутых контуров (II) и (III) можно написать:

$$I_2 R_2 - I_3 R_3 = E_2 - E_3 \quad (2.II)$$

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1 - E_3 \quad (2.III)$$

Из уравнений (2.I) – (2.III) независимыми будут только уравнения для тех контуров, которые нельзя получить наложением других контуров друг на друга. Так, например, для цепи, изображённой на рис. 2, контур III можно получить наложением контуров I и II. Соответственно, уравнение для него получается суммированием уравнений для контуров I и II. В качестве независимых, в данном случае, можно взять любые два уравнения из трёх.

3. Метод исследования и описание установки

В работе исследуется электрическая цепь (рис. 3), в которую входят источники постоянного тока E_1 и E_2 , сопротивления $R_1 \dots R_7$, ключи K_1 и K_2 и переключатели $\Pi_1 \dots \Pi_4$.

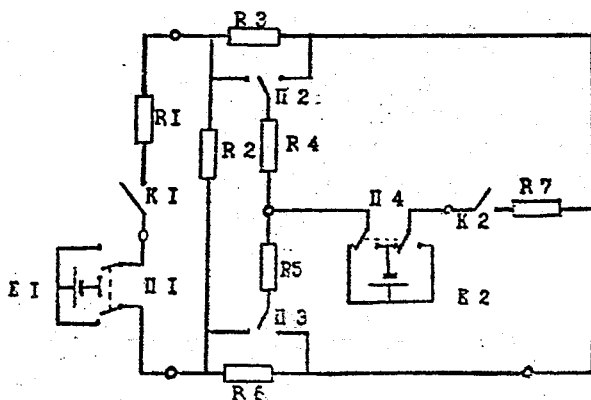


Рис. 3. Принципиальная схема лабораторной установки

Переключатели $\Pi_1 \dots \Pi_4$ позволяют получить из этой схемы несколько более простых её вариантов. Перед началом работы необходимо узнать у преподавателя номер своего варианта и поставить переключатели в соответствующее положение. Для Вашего варианта перечертите принципиальную схему (Рис. 3).

Для проверки законов Кирхгофа необходимо:

1) измерить напряжение на участках цепи с указанием его полярности. При определении полярности напряжения следует помнить, что стрелка прибора отклоняется в рабочую часть шкалы (вправо), если щуп прибора, обозначенный знаками (+) или (-) подключен к месту в схеме с более отрицательным потенциалом, чем второй щуп.

2) Указать направление тока на участках схемы в соответствии с измеренной полярностью падения напряжения на этих участках. Помните, что направление тока совпадает с движением положительных зарядов, т.е. от положительного потенциала к отрицательному.

3) Рассчитать силу тока в участках цепи по формуле (3).

При проведении измерений следует учитывать, что напряжение U_k на сопротивлении R_k является прямым измерением, а сила тока I_k , протекающего через R_k , является косвенным измерением и рассчитывается в соответствии с законом Ома по формуле

$$I_k = U_k / R_k \quad (3)$$

Следует учитывать, что каждый источник тока имеет внутреннее сопротивление r_i , которое в эквивалентной электрической схеме изображается как сопротивление, включенное последовательно с источником тока. При составлении уравнения, соответствующего второму закону Кирхгофа, напряжение на внутреннем сопротивлении источника тока следует включать в общую сумму напряжений на участках цепи

$$\sum_k I_k R_k + \sum_i I_i r_i = \sum_i E_i \quad (4)$$

где E_i – ЭДС i -ого источника тока;

I_i – сила тока на участке цепи, где находится источник тока.

Напряжение на i -ом источнике тока U_i можно записать в виде

$$U_i = E_i - I_i r_i \quad (5)$$

Подставив E_i из выражения (5) в уравнение (4) и произведя преобразования, получим следующее уравнение для второго закона Кирхгофа:

$$\sum_k I_k R_k = \sum_i U_i \quad (6)$$

Учитывая, что $I_k R_k = U_k$ – напряжение на k-ом сопротивлении, окончательно получаем уравнение второго закона Кирхгофа в виде

$$\sum_k U_k = \sum_i U_i \quad (7)$$

то есть сумма падений напряжений на сопротивлениях, входящих в замкнутый контур, равна сумме напряжений на источниках тока в этом же контуре.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Установить переключатели $\Pi_1 \dots \Pi_4$ в соответствии со своим вариантом.

4.2. Начертить эквивалентную принципиальную схему собранной электрической цепи. Переключатели $\Pi_1 \dots \Pi_4$ и незамкнутые участки цепи на эквивалентной схеме не приводить.

4.3. С помощью щупов подключить вольтметр к источнику тока и измерить напряжение на нём при замкнутых ключах (U_i). Измерение повторить для второго источника тока. Обозначьте на схеме полярность включения источников тока.

4.4. Измерить напряжение U_k на сопротивлениях $R_1 \dots R_7$. Определите полярность напряжения на каждом сопротивлении и обозначьте на схеме. Данные измерений занесите в таблицу.

5. Обработка результатов измерений

5.1. Определить величину силы тока и его направление на каждом участке цепи (формула (3)).

Таблица

	$R, \text{ Ом}$	$U_k, \text{ В}$	$U_i, \text{ В}$	$I_k, \text{ mA}$
U_1				
U_2				
R_1				
R_2				
R_3				
R_4				
R_5				
R_6				
R_7				

5.2. Выбрать на схеме три узла и для каждого из них составить конкретные уравнения первого закона Кирхгофа. При этом следует считать, что закон выполняется, если точка ноль входит в доверительный интервал результата измерений величины f , определяемой по формуле

$$f = \sum_k I_k \quad (8)$$

В этом случае абсолютная доверительная граница погрешности величины f больше её среднего значения ($\Delta f > \bar{f}$).

5.3. Выбрать три независимых контура и для каждого проверить выполнение второго закона Кирхгофа. Для этого уравнение (7) следует переписать в виде

$$\sum_k U_k - \sum_i U_i.$$

Закон выполняется, если точка ноль входит в доверительный интервал результата измерений величины φ , определяемой по формуле

$$\varphi = \sum_k U_k - \sum_i U_i \quad (9)$$

В этом случае абсолютная погрешность величины φ больше её среднего значения ($\Delta \varphi > \bar{\varphi}$).

При обработке результатов измерений считайте, что доверительная граница погрешности определяется её систематической составляющей.

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Как формулируются законы Кирхгофа?
- 6.2. Как определить знак напряжения на участке цепи?
- 6.3. Как определить знак ЭДС источника тока?
- 6.4. Сколько замкнутых контуров и узлов вы можете указать на схеме, изображённой на рис. 3?

Лабораторная работа №226

ИЗУЧЕНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Задачи работы

1.1. Измерение полной мощности и построение графика ее зависимости от силы тока.

1.2. Измерение полезной мощности и построение графика ее зависимости от силы тока.

1.3. Измерение коэффициента полезного действия источника тока и построение графика его зависимости от силы тока.

1.4. Измерение внутреннего сопротивления источника тока.

ВНИМАНИЕ! Методика определения внутреннего сопротивления зависит от номера вашего варианта.

2. Предварительные сведения

Как известно, закон Ома для замкнутой цепи (рис. 1) имеет вид

$$I = \frac{E}{R + R_I}, \quad (1)$$

где I – сила тока в цепи,

R – сопротивление нагрузки,

R_I – внутреннее сопротивление источника тока,

E – электродвижущая сила (ЭДС) источника тока.

ЭДС – энергетическая характеристика источника тока. Она численно равна работе сторонних сил по перенесению единичного положительного заряда по замкнутой цепи. В зависимости от типа источника тока сторонние силы имеют разную природу. Они могут быть обусловлены химическими процессами, внешними излучениями, диффузией носителей тока в неоднородной среде или через границу двух разнородных веществ и т. д.

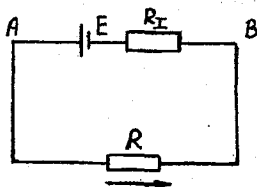


Рис. 1. Замкнутая цепь с источником тока.

В замкнутой электрической цепи выделяют внутреннюю цепь, включающую источник тока, и внешнюю цепь, включающую элементы нагрузки (на схеме нагрузкой является сопротивление R). Так как любой источник постоянного тока имеет две характеристики: электродвижущую силу (E) и внутреннее сопротивление (R_I), то на электрических схемах эквивалентное изображение источника тока также включает два элемента (участок АВ на схеме). Как видно из рисунка, напряжение на источнике тока (между точками А и В) равно напряжению на сопротивлении R , которое можно рассчитать по формуле

$$U_{AB} = U_R = IR = \frac{ER}{R + R_I} = \frac{E}{1 + \frac{R_I}{R}} \quad (2)$$

С другой стороны

$$U_{AB} = E - U_I = E - IR_I,$$

где U_I — напряжение на внутреннем сопротивлении R_I .

Из формулы (2) видно, что величина U_{AB} принимает максимальное значение $U_{AB} = E$ при разомкнутой внешней цепи, когда $R \rightarrow \infty$; при этом сила тока в цепи $I \rightarrow 0$. Максимальное значение силы тока $I_{\max}$ в цепи можно получить, когда клеммы источника тока (точки А и В) замкнуты проводником, сопротивление которого равно нулю ($R=0$). Величину $I_{\max}$ называют "ток короткого замыкания" и она равна $I_{\max} = E/R_I$. При коротком замыкании величина U_{AB} обращается в нуль.

Мощность, выделяющуюся во внешней цепи (иначе ее называют полезной мощностью), можно найти по формуле:

$$P_R = IU_R \quad (3)$$

Полная мощность, выделяющаяся в цепи, складывается из мощностей, выделяющихся на внешнем P_R и на внутреннем P_I сопротивлениях:

$$P = P_R + P_I \quad (4)$$

Используя формулы (3) и (4), получаем:

$$P = IU_R + IU_I = I(U_R + U_I)$$

и окончательно

$$P = I \cdot E \quad (5)$$

Коэффициентом полезного действия источника тока называется отношение полезной мощности и полной:

$$K = \frac{P_R}{P} \quad (6)$$

Подставляя в выражение (6) уравнения (3) и (5), получим:

$$K = \frac{U_R}{E} \quad (7)$$

3. Метод исследования и описание установки

В работе исследуется электрическая цепь с источником постоянного тока, изображенная на рис. 2.

Перед началом работы установите переключатели SB1 и SB2 в положение, соответствующее своему варианту.

В исходном положении выключатель SB3 разомкнут, и вольтметр PV показывает величину ЭДС источника тока E . При нажатии кнопочного выключателя SB3 цепь замыкается, и вольтметр, подключенный к источнику тока G1, покажет напряжение на нагрузке U_R . Одновременно следует измерить силу тока в цепи I миллиамперметром PA.

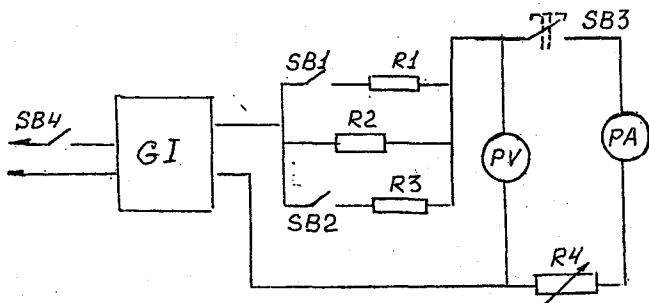


Рис. 2. Принципиальная схема электрической установки.

