

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине

ФИЗИКА

Разделы: Электричество и магнетизм
курс 1, 2

Санкт-Петербург
РГГМУ
2020

Одобрено методической комиссией Института информационных систем и геотехнологий

УДК 537

ББК 22.33

Лабораторный практикум по дисциплине «Физика». Разделы:
Электричество и магнетизм. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 76 с.

Авторы: А.П. Бобровский, Н.В. Дьяченко, В.В. Косцов, Е.Ю. Михтеева,
И.А. Потапова, А.Л. Скобликова, В.Г. Сыромятников,
П.П. Хлябич, Т.Ю. Яковлева.

Ответственный редактор: А.П. Бобровский, зав. каф. физики, канд. физ.-
мат. наук, доцент, РГГМУ.

Практикум содержит описания 7 лабораторных работ Учебной лаборатории по разделам «Электричество» и «Магнетизм». В каждой работе излагаются физические основы изучаемого явления, описание метода исследования и экспериментальных установок, порядок выполнения работы, методика обработки экспериментальных данных и т.д.

Лабораторный практикум предназначен для студентов первого и второго курсов очной формы обучения по направлениям гидрометеорология, прикладная гидрометеорология, физика, экология и природопользование, корабельное вооружение и по специальности информационная безопасность телекоммуникационных систем.

© Коллектив авторов, 2020,

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2020.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторный практикум содержит описание 7 лабораторных работ по разделам «Электричество» и «Магнетизм», выполнение которых предусмотрено федеральным государственным образовательным стандартом третьего поколения (ФГОС-3+) для указанных направлений и специальностей. Приводятся описания сущности физических явлений, изучаемых в процессе выполнения лабораторных работ, схемы лабораторных установок, методики проведения физических экспериментов. В заключение каждой работы прилагается перечень контрольных вопросов. Список необходимой литературы и Интернет-ресурсы приведены в конце пособия.

Каждая работа рассчитана на два академических часа. Студент допускается к выполнению лабораторной работы после самостоятельного домашнего изучения необходимых сведений из теории, ознакомления с порядком выполнения эксперимента и только при наличии должным образом оформленного рабочего журнала. После выполнения измерений и необходимых расчетов в рабочем журнале оформляется отчет на отдельных листах, который представляется преподавателю. При этом студент должен показать понимание физического содержания проведенных измерений и дать оценку их достоверности.

Содержание.

Лабораторная работа № 201.	
Изучение цепей переменного тока	5 .
Лабораторная работа № 205.	
Исследование ферромагнетиков	15.
Лабораторная работа № 208.	
Изучение разряда конденсатора.	30
Лабораторная работа № 224.	
Расчет разветвленной электрической цепи	38
Лабораторная работа № 226.	
Изучение цепи постоянного тока	45
Лабораторная работа № 237.	
Исследование термистора	54
Лабораторная работа № 239.	
Исследование полупроводникового выпрямителя	63

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 можно записать в виде

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

где I_m – амплитудное значение переменного тока,

ν – частота переменного тока,

φ_0 – начальное значение фазы колебаний. В дальнейшем будем полагать, что $\varphi_0 = 0$. Физически такое представление эквивалентно тому, что полпериода ток положительный (т.е. заряды текут в одну сторону), а вторые полпериода он отрицательный, (т.е. заряды текут в противоположную сторону).

Всякая реальная электрическая цепь (пример последовательного соединения элементов цепи представлен на рис.1) 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 (2)

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

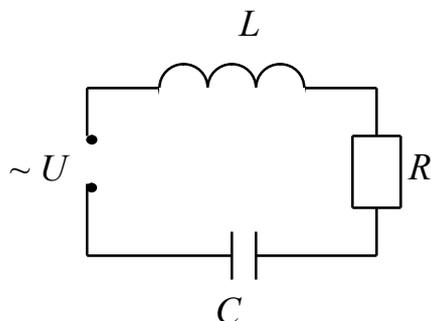


Рис.1 Схема последовательного соединения элементов в цепи

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

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

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:

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

Если взять производную по времени от выражения для мгновенного тока (1) при условии, что $\varphi_0 = 0$ и подставить полученный результат в (4), то получим

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

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

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

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

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

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 отстаёт от него.