Для построения зависимостей величин P_R , P и K от силы тока I измерения напряжения и силы тока следует проводить не менее 10 раз во всем диапазоне изменения величины силы тока. Расчет величин P_R , P и K следует производить по формулам (3), (5), (7) соответственно.

В индивидуальном задании указывается, какую зависимость ($P_R(I)$ или $K(I)$) следует использовать, чтобы с помощью графического анализа определить величину внутреннего сопротивления источника тока R_I .

1. Методика расчета R_I из графика зависимости $P_R(I)$.

Уравнение (3) нельзя использовать для графического анализа, так как это уравнение двух зависимых переменных (I и U_R). Преобразовывая уравнение (3) к виду

$$P_R = IU_R = I(E - U_I) = I(E - IR_I) = EI - R_I I^2 \quad (8)$$

получаем уравнение относительно переменной I .

Уравнение (8) параболы, корни которой (пересечение параболы с осью I) имеют значения:

$$I_1 = 0; I_2 = \frac{E}{R_I} = I_{\max}$$

Значение силы тока I_0 , при котором $P_R(I)$ достигает своего максимального значения, можно получить из уравнения

$$\frac{dP_R}{dI} = 0,$$

откуда имеем

$$I_0 = \frac{E}{2R_I}.$$

Последнее отношение используется для расчета величины R_I

$$R_I = \frac{E}{2I_0} \quad (9)$$

2. Методика расчета R_I из графика зависимости $K(I)$.

Уравнение (7) для величины K представляет зависимость этой величины от напряжения, а не от силы тока, и его следует преобразовать к виду

$$K = \frac{U_R}{E} = \frac{E - U_I}{E} = \frac{E - IR_I}{E} = 1 - \frac{R_I}{E} I \quad (10)$$

Из этого уравнения видно, что K является линейной функцией I , причем угловой коэффициент линейной зависимости a связан с R_I соотношением

$$a = -\frac{R_I}{E} \quad (11)$$

Отсюда

$$R_l = -a \cdot E \quad (12)$$

4. Порядок выполнения работы

4.1. Поставьте переключатели SB1 и SB2 в положение, соответствующее вашему варианту.

4.2. Включите тумблер SB4 "СЕТЬ".

4.3. Измерьте значение ЭДС источника тока.

4.4. Переведите потенциометр "ТОК" в нижнее положение. В этом положении сила тока в цепи максимальна.

4.5. Проведите измерения силы тока в цепи I и напряжения на нагрузке U_R при разных положениях регулятора потенциометра "ТОК". Всего следует выбрать 8–10 равноотстоящих значений силы тока в цепи. Измерения следует проводить при нажатой кнопке SB3. Данные измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1.

№	I, мА	U_R , В	E, В

5. Обработка результатов измерений

5.1. По данным прямых измерений определить значения величин P_R , P и K (формулы (3), (5), (7)). Результаты расчета занести в таблицу 2.

Таблица 2.

№	I, мА	ΔI , мА	U_R , В	ΔU_R , В	P, Вт	ΔP , Вт	P_R , Вт	ΔP_R , Вт	K, %	ΔK , %

При расчете доверительной границы погрешности считайте, что она является систематической погрешностью.

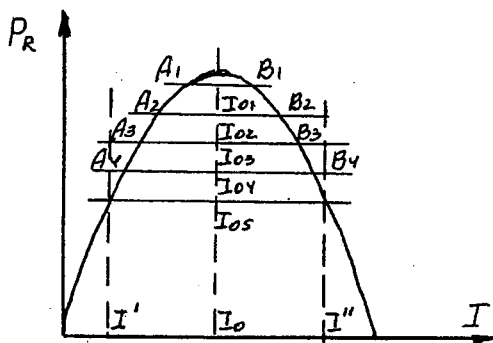
5.2. По данным таблицы 2 построить графики зависимостей $P_R = f_1(I)$, $P_R = f_2(I)$, $K = f_3(I)$. При построении графиков следует учитывать теоретические зависимости величин P_R , P и K от силы тока I (формулы (8), (5), (10)).

5.3. Обработкой графиков $P_R = f_1(I)$ и $K = f_3(I)$, в соответствии со своим вариантом, определить величину внутреннего сопротивления источника тока R_I .

5.3.1. Обработка графика $P_R = f_1(I)$:

Задача обработки – измерение абсциссы максимума функции $f_1(I)$ величины I_0 . Для этого необходимо выполнить следующие операции:

- найти область изменения величины I , в которой функция $f_1(I)$ симметрична относительно оси, проходящей через максимум функции (см. рис. 3) – участок $I' \dots I''$;
- провести 5–7 прямых, параллельных оси I , пересекающих график функции $f_1(I)$ на участке $I' \dots I''$ – отрезки A_1B_1 , A_2B_2 , A_3B_3 и т.д.;
- найти абсциссы середин отрезков A_KB_K – величина I_{OK} ;
- рассматривая величины I_{OK} в качестве наблюдений величины I_0 , произвести их обработку, рассчитать $\bar{I}_0$, $\varepsilon(I_0)$, $\Theta(I_0)$ и найти результат измерения величины I_0 ;
- используя соотношение (9), рассчитать значения R_I и ΔR_I .



5.3.2. Обработка графика $K = f_3(I)$:

- графической обработкой зависимости K от I найти угловой коэффициент этой линейной зависимости (величины a и Δa);
- по формуле (12) найти результат измерения величины R_L .

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Какова физическая природа сторонних сил?
- 6.2. Что такое ЭДС?
- 6.3. Что такое ток короткого замыкания?
- 6.4. Чем отличается полная и полезная мощность?
- 6.5. Как зависят полная и полезная мощность от силы тока в цепи?
- 6.6. Как зависят полная и полезная мощность от сопротивления нагрузки?
- 6.7. При каком сопротивлении нагрузки P_R достигает максимального значения?

Лабораторная работа № 237

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИСТОРА

1. Задачи работы

- 1.1. Измерение сопротивления термистора и построение графика его зависимости от температуры.
- 1.2. Измерение температурного коэффициента сопротивления.
- 1.3. Измерение энергии активации (ширины запрещённой зоны) для данного полупроводника.

2. Предварительные сведения

Электроны в изолированных атомах обладают дискретными уровнями энергии, т.е. электрон в изолированном атоме может принимать только строго определённые разрешённые значения энергий. Такие разрешённые значения отделены друг от друга широкими областями запрещённых энергий. Например, электрон в атоме водорода может принимать следующие значения энергий: 10,2эВ; 12,1эВ; 12,8эВ и др. Значения энергий, лежащие в интервалах между данными, невозможны, запрещены законами квантовой механики.

При объединении атомов в твёрдое тело их уже нельзя считать изолированными, при этом энергетические состояния электронов изменяются. Периодическое электрическое поле кристаллической решётки и взаимодействие между атомами существенно влияют на энергетические уровни внешних, валентных электронов. В результате узкие энергетические уровни электронов расщепляются. Вместо одного энергетического уровня, одинакового для всех изолированных атомов, в твёрдом теле возникает N очень близко расположенных уровней, которые образуют разрешённую энергетическую полосу, или *зону разрешённых энергий*. В твёрдом теле зоны разрешённых значений разделены *зонами запрещённых энергий*, включающими в себя те энергии, которыми не может обладать электрон в кристалле согласно законам квантовой механики.

Подчеркнём, что наличие разрешённых энергетических уровней и полос ещё не означает наличия электронов на них, как и в атоме наличие орбит – возможных путей движения электронов – не означает, что на этих орбитах обязательно находятся электроны.

Согласно закону квантовой механики, получившему название принципа Паули, на каждом энергетическом уровне может находиться не более двух электронов. Число уровней в разрешённой зоне ограничено, поэтому электроны заполняют не только самую нижнюю разрешённую зону, но и более высокие. "Верхняя" по энергии заполненная электронами разрешённая зона называется *валентной зоной*. Первая свободная разрешённая зона называется *зоной проводимости*. Их разделяет *запрещённая зона*. На рис. 1 приведена простейшая зонная схема.

По зонной теории различие электрических свойств металлов (проводников) и диэлектриков (непроводников) определяется двумя причинами. Во-первых, шириной запрещённой зоны. Ширина запрещённой зоны меняется для различных тел в широких пределах от нуля до нескольких электрон-вольт. Во-вторых, степенью заполнения электронами валентной энергетической зоны.

Рассмотрим сначала *диэлектрики* (изоляторы). Некоторые твёрдые тела с удельным сопротивлением $10^8 - 10^{13}$ Ом·м имеют энергетические зоны, которые разделены широкой запрещённой зоной, а все уровни валентной зоны целиком заполнены электронами. Такое твёрдое тело является изолятором, не проводящим электрический ток.

У *проводников* (металлов) схема энергетических зон несколько иная. Для одновалентных металлов (натрий и др.) валентная зона только наполовину заполнена электронами (рис. 2а). Под действием внешнего электрического поля электроны, расположенные в валентной зоне, получают энергию, достаточную, чтобы перейти на чуть более высокие энергетические уровни этой же зоны, и могут двигаться направленно. Для двухвалентных металлов (Mg, Zn и др.) ширина запрещённой зоны равна нулю, валентная зона и зона проводимости перекрываются (см. рис. 2б) и в этом случае твёрдое тело является проводником. Удельное сопротивление металлов имеет величину порядка $10^{-6} - 10^{-8}$ Ом·м. С увеличением температуры проводимость металлов уменьшается, а сопротивление возрастает по линейному закону. Увеличение сопротивления металлов с нагреванием объясняется возрастанием хаотического движения свободных электронов и увеличением амплитуды колебаний в узлах решётки.

Между металлами и изоляторами лежит группа материалов, относящихся к *полупроводникам*. Окислы металлов, сульфиды и теллуриды многих металлов обладают полупроводниковыми свойствами. Типичными представителями полупроводников, имеющих широкое применение в технике, являются германий, кремний, теллур, селен. В полупроводниках энергии теплового движения атомов кристаллической решётки даже при сравнительно низких температурах бывает достаточно, чтобы освободить электроны, которые примут участие в собственных электрических проводимостях.



Рис. 1. Зонная структура кристаллических веществ



Рис. 2. Типы зонной структуры проводников

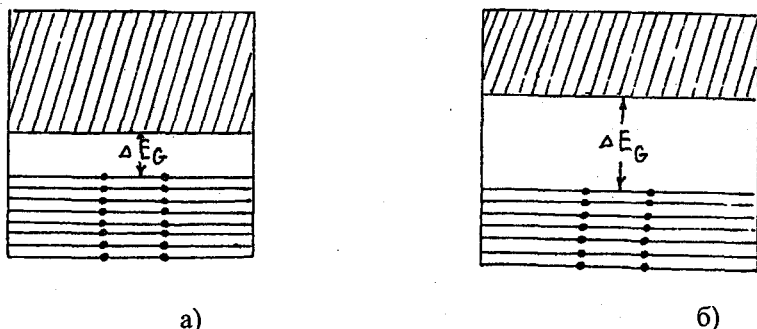


Рис. 3. Зонная структура полупроводников (а) и диэлектриков (б)

По зонной теории полупроводники отличаются от изоляторов шириной запрещённой зоны (рис. 3).