Элементы электрической цепи, для которых имеет место сдвиг фаз между током и напряжением, называются *реактивными сопротивлениями* в отличие от активных сопротивлений, на котором нет сдвига фаз между силой тока и напряжением. 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

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

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

$$X_L = \frac{U_{Lm}}{I_m} = 2\pi\nu L \quad (9)$$

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

$$X_C = \frac{U_{Cm}}{I_m} = \frac{1}{2\pi\nu C} \quad (10)$$

В цепи переменного тока *активные* и *реактивные* сопротивления различаются способом преобразования электромагнитной энергии. Когда электрический ток проходит через элементы с активным сопротивлением, происходят необратимые потери энергии связанные с превращением электрической энергии в тепловую энергию (типичным примером служит электрическая плита). То же самое происходит с резистором, в котором тепло выделяется, но обратно в электроэнергию не превращается. Такими же свойствами обладают приборы освещения, электродвигатели, трансформаторные обмотки, провода и кабели и т.д.

Как указывалось ранее, характерной особенностью элементов с активным сопротивлением является совпадение по фазе тока и напряжения. На величину активного сопротивления оказывают влияние физические свойства проводника – сечение, длина, материал, температура.

Реактивное сопротивление возникает в тех случаях, когда переменный ток проходит через элементы, обладающие индуктивностью и емкостью.

Индуктивное сопротивление. При протекании переменного тока в катушке индуктивности появляется переменное магнитное поле. В результате, в ней возникает ЭДС самоиндукции, которая препятствует изменению тока в катушке. Под влиянием ЭДС самоиндукции энергия магнитного поля в катушке возвращается в электрическую цепь, то есть между источником питания и обмоткой происходит своеобразный обмен энергией. Это дает основание полагать, что катушка индуктивности обладает реактивным сопротивлением.

В отличие от активного сопротивления, индуктивное не является характеристикой проводника, а зависит от частоты f тока: чем больше частота переменного тока, тем больше сопротивление, которое ему оказывает катушка.

Емкостное сопротивление появляется в цепи, содержащей емкость и источник переменного тока. В конструкцию конденсатора входят обкладки в количестве двух и более штук, разделенных слоями диэлектрика, что не позволяет постоянному току проходить через конденсатор. Но переменный ток может проходить через него, т.к. физически прохождение переменного тока эквивалентно изменению знаков зарядов на обкладках конденсатора. Величина заряда на обкладках конденсатора ограничена емкостью конденсатора. В момент времени равный половине периода колебаний, напряжение на обкладках конденсатора меняет свою полярность на противоположное значение, однако значение тока поддерживается еще некоторое время за счет заряда, накопленного в предыдущий полупериод, а не меняется синхронно с напряжением. Это и позволяет говорить о том, что конденсатор обладает реактивным сопротивлением. В результате взаимодействия конденсатор и источник тока постоянно обмениваются энергией.

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

$$C = \frac{1}{2\pi\nu X_c} \quad (11)$$

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

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).

Однако для амплитудных значений второй закон Кирхгофа в таком виде не выполняется, т.е.

$$U_m \neq U_{Lm} + U_{Rm} + U_{Cm}$$

Это происходит потому, что своих максимальных значений напряжения на элементах цепи достигают в разные моменты времени из-за сдвига фаз.

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.

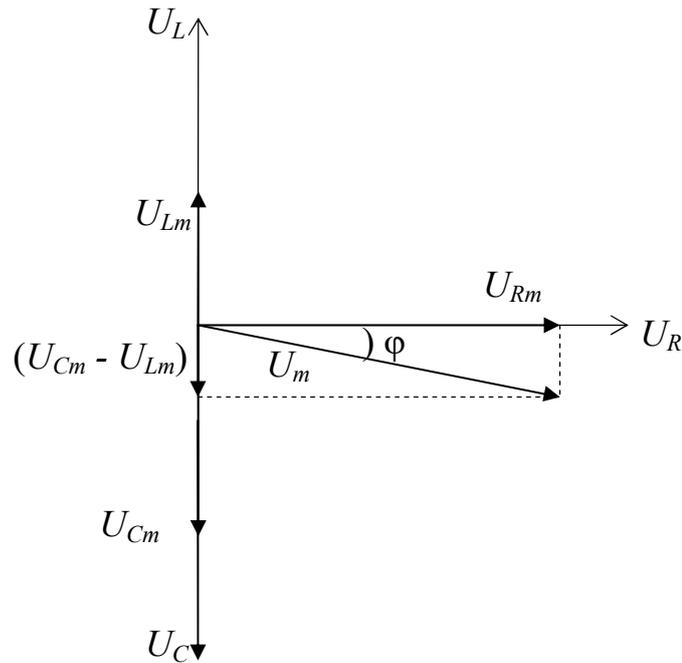


Рис. 2. Векторная диаграмма для цепи, изображённой на рис. 1

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 повернут 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

$$U = U_m \sin(2\pi\nu t + \varphi) \quad (14)$$

где φ – начальный сдвиг фазы входного напряжения относительно напряжения на активном сопротивлении R .

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. Он зависит от значений L и C , но обычно определяют не сам угол φ , а его функцию $\cos \varphi$.

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

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

$$P = i U, \quad (18)$$

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:

$$\bar{P} = \frac{I_m U_m}{2} \cos \varphi \quad (19)$$

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 источнике. 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, 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:

$$I_m = \sqrt{2}I_э, \quad (20)$$

$$U_m = \sqrt{2}U_э, \quad (21)$$

При расчетах погрешностей необходимо учитывать, что относительная погрешность для всех амплитудных значений не меняется, а абсолютная изменяется пропорционально $\sqrt{2}$.

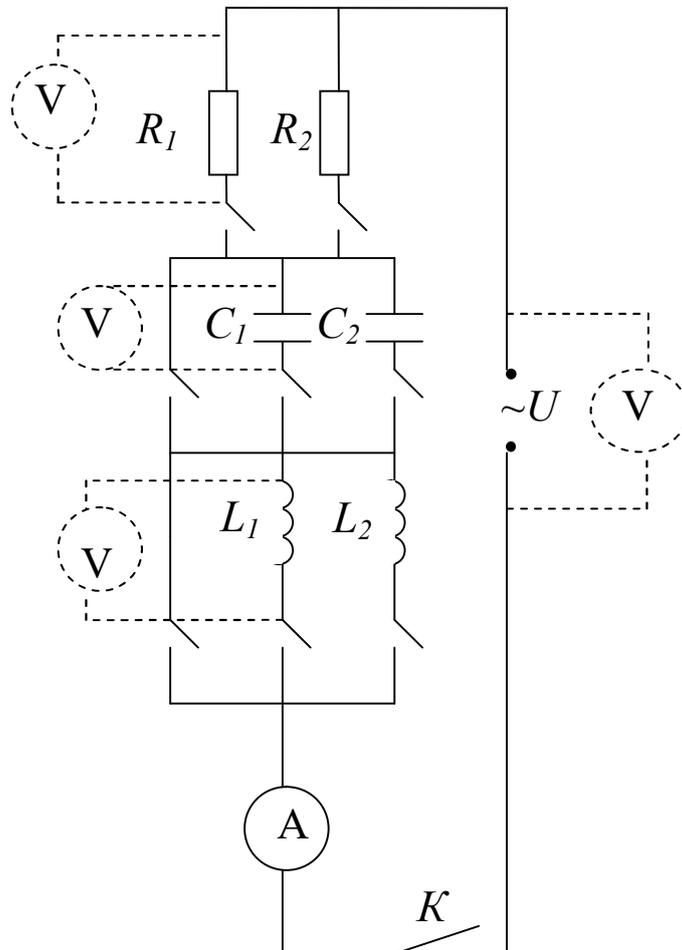


Рис. 3. Принципиальная схема лабораторной установки:

R_1, R_2 - сопротивления; C_1, C_2 - конденсаторы; L_1, L_2 - катушки;

A – амперметр; V – вольтметр; K – кнопочный выключатель.

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_{R_3} , U_{C_3} , U_{L_3}) 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, mA	U_{C_3}, B	U_{L_3}, B	U_{R_3}, B	U_3, B	$f, \text{Гц}$

5. Обработка результатов измерений

5.1. Рассчитайте амплитудные значения силы тока и напряжений, пользуясь формулами (20), (21) и занесите их в таблицу 2.

Таблица 2

Амплитудные значения токов и напряжений

I_m, A	U_{Cm}, B	U_{Lm}, B	U_{Rm}, B	U_m, B	$f, \text{Гц}$

5.2. По амплитудным значениям напряжений постройте на миллиметровке векторную диаграмму (Таблица 2).

5.3. Проверьте, выполняется ли второй закон Кирхгофа для цепи переменного тока. Для этого сравните значение измеренного напряжения U_m с его вычисленным значением по формуле (15). Закон выполняется, если эти значения совпадают в пределах погрешности.

5.4. Рассчитайте значения активных и реактивных сопротивлений (R , X_C и X_L) по формулам (8), (9), (10) и полный импеданс цепи (Z) по формуле (17).

5.5. Рассчитайте значение индуктивности (L) и ёмкости (C) элементов цепи по формулам (11) и (12).

5.6. Рассчитайте значение $\cos \varphi$ по формуле (16).

5.7. Рассчитайте мощность электрического тока P , потребляемую данной цепью по формуле (19).