Если валентная, полностью занятая электронами зона отделена от ближайшей свободной зоны узкой запрещённой зоной, то такое тело будет изолятором лишь при низких температурах. С повышением температуры электроны, расположенные у верхней границы занятой зоны, могут быть переброшены в верхнюю зону, где имеются свободные энергетические уровни. Для этого надо затратить энергию, равную, по крайней мере, ширине запрещённой зоны.

Наименьшая энергия ϵ_0 , необходимая для перехода связанного электрона в свободное состояние, называется *энергией активации собственной проводимости*.

С повышением температуры чистых полупроводников растёт число электронов, переведённых тепловым возбуждением в свободную зону и участвующих в электропроводности. Поэтому удельная электропроводность полупроводников возрастает с повышением температуры, что принципиально отличает полупроводники от металлов. Полупроводники, сопротивление которых сильно зависит от температуры, называются *термисторами* или *термосопротивлениями*.

3. Метод исследования и описание установки

Зависимость сопротивления полупроводников от температуры имеет экспоненциальный характер

$$R = A \exp\left(\frac{\varepsilon_0}{2kT}\right) = A \exp\left(\frac{a}{T}\right), \quad (1)$$

где

$$a = \frac{\varepsilon_0}{2kT}, \quad (2)$$

отсюда

$$\varepsilon_0 = 2ka. \quad (3)$$

Здесь R – сопротивление полупроводника;

ε_0 – энергия активации;

T – температура термистора;

A – постоянная, зависящая от свойств полупроводника;

$\exp$ – основание натуральных логарифмов;

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

Логарифмируя равенство (1), получим

$$\ln R = \ln A + \frac{a}{T}. \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет линейную зависимость ($y = ax + b$) величины " $\ln R$ " от переменной " $1/T$ ", причём постоянная " a " имеет смысл углового коэффициента линейной зависимости и может быть найдена графической обработкой данных измерений.

Температурным коэффициентом сопротивления α называется относительное возрастание сопротивления при увеличении температуры на один градус:

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}. \quad (5)$$

Продифференцируем уравнение (1) по температуре:

$$\frac{dR}{dT} = -A \exp\left(\frac{a}{T}\right) \left(\frac{a}{T^2}\right) = -R \left(\frac{a}{T^2}\right) \quad (6)$$

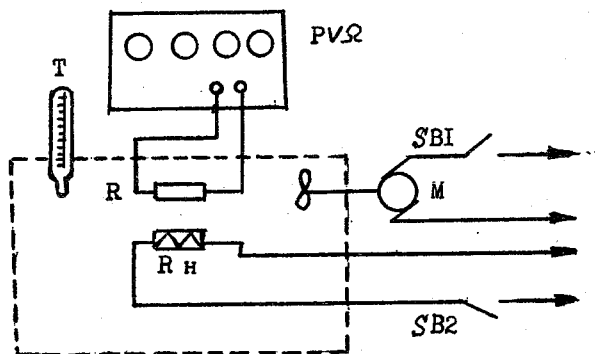
Из формулы (5) и (6) получим выражение температурного коэффициента:

$$\alpha = -\frac{a}{T^2}. \quad (7)$$

Термисторы обладают отрицательным температурным коэффициентом и по абсолютной величине значительно большим, чем температурный коэффициент металлов.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 4.

Термистор R помещён в термостат и укреплён на уровне шарика термометра T для того, чтобы точнее измерять его температуру. Термостат заполнен жидкостью, которая подогревается электронагревателем R_n до необходимой температуры. Электронагреватель включите тумблером "СЕТЬ 36 В" (выключатель $SB2$). Для равномерности прогрева жидкости в термостат помещена мешалка, которая включается тумблером "МОТОР" (выключатель $SB1$).



$PV\Omega$ – цифровой вольтметр В7-22А;
 R – один из исследуемых термисторов;
 R_n – нагреватель;
 M – электродвигатель мешалки;
 $SB1, SB2$ – выключатели нагревателя и мешалки;
 T – термометр.

Рис. 4. Принципиальная схема лабораторной установки

4. Порядок выполнения работы

4.1. Получите у преподавателя задание на проведение исследования и ознакомьтесь с описанием и схемой лабораторной установки.

4.2. Тумблером "СЕТЬ" включите измерительный прибор В7-22А.

4.3. Нажатием кнопки "К " приведите прибор в режим измерения сопротивления. Выберите необходимый предел измерения. Для этого:

- нажмите кнопку "2000", соответствующую максимальному пределу измерений $R_{пр} = 2000 \text{ кОм}$;

- если в старших разрядах цифрового индикатора появилась цифра "0", то перейдите на более чувствительный предел измерений, последовательно нажимая кнопки "200", "20" и т.д. до тех пор, пока в старшем разряде не появится цифра "1" или "0", а в следующем цифра, отличная от нуля;

- если в старшем разряде появляется цифра "2", то это означает перегрузку прибора, и необходимо перейти на менее чувствительный предел измерений.

4.4. Включите тумблеры "МОТОР" и "НАГРЕВ" (SB1 и SB2).

4.5. Измерения следует начинать, когда температура в термостате достигнет приблизительно 30°C (начало измерительной шкалы термометра). Выключите нагрев, и после прекращения повышения температуры (через 1–2 минуты) измерьте сопротивление исследуемого термистора и точное значение температуры. Результаты занести в таблицу.

4.6. Снова включите нагрев и повторите действия по пп. 4.5. при выбранных температурах. Температуры следует выбрать таким образом, чтобы во всём диапазоне измерения температуры ($30 - 90^{\circ}\text{C}$) получить 6–7 точек.

Тумблер "МОТОР" в течение всей работы не выключайте.

4.7. По окончании измерений выключите установку:

- выключите тумблер "НАГРЕВ";
- выключите тумблер "МОТОР";
- выключите тумблер "СЕТЬ 36 В";
- выключите измерительный прибор тумблером "СЕТЬ".

5. Обработка результатов измерений

5.1. Получить результаты измерения величин сопротивления R и температуры T . При обработке считать, что доверительная граница погрешности результата измерения этих величин совпадает с систематической составляющей погрешности результата измерений. При расчете δR считать, что

$$\delta R = 0,003 + 0,0025 R_{np} / R,$$

где R_{np} – предел измерений величин R на приборе, при котором производилось измерение.

Построить график зависимости сопротивления R от температуры T .

5.2. Построить график функции натурального логарифма сопротивления от величины, обратной температуре

$$\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right). \quad (8)$$

5.3. Учитывая, что величины $\ln R$ и $1/T$ связаны формулой (4), рассчитать величину углового коэффициента a и его погрешность Δa .

5.4. По формуле (3) вычислить энергию активации ε_0 данного термистора. Энергию активации принято выражать в электрон-вольтах. $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

5.5. Вычислить температурный коэффициент α по формуле (7) для каждой температуры. Построить график зависимости величины температурного коэффициента от температуры $\alpha = f(T)$.

Все расчётные данные занести в табл. 2.

Таблица 1

№ п/п	$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{кОм}$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

Таблица 2

№ п/п	$T, \text{К}$	$R, \text{Ом}$	$\ln R$	$10^3/T$	α
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Нарисуйте простейшую зонную схему для твёрдого тела.
- 6.2. Какими признаками определяется различие электрических свойств металлов и диэлектриков по зонной теории?
- 6.3. Чем отличаются изоляторы и полупроводники по зонной теории?
- 6.4. Что называется энергией активации полупроводника?
- 6.5. Что называется температурным коэффициентом сопротивления? Сравните температурный коэффициент металлов и полупроводников.
- 6.6. Как зависит сопротивление полупроводников от температуры?
- 6.7. Что называется термистором?
- 6.8. Нарисуйте графическую зависимость сопротивления проводников и полупроводников от температуры.

7. Литература

- 7.1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1978. – Т.3. – pp.53, 57, 58.

Лабораторная работа № 239

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

1. Задачи работы

1.1. Построение вольтамперной характеристики полупроводникового выпрямителя.

1.2. Измерение сопротивления и коэффициента выпрямления полупроводникового выпрямителя.

1.3. Измерение температуры p - r -перехода полупроводникового выпрямителя.

2. Предварительные сведения

Электрические свойства вещества определяются их физической природой. Все вещества по способности проводить электрический ток делятся на проводники, изоляторы и полупроводники. Проводимость чистого (не содержащего примесей) полупроводника называется собственной. Она обычно очень мала и отлична от нуля только при температурах, больших 0 К , когда в результате теплового движения часть электронов переходит из валентной зоны в зону проводимости. Введение примесей в полупроводник сильно влияет на его электрические свойства, меняя не только величину проводимости, но и её тип. Действительно, в полупроводнике проводимость бывает двух типов. Один тип проводимости подобен той, что наблюдается у таких проводников, как металлы. В них упорядоченный перенос заряда при наложении внешнего электрического поля осуществляется электронами, слабо связанными с отдельными атомами кристаллической решётки металла, т.н. "обобществлёнными" или "свободными" электронами. Разница в сравнении с металлами для полупроводника заключается в том, что у последнего при нормальных условиях концентрация таких свободных электронов мала и определяется не основным веществом, образующим полупроводник, а примесями. Рассмотрим, например, кристалл германия. На внешней стороне электронной оболочки атома германия находятся четыре валентных электрона. Они участвуют в ковалентных химических связях с электронами соседних атомов решётки, и поэтому свободных электронов в чистом германии при низких температурах

нет (рис. 1а). Уровни энергии, которые занимают валентные электроны, образуют валентную зону (v-зону). Вышележащие уровни атомов германия, свободные от электронов, при объединении атомов германия в кристалл образуют зону проводимости (с-зону). При низких температурах в этой зоне нет электронов. Между v-зоной и с-зоной существует область энергий (запрещенная зона, ее ширину обозначают обычно E_g), недоступная для электронов. Если в кристаллической решётке германия один из атомов заменить атомом примеси, который имеет пять валентных электронов (например, мышьяк, сурьма, фосфор), то остаётся "лишний" электрон, не участвующий в ковалентных связях, слабо связанный со своими атомами (рис. 1б). Этот электрон легко переходит в с-зону. Таким образом, пентавалентные примеси в четырёхвалентном кристалле являются поставщиками электронов, то есть возникает *электронная примесная проводимость*. Полупроводники такого типа называют электронными полупроводниками n-типа, а примесный атом — донором.

Рассмотрим теперь формирование другого типа проводимости, наблюдаемого у полупроводника. Предположим, что в кристаллическую решётку германия внедрён примесный атом с тремя валентными электронами (например, индий, бор, алюминий). Чтобы образовать полный комплект валентных связей, необходимых для решётки германия, примесный атом заимствует электрон у одного из соседних атомов германия. На месте ушедшего электрона образуется положительная "дырка" (рис. 1в), т. е. v-зона оказывается заполненной не полностью — в ней образуется "дырка". В свою очередь, эта "дырка" может быть заполнена электроном от соседнего атома. Процесс последовательного заполнения положительных "дырок" электронами эквивалентен движению "дырки" в полупроводнике. При отсутствии внешнего электрического поля движение "дырки" хаотично. При приложении внешнего электрического поля движение "дырок" становится упорядоченным. Возникает так называемая *дырочная примесная проводимость*, полупроводники, обладающие такой проводимостью, называются полупроводниками p-типа, а примесный атом называется акцептором. Примесная проводимость значительно больше собственной, поскольку концентрация носителей тока (электронов и дырок) определяется концентрацией доноров и акцепторов.

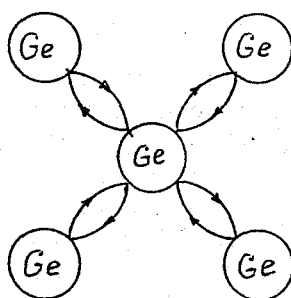


Рис. 1а. Структура связей в кристаллической решётке собственного полупроводника.

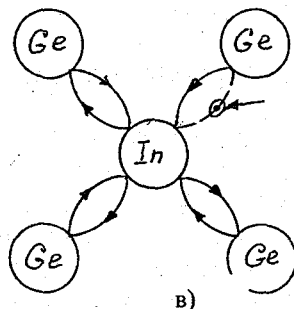
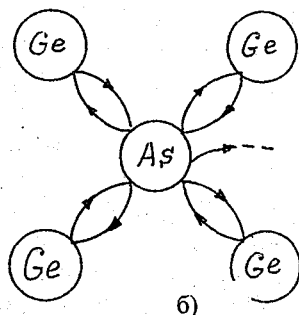


Рис. 1б. Структура связей в кристаллической решётке примесного (донорного) полупроводника.

Рис. 1в. Структура связей в кристаллической решётке примесного (акцепторного) полупроводника.

Рассмотрим теперь явление, возникающее при плотном соприкосновении (контакте) полупроводников с различными механизмами проводимости, то есть контакт полупроводников *n*- и *p*-типа. В первый момент в области контакта в *p*-полупроводнике концентрация электронов много меньше, чем в области *n*-полупроводника, а в *n*-полупроводнике концентрация дырок много меньше, чем в области *p*-полупроводника.

Поэтому при хаотическом тепловом движении электроны из *n*-полупроводника будут в среднем больше переходить в область *p*-полупроводника (т.е. левее контакта — рис. 2а), и дырки из *p*-

полупроводника будут в среднем больше переходить в область полупроводника (т.е. правее контакта – рис. 2а). Этот процесс будет протекать тем интенсивней, чем выше температура р-п-контакта. В результате такого диффузионного процесса в пространстве полупроводников вблизи контакта возникнет электрическое поле, мешающее дальнейшему проникновению электронов в р-область, а дырок в п-область (см. рис. 2б).

Дырке из р-области для преодоления п-поля, т.е. для проникновения в п-область, надо обладать энергией, превышающей среднюю тепловую энергию электронов и дырок при температуре контакта (T) в данной работе – исследуемого диода. В теории электричества в такой ситуации говорят, что на границе полупроводников возникла разность потенциалов (рис. 2в), или потенциальный барьер (этот термин подчёркивает, что дырке надо "прыгнуть" по энергии на величину $e\Delta\phi$, чтобы проникнуть из р- в п-область).

Под действием указанной разности потенциалов $\Delta\phi$ на границе возникает встречный диффузионному поток электронов и дырок (т.н. дрейфовый ток).

Итак, диффузионный ток увеличивает барьер в области контакта, а рост $\Delta\phi$ увеличивает дрейфовый ток. Указанный процесс протекает до выравнивания этих токов и установления определённой величины $\Delta\phi$. Возникает динамическое равновесие токов из р- и п-областей, так что суммарный ток равен нулю.

Этот же результат можно получить, если рассмотреть схему энергетических уровней (рис. 2г). Число электронов в зоне проводимости материала р-типа пропорционально

$$n_e \cong \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (1)$$

где E – энергия, необходимая для перехода электрона в зону проводимости в р-области.

Напоминаем, что картина потенциала электрического поля всегда рисуется для положительного заряда. Очевидно, что для отрицательного заряда картина будет иной.

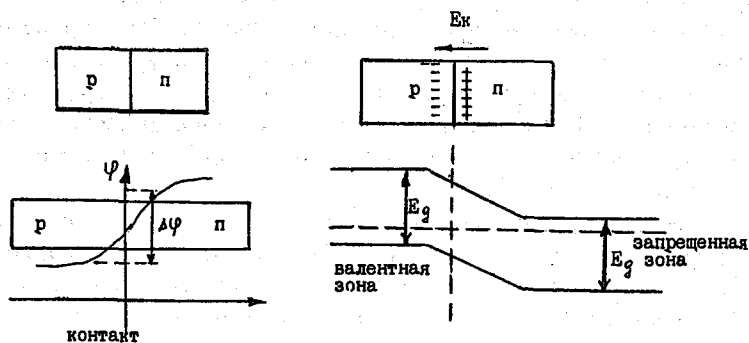
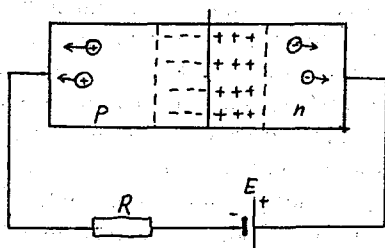


Рис. 2:

- а) контакт п-р-полупроводников в первый момент;
- б) контакт п-р-полупроводников в отсутствие внешнего поля;
- в) изменение потенциала на границе п-р-полупроводников;
- г) изменение энергетических уровней электронов при переходе через п-р-контакт в отсутствие внешнего поля.

Что же будет, если приложить к р-п-переходу внешнее электрическое поле (т.е. подключить его к внешнему источнику напряжения (рис. 3, 4))? Если поле приложено как на рис. 3, внешнее электрическое поле сложится с полем контакта и под его воздействием разность потенциалов $\Delta\phi$ в области контакта возрастает, электроны и дырки уходят в объём полупроводников из области контакта, обедняя его носителями тока и увеличивая его сопротивление. Такое подключение внешнего источника напряжения называется обратным смещением, и говорят, что р-п-переход заперт.

Если же поле приложено, как на рис. 4, то наблюдается обратная картина. В этом случае внешнее электрическое поле вызывает движение электронов и дырок к границе р-п-перехода навстречу друг другу. Электроны и дырки рекомбинируют (уничтожают друг друга), толщина контактного слоя и его сопротивление уменьшаются. Следовательно, в этом направлении (от р- к п-проводнику) электрический ток проходит сквозь р-п-переход.



+ — "дырки", — — электроны.

Рис. 3. Уровни энергии электронов в р-п-переходе при наличии обратного смещения.

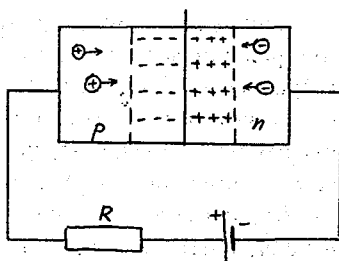


Рис. 4. Уровни энергии электронов в р-п-переходе при наличии прямого смещения.

Если теперь прикладывать к р-п-переходу попеременно одинаковые по амплитуде напряжения в прямом и обратном направлениях, то в прямом направлении р-п-переход будет пропускать значительно больший ток, чем в обратном. Этот процесс называется *выпрямлением переменного тока*. Действие р-п-перехода эквивалентно действию двухэлектродной лампы — диода. Поэтому полупроводниковое устройство, содержащее один р-п-переход, называется полупроводниковым диодом.

3. Методика исследования и описание установки

При исследовании полупроводникового выпрямителя следует измерить его сопротивление в прямом

$$R_+ = U / I_+ \quad (9)$$

и обратном направлениях

$$R_- = U / I_- , \quad (10)$$

где $I_+(U)$ и $I_-(U)$ — сила тока в прямом и обратном направлениях, и построить графики зависимости этих величин от напряжения.

Другой важной характеристикой выпрямителя является коэффициент выпрямления K :

$$K = \frac{I_+(U)}{I_-(U)} \quad (11)$$

Зависимость между током в прямом и обратном направлениях и напряжением называется вольтамперной характеристикой. Обычно график этой зависимости имеет вид кривой, представленной на рис. 5, на котором по оси абсцисс отложено прикладываемое к выпрямителю напряжение, по оси ординат в положительном направлении – прямой ток, а в отрицательном направлении – обратный ток. Анализ вольтамперной характеристики удобнее проводить, если исследовать зависимость величины $(I_+ - I_{-max})$ от напряжения U , где I_{-max} – максимальный ток в обратном направлении (ток насыщения).

Ток через р-п-переход определяется количеством носителей тока N и их способностью преодолеть барьер. Последняя определяется высотой барьера ΔE и экспоненциально уменьшается с ростом высоты барьера в соответствии с распределением Больцмана: $N \cong \exp(-\Delta E/kT)$. При приложении к р-п-переходу разности потенциалов U в прямом направлении высота барьера уменьшается на eU . Поэтому для разности токов $I_+ - I_{-max}$ справедливо выражение

$$I_+ - I_{-max} = I_+ + |I_{-max}| = A \exp(eU/kT) \quad (12)$$

где

$$A = C \exp(-E/kT) = const, \quad (13)$$

не зависящая от напряжения.

Логарифмируя уравнение (12), получаем

$$\ln(I_+ + I_{-max}) = \ln A + eU/kT. \quad (14)$$

Следует учесть, что полученное уравнение справедливо для идеального р-п-перехода и не учитывает его конструктивные особенности. В реальных условиях уравнение (14) примет вид

$$\ln(I_+ + |I_{-max}|) = \ln A + \alpha \frac{eU}{kT} \quad (15)$$

и представляет собой линейную зависимость вида

$$y = ax + b,$$

где

$$y = \ln(I_+ + |I_{-max}|) \quad (16)$$

$$x = U \quad (17)$$

$$a = \alpha \frac{e}{kT} \quad (18)$$

$$b = \ln A \quad (19)$$

Графическая обработка зависимости (15) позволяет найти сначала угловой коэффициент a , а потом и температуру р-п-перехода T .

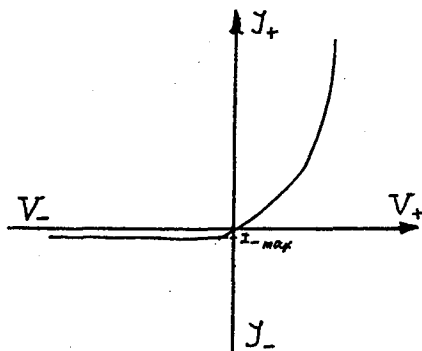


Рис. 5. Вольтамперная характеристика полупроводникового выпрямителя.