Выполнение пп.5.4-5.7 проводится в соответствие 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. Какова физическая природа возникновения индуктивного и емкостного сопротивлений?
- 6.3. Как построить векторную диаграмму и что она позволяет определить?
- 6.4. Что характеризует величина $\cos \varphi$?

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

1. Задачи работы

- 1.1. Измерение магнитной индукции магнитного поля.
- 1.2. Измерение напряжённости магнитного поля.
- 1.3. Построение кривой намагничивания.
- 1.4. Измерение магнитной проницаемости ферромагнетика.
- 1.5. Построение графика зависимости магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля.
- 1.6. Измерение работы перемагничивания 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 – относительная магнитная проницаемость среды. Магнитная проницаемость μ показывает, во сколько раз увеличивается индукция магнитного поля в веществе \vec{B} по отношению к магнитному полю в вакууме \vec{B}_0 : $\mu = B/B_0$.

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, а именно движением электронов в атомах и молекулах. Электрон, двигаясь (с достаточным приближением) в атоме по круговой орбите, эквивалентен круговому току. В связи с этим можно сказать, что он обладает *орбитальным магнитным моментом* \vec{p}_m , модуль которого равен $p_m = veS$, где e - заряд электрона, v - частота вращения электрона по орбите, S – площадь орбиты. Учитывая, что $ve = I$, где I - это микроскопический

молекулярный ток, то можно записать $p_m = I S$. Магнитный момент \vec{p}_m это физическая величина, характеризующая магнитные свойства системы заряженных частиц (или отдельной частицы) и определяет взаимодействие системы с внешними электромагнитными полями и с другими подобными системами. Если электрон движется по часовой стрелке (рис.1), то ток направлен против часовой стрелки и вектор \vec{p}_m (в соответствии с правилом правого винта) направлен перпендикулярно плоскости орбиты электрона. Кроме того, движущийся по орбите электрон обладает *механическим моментом импульса* \vec{L}_e , модуль которого равен:

$$L_e = m v r = 2 m v S,$$

где m - масса электрона, r – радиус орбиты, v - скорость вращения электрона по орбите ($v = 2\pi r / T$, $\pi r^2 = S$). Его направление также определяется правилом правого винта и называется этот механический момент импульса \vec{L}_e *орбитальным механическим моментом электрона*.

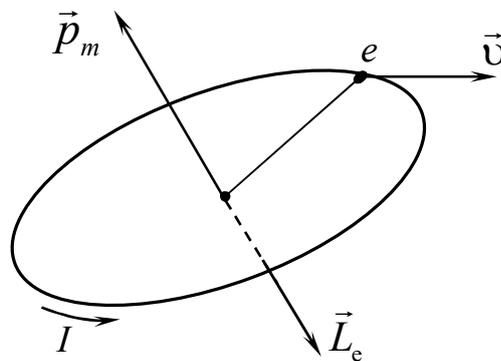


Рис.1. Движение электрона в атоме

Кроме орбитальных моментов \vec{p}_m и \vec{L}_e электрон обладает *собственным механическим моментом импульса*, который называется *спином* \vec{L}_{es} . Спин обусловлен вращением электрона вокруг своей оси. Спин является неотъемлемым свойством электрона, как и его заряд и масса. Спину электрона \vec{L}_{es} соответствует собственный *спиновый магнитный момент* \vec{p}_{ms} пропорциональный \vec{L}_{es} и противоположно направленный. Полный магнитный момент атома равен векторной сумме орбитальных и спиновых магнитных моментов всех электронов, входящих в его состав.

Магнитные свойства магнетиков различаются по их поведению в магнитном поле. Если все магнитные моменты атомов вещества (магнетика) направлены хаотично, то это вещество не создает свое магнитное поле. Если имеется хотя бы частично упорядоченная ориентация атомных магнитных моментов, то магнетик создает свое магнитное поле. Такой магнетик

называется намагниченным. Для понимания механизма намагничивания рассмотрим действие магнитного поля на движущийся в атоме электрон. Предполагая, что электрон в атоме движется по круговой орбите, внесем этот атом в магнитное поле так, чтобы вектор \vec{B} с орбитой электрона составлял бы угол α (рис.2). При этом доказано, что орбита приходит в такое движение вокруг вектора \vec{B} , при котором вектор \vec{p}_m , сохраняя постоянным угол α , вращается вокруг вектора \vec{B} с некоторой угловой скоростью. Такое движение в механике называется *прецессией*.