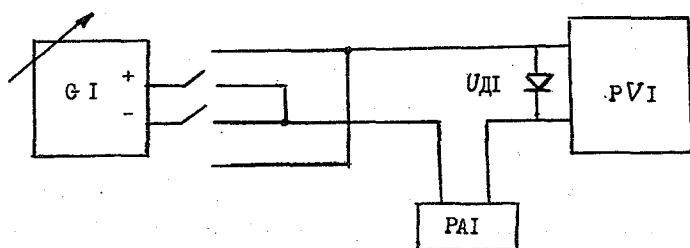
Схема лабораторной установки приведена на рис. 6. Напряжение на полупроводниковый диод VD1 типа Д-305 подается от регулируемого источника постоянного напряжения G1. Подключение полупроводникового диода в прямом и обратном направлениях осуществляется переключателем SA1. Измерение напряжения и силы тока осуществляется цифровыми приборами типа В7-20, работающими в режиме измерения "напряжения постоянного тока, В" и измерения "силы постоянного тока, А" соответственно.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Включите установку в сеть, включите тумблеры СЕТЬ на передней панели установки и на измерительных приборах В7-20.

4.2. Переключатели режима работы измерительных приборов В7-20 поставьте:

- на верхней панели – в положение "U-";
- на нижнем приборе – в положение "А".



G1 – регулируемый источник питания;
 VD1 – исследуемый полупроводниковый диод;
 SA1 – переключатель напряжения;
 PA1 и PV1 – цифровые электроизмерительные приборы.

Рис. 6. Принципиальная схема установки

4.3. При измерении ветви вольтамперной характеристики, соответствующей "обратному" току, переведите переключатель SA1 в положение "обратная", ручку "напряжение" в крайнее левое положение, на верхнем приборе (вольтметр) установите предел "1"(В), на нижнем приборе (миллиамперметр) установите предел "1"(mA).

Изменяя напряжение на диоде ручкой "напряжение" в пределах от 0 до 0,2 В, получите 10–15 наблюдений величин напряжения и силы тока.

4.4. При измерении ветви вольтамперной характеристики, соответствующей "прямому току", переключатель SA1 переведите в положение "прямая", ручку "напряжение" в крайнее левое положение. На верхнем приборе (вольтметр) установите предел измерений "1"(В), на нижнем приборе (миллиамперметр) установите предел измерений "1" (mA). Увеличивая напряжение на диоде от 0 до 0,2В, получите 10–15 наблюдений величин напряжения и силы тока. Если сила тока станет больше величины предела измерений, переходите на следующий предел (при появлении знака "П" на первом индикаторе прибора).

Учтите, что при изменении предела измерения миллиамперметра напряжение на диоде меняется. Для удобства расчёта величины коэффициента выпрямления К измерение силы тока в прямом и обратном направлениях следует проводить при одинаковых по абсолютной величине напряжениях на диоде.

4.5. Измерения вольтамперной характеристики, особенно при больших токах (~ 10 mA), проводятся по возможности быстро, чтобы не нагревался исследуемый диод, так как это искажает вольтам-

перную характеристику диода. При всех перерывах в работе переведите переключатель SA1 в нейтральное положение.

4.6. При обработке данных измерений I и U систематическую составляющую погрешности следует рассчитывать по формулам:

$$\theta(I) = 0,01I + 0,001I_{\text{пред}} \quad (20)$$

$$\theta(U) = 0,005U + 0,001U_{\text{пред}} \quad (21)$$

где $I_{\text{пред}}$ и $U_{\text{пред}}$ – пределы, на которых производятся измерения;
 I и U – данные измерений.

5. Обработка результатов измерений

5.1. Построить вольтамперную характеристику выпрямителя. Для этого по оси абсцисс вправо отложить напряжение U_+ , влево по оси – U_- . По оси ординат вверх отложить ток в прямом направлении I_+ , вниз по оси – ток в обратном направлении I_- . Поскольку ток в обратном направлении значительно меньше тока в прямом, то токи на графике следует откладывать в разных масштабах.

5.2. Построить зависимость $\ln(I_+ + |I_{-\text{max}}|)$ от U и найти из графика величину температуры перехода T (формула (18)).

При расчёте следует положить $\alpha = 0,62 \pm 0,05$.

5.3. Рассчитать коэффициент выпрямления $K = I_+ / I_-$. Построить график $K = f_1(U)$.

5.4. Рассчитать сопротивления выпрямителя в прямом и обратном направлениях. Построить графики $R_+ = f_2(U)$; $R_- = f_3(U)$

Таблица 1

Напря- жение U , В	Ток в направлении		Сопротивление в направлении		Коэффициент выпрямления, K
	прямом, I_+ , А	обратном, I_- , А	прямом, R_+ , Ом	обратном, R_- , Ом	
0,02					
0,04					
0,06					
0,08					
0,1					
0,12					
0,14					
0,16					
0,18					
0,2					

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Что такое собственная и примесная проводимость?
- 6.2. Чем определяются собственная и примесная проводимость?
- 6.3. Как называется примесный атом в электронном полупроводнике?
- 6.4. Что такое р-п-переход?
- 6.5. Что такое контактная разность потенциалов и как она возникает?
- 6.6. Почему полупроводник с одним р-п-переходом называется диодом?

7. Литература

- 7.1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т.2.— М.: Наука, 1969.
- 7.2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2.— М.: Наука, 1978.— пп. 57, 58, 59, 64.
- 7.3. Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики. Т.2.— М.: Наука, 1974.

Лабораторная работа № 240

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

1. Задачи работы

1.1. Построение анодной характеристики лампы.

1.2. Измерение работы выхода электрона.

2. Предварительные сведения

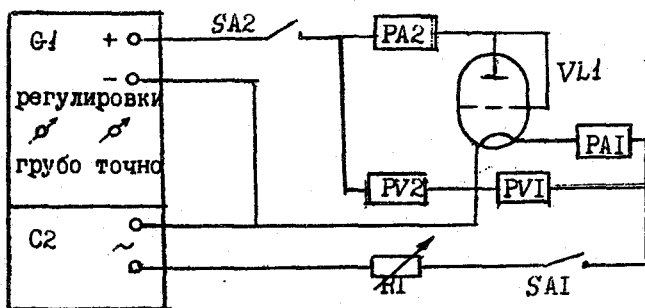
Термоэлектронной эмиссией называется испускание электронов нагретыми твёрдыми или жидкими телами. В настоящей работе изучается термоэлектронная эмиссия с поверхности нагретого металла.

Электроны проводимости не могут самопроизвольно покидать металл, это удаётся только тем электронам, энергия которых оказывается достаточной для преодоления потенциального барьера, имеющегося на поверхности. Возникновение этого барьера обусловлено следующими причинами. Случайное удаление электрона от наружного слоя положительных ионов решётки приводит к возникновению в том месте, которое покинул электрон, избыточного положительного заряда. Кулоновское взаимодействие с этим зарядом заставляет электрон, скорость которого не очень велика, вернуться обратно. Таким образом, отдельные электроны всё время покидают поверхность металла, но удаляются от неё не более, чем на несколько межатомных расстояний (10^{-9} м), а затем поворачивают обратно. Чтобы покинуть металл (удалиться на расстояние, большее, чем 10^{-9} м), электрон должен обладать большой кинетической энергией. Наименьшая величина дополнительной энергии, которую необходимо сообщить электронам, чтобы они могли покинуть металл, называется *работой выхода*. Металлы могут покинуть только те электроны, кинетическая энергия которых больше, чем работа выхода. При нагревании металла число электронов, способных покинуть металл, увеличивается.

Работа выхода зависит от природы металла и от состояния его поверхности. Наноса на поверхность металла оксидные слои, можно сильно уменьшить работу выхода электрона. Работу выхода принято измерять в электронвольтах ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

3. Метод исследования и описание установки

Исследование явления термоэлектронной эмиссии удобно проводить с помощью двухэлектродной электронной лампы (вакуумного диода). В данной работе для этой цели используется электровакуумный триод типа ГУ-4, включённый как диод (управляющая сетка соединена с анодом). Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 1. Схема включает в себя: 1) цепь питания накала лампы, состоящую из источника питания G2 напряжением 6,3В; регулятора тока накала – переменное сопротивление R1; измерительных приборов цепи накала амперметра PA1 и вольтметра PV1; выключателя SA1 ("ток накала"), и 2) цепь анодного питания, состоящую из регулируемого в пределах 0–300В источника питания G1, измерительных приборов анодной цепи: миллиамперметра PA2, вольтметра PV2 и выключателя анодного питания SA2 ("анодное напряжение"). Регулировка анодного напряжения производится ручками "грубо" и "точно" с общим обозначением "регулировка".



- VL1 – электровакуумный триод, включенный как диод;
- PA1 – амперметр цепи накала лампы;
- PV1 – вольтметр цепи накала лампы;
- PA2 – миллиамперметр анодной цепи лампы;
- PV2 – вольтметр анодной цепи лампы;
- G1 – источник анодного питания лампы;
- G2 – источник питания накала;
- SA1 – выключатель накала лампы;
- SA2 – выключатель анодного напряжения;
- R1 – регулятор тока накала.

Рис. 1. Принципиальная схема установки.

При подаче на вольфрамовую нить (катод) напряжения накала U_n она нагревается, и количество электронов, способных выйти за поверхность нити с единицы поверхности катода в единицу времени, существенно возрастает. Вылетевшие электроны увеличивают объёмный отрицательный заряд вблизи поверхности катода. Если создать электрическое поле между катодом и анодом, то электроны начнут двигаться к аноду, и величина отрицательного объёмного заряда вблизи поверхности катода уменьшится. При подаче на анод положительного (относительно катода) напряжения U_a , электроны начнут двигаться к аноду, и величина объёмного заряда вблизи поверхности катода немного уменьшится. При малых значениях U_a (участок АВ на рис.2) анодный ток ограничен пространственным зарядом электронов у катода и подчиняется закону Богуславского-Ленгмюра

$$I = LU^{3/2},$$

где L – константа, зависящая от формы и размеров электродов.

При увеличении анодного напряжения U_a объёмный заряд начинает рассасываться, рост количества электронов, достигнувших анода, прямо пропорционален увеличению анодного напряжения (участок ВС)

и выполняется закон Ома $I_a \sim U_a$. При некотором значении анодного напряжения U_{ao} уже все электроны, испущенные с единицы поверхности катода в единицу времени, достигают анода, поэтому при дальнейшем увеличении $U_a > U_{ao}$ величина анодного тока не меняется (участок СД), объёмный заряд уменьшится практически до нуля, и сила анодного тока I_a достигнет своего максимального значения. Величина анодного тока, протекающего при этом в цепи, уже не зависит от анодного напряжения, и поэтому называется *током насыщения*.

Зависимость силы анодного тока от анодного напряжения $I_a = f(U_a)$ при напряжении нити накала $U_n = \text{const}$ изображается кривой, называемой анодной характеристикой лампы (рис. 2), причём ток насыщения $I_{нас}$ будет тем больше, чем больше температура нити накала T , т.е. чем больше будет ток накала I_n (рис. 3).

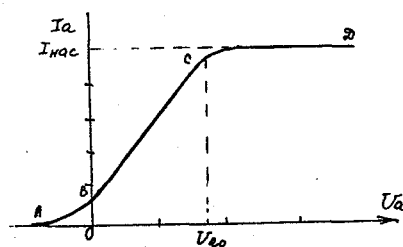


Рис. 2. Анодная характеристика двухэлектродной лампы

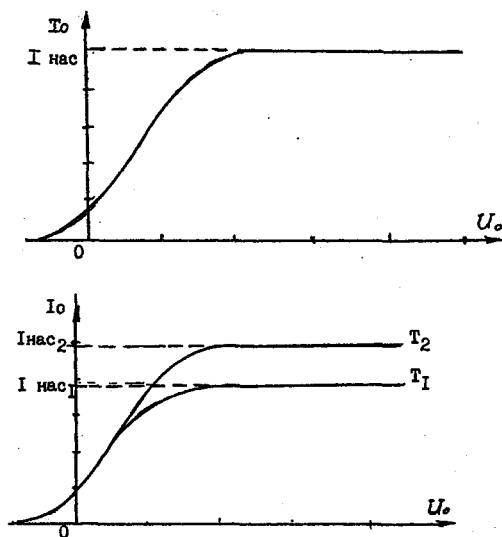


Рис. 3. Зависимость анодной характеристики от температуры катода ($T_2 > T_1$)

Для электровакуумного диода зависимость силы тока насыщения $I_{\text{нас}}$ от температуры определяется формулой:

$$I_{\text{нас}} = BT^2 \exp\left(-\frac{A}{kT}\right) \quad (1)$$

где A – работа выхода;

k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T – температура нити накала (катода).

Так как в уравнении (1) экспоненциальный множитель меняется с изменением температуры T значительно быстрее, чем BT^2 , то приближенно можно считать, что $BT^2 = C = \text{const}$, т.е.

$$I_{\text{нас}} = C \exp\left(-\frac{A}{kT}\right) \quad (2)$$

Логарифмируя уравнение (2), получим

$$\ln I_{\text{нас}} = \ln C - \left(\frac{A}{kT}\right) \quad (3)$$

Как видно из уравнения (3), величина $\ln I_{\text{нас}}$ ("у") линейно зависит от величины $\frac{1}{T}$ ("х"), причём угловой коэффициент этой зависимости ("а") равен $(-\frac{A}{k})$. Следовательно, определив его, можно найти А:

$$A = -ak. \quad (4)$$

Сопротивление нити накала R зависит от температуры нити T и связаны эти величины следующей приближённой формулой:

$$T = B_0 + B_1 \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 + B_2 \left(\frac{R}{R_0}\right)^2, \quad (5)$$

где B_0, B_1, B_2, R_0 – постоянные величины (указаны на установке);

R – сопротивление нити накала.

Величину R можно определить по закону Ома:

$$R = \frac{U_H}{I_H}, \quad (6)$$

где U_H – напряжение нити накала;

I_H – сила тока накала.

Подставляя выражение (6) в формулу (5), получим окончательно формулу для определения температуры нити накала T :

$$T = B_0 + \frac{B_1}{R_0} \cdot \frac{U_H}{I_H} + \left(\frac{B_2}{R_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{U_H}{I_H}\right)^2 \quad (7)$$

Следует учесть, что хотя формула (7) для определения температуры нити накала является приближённой, точность измерения входящих в неё коэффициентов (B_0, B_1, B_2, R_0) и точность расчёта по этой формуле достаточно высоки, и погрешность измерения величины T определяется погрешностями измерения величин U_H и I_H .

4. Порядок выполнения работы

Прежде, чем приступить к работе, разберитесь, какие приборы относятся к цепи накала катода, а какие – к анодной цепи.

Затем необходимо выполнить следующее:

4.1. Включить установку тумблером "сеть".

4.2. Включить тумблер "ток накала".

4.3. Через 2–3 минуты, когда лампа прогреется, включить тумблер "анодное напряжение".

4.4. Снять анодную характеристику лампы при заданном напряжении накала. Для этого:

- реостатом R1 установить напряжение накала 5В (вольтметр PV1) и поддерживать его постоянным с помощью этого реостата;
- повышать анодное напряжение от нуля до максимального с помощью потенциометра, имеющего две ручки регулировки – "грубо" и "точно". Для каждого значения анодного напряжения U_a (вольтметр PV2) записать значения анодного тока I_a (миллиамперметр PA2). Поскольку кривая зависимости анодного тока от анодного напряжения идёт неравномерно (рис. 2), то вначале, когда $U_a < 20$ В, измерения следует производить через каждое минимальное деление шкалы вольтметра, а при $U_a > 20$ В – через каждые 20 В. Данные занести в таблицу 1.

Таблица 1

№	Напряжение накала, U_n , В	Анодное напряжение, U_a , В	Анодный ток, I_a , мА
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

4.5. Исследовать зависимость тока насыщения от температуры нити накала. Для этого:

- установить анодное напряжение (вольтметр PV2), соответствующее току насыщения ($U_a = 300$ В) и поддерживать его постоянным с помощью ручек регулировки "грубо" и "точно";

– с помощью реостата R1 увеличивая в цепи накала напряжение накала U_n через каждые 0,2В в интервале от 4 до 6 В (вольтметр PV1), измерить силу тока накала I_n (амперметр PA1) и анодный ток насыщения $I_{нас}$ (миллиамперметр PA2). Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Напряжение накала, U_n , В	Ток накала, I_n , А	Ток насыщения, $I_{нас}$, мА	T , К	$1/T$, K^{-1}	$\ln I_{нас}$

5. Обработка результатов измерений

5.1. По данным табл. 1 построить график анодной характеристики лампы.

5.2. Пользуясь формулой (7), определить температуру нити накала (для различных значений тока накала I_n) используя данные таблицы 2. Результаты вычислений занести в табл.2.

5.3. Рассчитать значения величины $\ln I_{нас}$ и $1/T$. Данные занести в табл.2. Доверительные границы погрешности величины ($1/T$) и ($\ln I_{нас}$) рассчитывайте, полагая, что доверительные границы погрешности прямых измерений (I_a , U_a , I_n , U_n) определяются систематической погрешностью. Учтите также, что погрешности измерения величин B_0 , B_1 , B_2 и R_0 не являются лимитирующими при расчёте погрешности величины T .

5.4. Постройте график зависимости величины $\ln I_{нас}$ ("y") от $1/T$ ("x"), графической обработкой рассчитайте угловой коэффициент a и получите величину A по формуле (4).

6. Контрольные вопросы

6.1. Дать определение термоэлектронной эмиссии.

6.2. Что называется работой выхода электронов из металла?

- 6.3. От чего зависит работа выхода?
- 6.4. Какой ток называется током насыщения?
- 6.5. От чего зависит ток насыщения?
- 6.6. Как изменить температуру нити накала?
- 6.7. Укажите на рис. 1 цепь накала катода.
- 6.8. Объясните участок АВ на кривой вольтамперной характеристики. Подчиняется ли зависимость I_a от U_a закону Ома?
- 6.9. Где на графике $I_a = f(U_a)$ выполняется закон Ома и почему?

7. Литература

- 7.1. Савельев И.В. Курс общей физики, т. 3. – М.: Наука, 1979, §§ 60, 61.
- 7.2. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М.: Наука, 1974, §23.
- 7.3. Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики, т. 1. – М.: Наука, 1974, §§ 47.1, 47.2.

Лабораторная работа № 242
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

1. Задачи работы

- 1.1. Измерение горизонтальной составляющей напряжённости магнитного поля Земли.
- 1.2. Измерение вертикальной составляющей напряжённости магнитного поля Земли.
- 1.3. Измерение магнитного наклона.
- 1.4. Измерение величины напряжённости магнитного поля Земли.

2. Предварительные сведения

Земля обладает магнитным полем. Силовые линии магнитного поля расположены так же, как силовые линии магнита, ось которого (О'О') наклонена к географической оси Земли (ОО) под углом $11,5^\circ$. Точки Земли, в которых напряженность магнитного поля имеет вертикальное направление, называются магнитными полюсами. Таких точек на Земле две: Южный магнитный полюс (силовые линии направлены вверх) расположен в северном полушарии (в Арктике, на $70^\circ 50'$ с. ш. и 96° з. д.), и Северный магнитный полюс (силовые линии направлены вниз) – в южном полушарии (в Антарктике, на $70^\circ 10'$ ю. ш. и $150^\circ 45'$ в. д.) (рис. 1). Положение магнитных полюсов изменяется с течением времени.

Прямая, проходящая через магнитные полюсы, называется магнитной осью Земли. Окружность большого круга в плоскости, которая перпендикулярна к магнитной оси, называется магнитным экватором. Напряженность магнитного поля в точках магнитного экватора имеет горизонтальное направление.

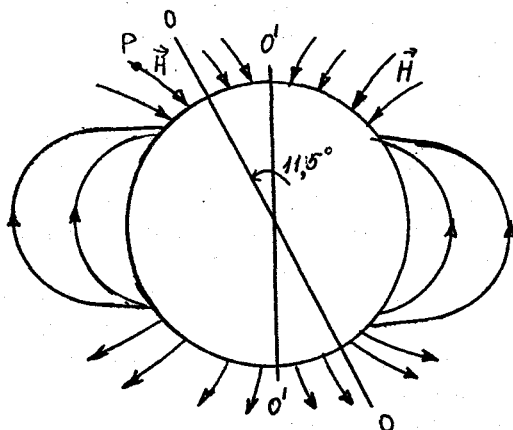
Напряженность геомагнитного поля максимальна у магнитных полюсов – $(48-56)$ А/м и минимальна на магнитном экваторе – 28 А/м. Исключением являются районы магнитной аномалии, где напряженность магнитного поля больше в связи с залеганием железных руд (например, в районе Курской магнитной аномалии она достигает 160 А/м).

Силовые линии геомагнитного поля не параллельны поверхности Земли (рис. 1), поэтому направление вектора напряженности H

магнитного поля Земли не совпадает с плоскостью горизонта данного места. Угол i между вектором H и плоскостью горизонта называется *магнитным наклоением* (рис. 2).

Направление магнитных силовых линий устанавливается с помощью магнитной стрелки. Если подвесить магнитную стрелку так, чтобы точка подвеса совместилась с центром тяжести, то стрелка устанавливается по направлению касательной к силовой линии магнитного поля Земли. Ось стрелки с горизонтом составляет угол наклонения i .

Магнитные и географические полюса Земли не совпадают, поэтому магнитная стрелка, внесенная в магнитное поле Земли, указывает направление север-юг только приблизительно. Плоскость, в которой устанавливается магнитная стрелка, называется плоскостью магнитного меридиана данного места, а линия пересечения плоскости магнитного меридиана с горизонтальной плоскостью — магнитным меридианом. Угол между магнитным и географическим меридианами называется магнитным склонением φ . Магнитное склонение разделяется на восточное и западное. Для точного определения направления север-юг необходимо показание магнитной стрелки изменить на величину магнитного склонения.



ОО — ось вращения Земли;
О'О' — ось магнитного поля Земли.

Рис. 1. Магнитное поле Земли

Пусть геомагнитное поле как векторное поле в точке P (рис. 1) характеризуется вектором напряженности H . Обычно геомагнитное поле представляют так называемыми элементами земного магнетизма. В этих целях в прямоугольной системе координат (рис. 2) вектор напряженности H в направлении магнитного меридиана раскладывают на две составляющие: горизонтальную H_z , действующую в горизонтальной плоскости, и вертикальную H_v , перпендикулярную H_z . Горизонтальную составляющую можно разложить на северную H_x и восточную H_y составляющие, соответственно направленные вдоль географического меридиана и перпендикулярно ему. Стрелка компаса в каждой точке Земли направлена вдоль магнитного меридиана. Положение вектора H в пространстве характеризуется двумя угловыми составляющими земного магнетизма: магнитным склонением φ и наклонением i . Магнитное склонение — угол между горизонтальной плоскостью и направлением полного вектора H . Положительным склонением будет восточное, когда вектор H отклонен от севера к востоку, отрицательным — западное. Наклонение будет положительным, когда вектор H направлен вниз от земной поверхности (Северное полушарие), отрицательное — при направлении H вверх (Южное полушарие). Величины H , φ и i носят название элементов земного магнетизма. Между этими элементами существуют следующие соотношения:

$$H_x = H_z \cos \varphi$$

$$H_y = H_z \sin \varphi$$

$$\frac{H_y}{H_x} = \operatorname{tg} \varphi$$

$$H = H_z \sec i = H_v \operatorname{cosec} i$$

$$i = \operatorname{arctg} \frac{H_v}{H_z} \quad (1)$$

$$H^2 = H_z^2 + H_v^2 \quad (2)$$

В СИ напряженность геомагнитного поля измеряется в амперах на метр (А/м). Ранее в практике измерений этого поля употреблялась единица, называемая эрстедом ($1 \text{ Э} = 79,6 \text{ А/м}$). Полный вектор напряженности геомагнитного поля, его составляющие H_z и H_v

измеряются в А/м, склонение φ и наклонение i – в угловых градусах, минутах и секундах.

Магнитное поле Земли для всего живого на Земле служит своеобразной защитой от потоков заряженных частиц из космоса. В магнитном поле Земли траектории движения частиц изменяются, и они огибают Землю. На расстояниях примерно от 500 до 60000 км заряженные частицы движутся, нависая на линии индукции магнитного поля Земли, совершая колебания от одного полюса к другому за 0,1–1с. Эта область космоса называется радиационным поясом Земли. Лишь в полярных областях небольшая часть этих частиц вторгается в верхние слои атмосферы из радиационного пояса Земли и вызывает полярные сияния.

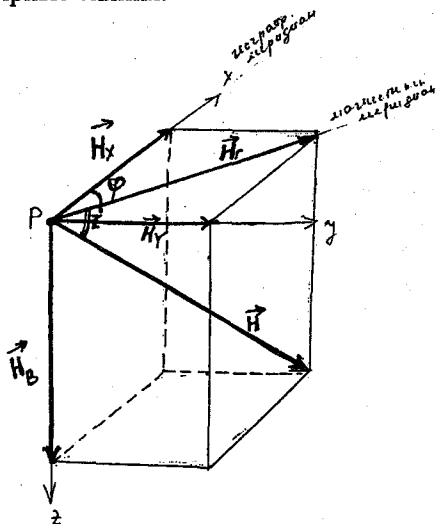


Рис. 2. Элементы магнитного поля Земли

3. Метод исследования и описание установки

Если вращать проводящий контур (катушку) в геомагнитном поле так, чтобы её витки пересекали магнитные силовые линии этого поля, то в катушке будет индуцироваться ЭДС индукции ε_i

$$\varepsilon_i = - \frac{d(\Phi N)}{dt} \quad (3)$$

где Φ – магнитный поток через виток катушки (единица измерения – вебер, Вб);

N – число витков катушки.

Соединим катушку с входными клеммами микровеберметра. Этот прибор интегрирует входной сигнал, т.е. напряжение, возникающее в катушке при её повороте. Такое интегрирование, как следует из формулы (3), даст величину магнитного потока через виток катушки:

$$\Phi = -\frac{1}{N} \int_0^t \varepsilon_i dt \quad (4)$$

где t – время поворота катушки на угол $\pi/2$.

Измерив Φ и определив площадь витка S , можно вычислить напряжённость геомагнитного поля H (или H_z и H_e).

Для определения H_z надо установить катушку так, чтобы её плоскость была расположена вертикально, перпендикулярно составляющей напряжённости геомагнитного поля H_z , а затем повернуть её на 180 град. вокруг вертикальной оси, проходящей через центр катушки (рис. 3а). Для определения H_e плоскость катушки устанавливается горизонтально, перпендикулярно составляющей H_e (рис. 3б), а затем поворачивается на 180 град. вокруг горизонтальной оси.

В расчётные формулы для определения H_z и H_e , очевидно, войдут экспериментально определяемая величина Φ (измеряется микровеберметром), площадь катушки S (диаметр катушки $D = (21,0 \pm 0,1)$ см) и число витков ($N = 200$). Надо иметь в виду, что прибор покажет удвоенное значение потока, поскольку катушка поворачивается на 180° (при этом поток дважды меняется от нулевого до максимального значений).

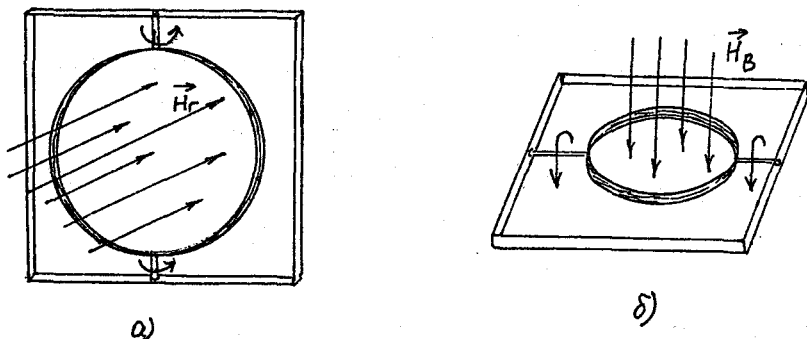


Рис. 3. Исходное положение и направление поворота катушки при определении горизонтальной (а) и вертикальной (б) составляющих напряжённости магнитного поля Земли.

С учётом сказанного, расчётные формулы будут иметь вид:

$$H_z = 2\Phi_z / \mu_0 \pi D^2 N, \quad H_v = 2\Phi_v / \mu_0 \pi D^2 N, \quad (5)$$

где Φ_z и Φ_v – значения магнитного потока, полученные при измерении H_z и H_v соответственно,

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

После определения H_z и H_v , величины H и i находятся по формулам (1) и (2).

4. Порядок выполнения работы

4.1. Установить переключатель "Wв" микровеберметра на отметку нужного диапазона. Поскольку величина измеряемого потока неизвестна, установить переключатель на самый "грубый" диапазон – на отметку "2000".

4.2. Ручки переменных резисторов ГРУБО, ТОЧНО поставить примерно в среднее положение.

4.3. Не включая кнопку УСТАНОВКА НУЛЯ – РУЧНАЯ, АВТОМ., включить кнопку СЕТЬ.

4.4. Указатель отсчётного устройства при этом, как правило, отклоняется до упора вправо или влево (если влево, то измените полярность, нажав кнопку ПОЛЯРНОСТЬ с соответствующим знаком). Через несколько секунд после включения указатель войдёт в

пределы шкалы и остановится. Если указатель остаётся за шкалой, выключите прибор и обратитесь к лаборанту.

4.5. Прогреть микровеберметр (15–30) мин. Во время прогрева прибора установить катушку прибора в положение, исходное для определения H_v (рис. 3б, пояснение в разделе 3).

4.6. Нажать кнопку УСТАНОВКА НУЛЯ РУЧНАЯ и кнопку НУЛЬ. Держа кнопку НУЛЬ в нажатом положении, ручками ГРУБО и ТОЧНО установить указатель отсчётного устройства на нулевую отметку. Отпустить кнопку НУЛЬ.

4.7. Провести измерения Φ_e . Для этого нажать кнопку ИЗМЕРЕНИЕ. Для ускоренного возврата указателя (стрелки) на нулевую отметку нажать кнопку НУЛЬ.

4.8. Держа кнопку ИЗМЕРЕНИЕ в нажатом положении, повернуть измерительную катушку на 180 град. так, как показано на рис. 3б. Произведя отсчёт, отпустить кнопку ИЗМЕРЕНИЕ.

4.9. В случае, если отброс стрелки мал, перейти на более чувствительный диапазон ("1000", "500" и т.д.) и повторить измерение. Результаты измерения занести в таблицу.

4.10. Опыт проделать 5–6 раз.

4.11. Перевести катушку в положение, исходное для определения H_z . Исходное положение и направление поворота катушки показаны на рис. 3а (пояснения в разделе 3). Провести измерения Φ_z в соответствии с пп. 4.6–4.11.

4.12. Отключить прибор, нажав кнопку СЕТЬ.

5. Обработка результатов измерений

5.1. Провести полную обработку результатов прямых измерений Φ_e и Φ_z .

5.2. Провести обработку результатов косвенных измерений величин H_z , H_e , H , i по формулам (1), (2) и (5).

Таблица

№	Φ_B , дел. шкалы	Φ_B , Вб	Φ_r , дел. шкалы	Φ_r , Вб	H_r , А/м	H_a , А/м	H , А/м	i , град
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

6. Контрольные вопросы

- 6.1. В чём заключается явление электромагнитной индукции?
- 6.2. Как следует располагать плоскость катушки при определении вертикальной и горизонтальной составляющих напряжённости магнитного поля Земли?
- 6.3. Вывести формулу (5).
- 6.4. Назовите элементы магнитного поля Земли. Дайте их определение.

7. Литература

- 7.1. Геворкян Р.Т., Шепель В.В. Курс общей физики. – М.: Высшая школа, 1972. – §§ 19,22.
- 7.2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики, т.2. – М., 1959. – §§ 202,222,223.
- 7.3. Савельев И.В. Курс общей физики, т.2. – М.: Наука, 1982. – §§52,60,61,62.
- 7.4. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики, т.2. – М.: Наука, 1982. – §§ 129,130.

Лабораторная работа № 243

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

1. Задачи работы

Экспериментальное изучение магнитного поля Земли, определение горизонтальной составляющей напряжённости магнитного поля.

2. Предварительные сведения

Основными характеристиками магнитного поля Земли являются *склонение, наклонение и численное значение горизонтальной составляющей*. В данной работе измеряется горизонтальная составляющая напряжённости магнитного поля путём сравнения её с эталонной величиной.

Как известно, магнитная стрелка, способная вращаться на острие в горизонтальной плоскости, устанавливается по направлению горизонтальной составляющей напряжённости магнитного поля H_g в плоскости магнитного меридиана данного места. Направим ось ОХ вдоль H_g (вдоль магнитного меридиана). Если в месте расположения стрелки создать дополнительное (эталонное) поле, вектор $H_э$ которого не лежит в плоскости магнитного меридиана, магнитная стрелка отклонится от первоначального положения и установится по направлению вектора $\vec{H}$ (рис. 1а):

$$\vec{H} = \vec{H}_g + \vec{H}_э.$$

Проекции его на оси равны

$$H_x = H_g + H_э \cos \alpha$$

$$H_y = H_э \sin \alpha$$

Угол отклонения стрелки φ зависит от отношения модулей векторов H_g и $H_э$ и от угла α между этими векторами.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{H_y}{H_x} = \frac{\sin \alpha}{H_g / H_э + \cos \alpha}$$

Таким образом, зная α , φ и $H_э$, можно вычислить горизонтальную составляющую напряжённости магнитного поля Земли:

$$H_r = H_3 \left(\frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \varphi} - \cos \alpha \right).$$

Эта формула значительно упрощается, если эталонное магнитное поле направить перпендикулярно плоскости магнитного меридиана ($\alpha = \pi/2$) (рис. 1б):

$$H_r = \frac{H_3}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (1)$$

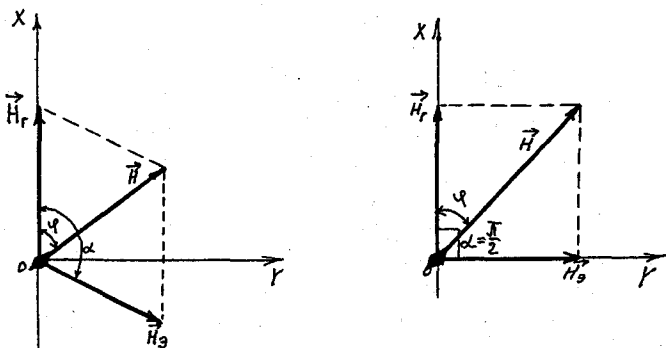


Рис. 1. Векторная сумма горизонтальной составляющей магнитного поля Земли H_3 и эталонного магнитного поля H_3 тока (а – угол α любой, б – угол $\alpha = 90^\circ$)

3. Описание установки и методика измерений

Установка состоит из катушки достаточно большого радиуса, установленной вертикально и способной вращаться относительно вертикальной оси; буссоли, расположенной в центре катушки, и схемы регулирования и измерения тока через катушку (рис. 2).

Назначение катушки – создать при пропускании через неё тока эталонное магнитное поле, величина которого может быть рассчитана по формуле

$$H_3 = \frac{IN}{2R}, \quad (2)$$

где I – ток через катушку,
 N – число витков в катушке,
 R – радиус катушки.

Буссоль представляет собой лёгкий круглый лимб с делениями, жёстко фиксированный на вращающейся магнитной стрелке (сама стрелка не видна), и два визира – задний в виде рамки с вертикально натянутой нитью и передний в виде призмы полного внутреннего отражения с лупой и щелью. Лимб имеет деления от 0° до 360° , нанесённые через 1° .

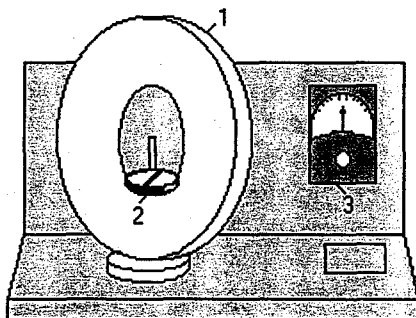


Рис. 2. Установка для определения горизонтальной составляющей поля Земли

- 1 – катушка;
- 2 – буссоль;
- 3 – схема регулирования и измерения тока через катушку.

Если линия визирования перпендикулярна плоскости катушки, то при совпадении линии магнитного меридиана с плоскостью катушки, отсчёт по лимбу равен $\varphi_0 = 90^\circ$ или 270° .

Учитывая формулы (1) и (2), получим искомую величину горизонтальной составляющей напряжённости магнитного поля Земли:

$$H_r = \frac{N \cdot I}{2R \operatorname{tg}(\varphi - \varphi_0)} \quad (3)$$

Схема питания катушки позволяет плавно изменять постоянный ток в катушке от 10 до 150 мА.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Приведите в рабочее положение визиры буссоли, перемещением переднего визира вверх-вниз добейтесь хорошей видимости шкалы лимба, разарретируйте лимб (т.е. отпустите стопор, удерживающий лимб). При работе с буссолью необходимо найти такое положение для глаза, чтобы одновременно видеть через щель перед-

него визира нить заднего, а через призму – шкалу лимба. Отсчёт при этом берётся по лимбу относительно нити заднего визира. Обратите внимание, что видимое направление шкалы лимба – обратное, счёт делений растёт налево! Для устранения трения покоя в подвесе лимба рекомендуется легко постукивать пальцем или карандашом по буссоли до полного успокоения лимба.

4.2. Установите катушку в плоскости магнитного меридиана (при этом вектор H_z , который в данном случае перпендикулярен плоскости катушки, окажется перпендикулярен и H_z). Для этого, вращая катушку, необходимо добиться показаний буссоли 90° или 270° (т.е. линия визиров перпендикулярна плоскости катушки).

4.3. Не меняя положения катушки, включите ток через неё.

Установив потенциометром плавной регулировки выбранное значение тока I , возьмите отсчёт φ по буссоли (не забывайте легко постукивать по ней). Занесите значения I и φ в таблицу. Проведите аналогичные измерения не менее 10 раз. При расчётах принять число витков в катушке $N = 180$, радиус катушки $R = (0,167 \pm 0,001)$ м.

Таблица

№ п/п	I , А	φ , град.	H_z , А/м	ΔH_z , А/м

5. Обработка результатов измерений

5.1. Для выбранных значений тока I и соответствующих углов φ по формуле (1) вычислить значения горизонтальной составляющей H_z магнитного поля Земли.

5.2. Считая полученные значения H_z прямыми измерениями, вычислить величину случайной погрешности измерений.

6. Контрольные вопросы

6.1. Назовите основные характеристики магнитного поля Земли.

6.2. Как следует расположить катушку и почему?

6.3. Как определить систематическую погрешность при измерении тока?

6.4. Какое число измерений необходимо выполнить и как от него зависит доверительный интервал случайной погрешности?

7. Литература

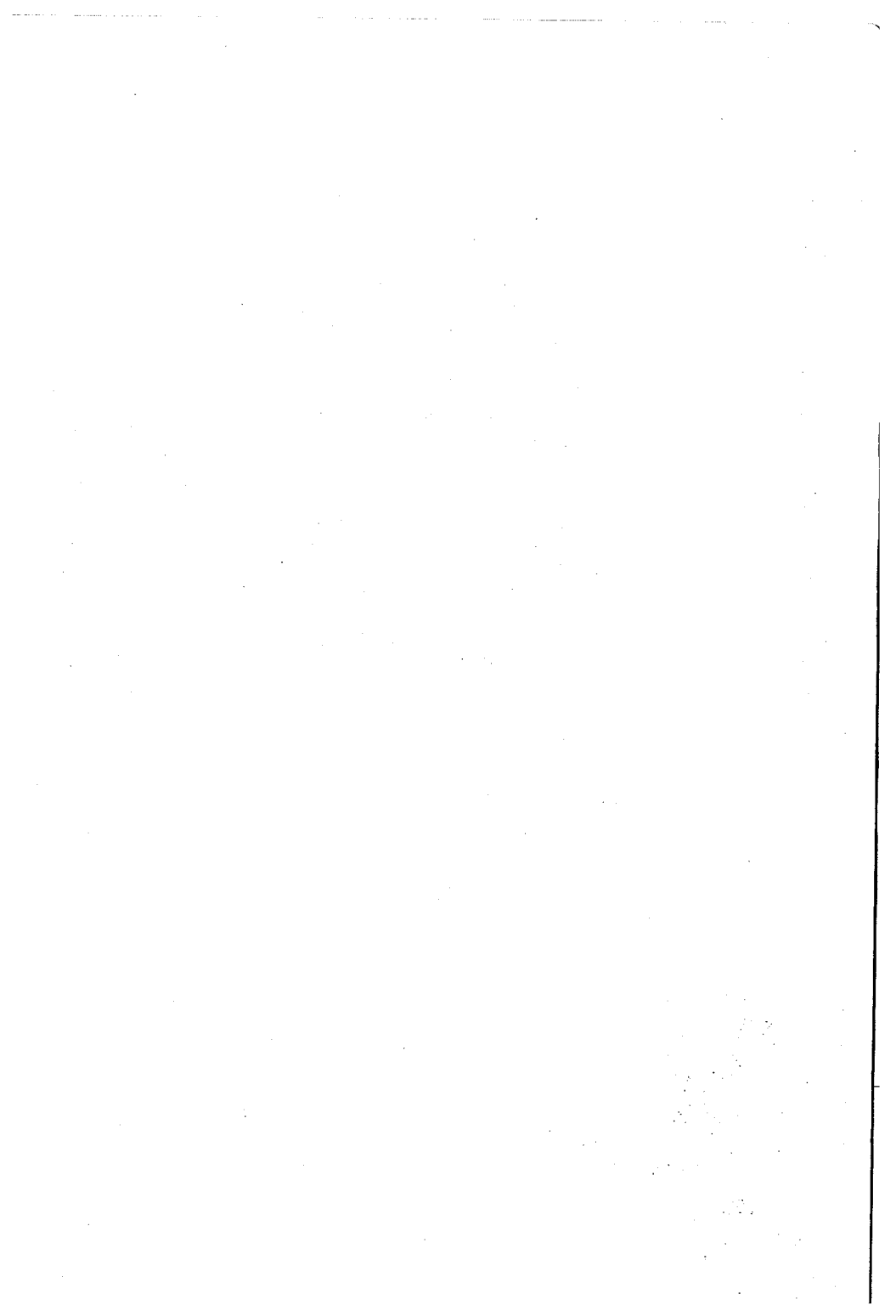
7. 1. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Т.2.– М.: Наука, 1975, гл. 13.

7. 2. Методические указания к лабораторной работе № 242.

7. 3. Путилов К.А. Курс физики. Т.2, п. 59.– М.: Физматгиз, 1962.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 201.	
Изучение цепей переменного тока	3
Лабораторная работа № 205.	
Исследование ферромагнетиков	11
Лабораторная работа № 208.	
Изучение разряда конденсатора	25
Лабораторная работа № 211.	
Определение удельного заряда электрона методом магнетрона	35
Лабораторная работа № 224.	
Экспериментальная проверка законов Кирхгофа	44
Лабораторная работа № 226.	
Изучение цепи постоянного тока	50
Лабораторная работа № 237.	
Исследование термистора	57
Лабораторная работа № 239.	
Исследование полупроводникового выпрямителя	66
Лабораторная работа № 240.	
Исследование термоэлектронной эмиссии	77
Лабораторная работа № 242.	
Определение элементов магнитного поля земли	85
Лабораторная работа № 243.	
Определение горизонтальной составляющей магнитного поля земли	93



Учебное издание

Лабораторный практикум 2 курса по дисциплине «Физика»

Раздел «Электричество и магнетизм»

Составители: Н.В. Дьяченко, Е.Н. Бодунов, И.П. Арешев,
С.А. Фокин, М.А. Мамаев, В.В. Косцов

Ответственный редактор: А.П. Бобровский

Редактор И.Г. Максимова
ЛР № 020309 от 30.12.96

Подписано в печать 05.11.2001 г. Формат 60х90 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ.л. 5,0. Уч.-изд.л. 5,2. Тираж 500. Зак. 71
РГГМУ, 195196, СПб, Малоохтинский пр., 98.
Отпечатано ООО «Концепт»