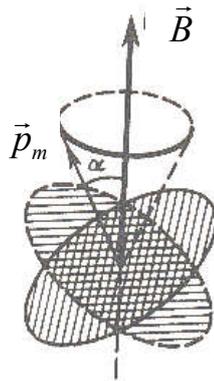


Рис. 2. Прецессия электрона на орбите во внешнем магнитном поле

Все магнетики делятся на три основные группы: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики

В **диамагнетиках** в отсутствии внешнего магнитного поля полный магнитный момент каждого атома (молекулы) равен нулю. Если такое вещество поместить во внешнее магнитное поле, которое характеризуется вектором *напряжённости* магнитного поля \vec{H} , то электронные орбиты атомов под действием внешнего магнитного поля начинают совершать прецессионное движение, которое эквивалентно круговому току – микротоку, индуцированному внешним магнитным полем. В соответствии с правилом Ленца у атомов вещества появляется составляющая магнитного поля, направленная против внешнего поля. Наведенные магнитные поля атомов (молекул) складываются и образуют собственное магнитное поле вещества, ослабляющее внешнее магнитное поле, то есть индукция возникающего магнитного поля направлена навстречу индукции внешнего магнитного поля. Этот эффект называется *диамагнитным эффектом*, а вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле против направления поля, называются *диамагнетиками*. Магнитное поле в диамагнетике слабее внешнего и магнитная проницаемость диамагнетиков $\mu < 1$. К диамагнетикам относятся многие металлы, (например, висмут, золото, серебро, медь, ртуть), а также фосфор, сера, гелий, углерод, вода и др.

В **парамагнетиках** в отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных молекул ориентированы беспорядочно, благодаря чему суммарная намагниченность вещества равняется нулю. При внесении парамагнитного вещества во внешнее магнитное поле устанавливается некоторое динамическое равновесие, при котором в веществе окажется в среднем больше атомов, магнитные моменты которых направлены по полю, чем атомов, магнитные моменты которых направлены против поля. Магнитная проницаемость парамагнетиков $\mu > 1$.

Таким образом, парамагнетизм обусловлен в основном ориентацией под действием внешнего магнитного поля собственных магнитных моментов частиц парамагнитного вещества (атомов, ионов, молекул).

К *парамагнетикам* относятся щелочные и щёлочноземельные металлы, кислород и др.

В **ферромагнетиках** ответственными за магнитные свойства являются не орбитальные, а 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 намагничён до насыщения и обладает определённым магнитным моментом. Направления этих моментов для различных доменов различны (рис. 3), так что в отсутствие внешнего магнитного поля суммарный момент всего тела равен нулю. При внесении ферромагнетика во внешнее поле, это поле ориентирует все векторы магнитных моментов доменов по полю, и чем сильнее внешнее поле, тем большее число магнитных моментов доменов выстраивается по полю. В достаточно сильных полях наступает насыщение, т.е. намагниченность перестаёт возрастать с увеличением напряжённости внешнего магнитного поля.

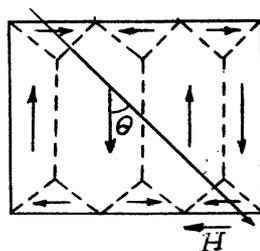


Рис. 3. Схематическое изображение доменов

Таким образом, магнитная проницаемость μ ферромагнетиков зависит от напряжённости внешнего поля \vec{H} . Максимальные значения μ в ферромагнетиках очень велики (до $10^5 - 10^6$), т. е. внутреннее поле в них во много раз превышает вызвавшее его внешнее магнитное поле (рис. 4).

К *ферромагнетикам* относятся железо, кобальт, никель, гадолиний и их сплавы.

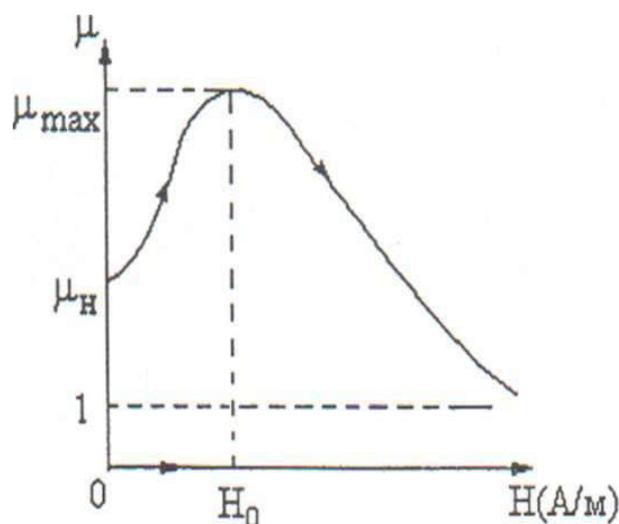


Рис. 4. Зависимость магнитной проницаемости μ ферромагнетика от напряжённости магнитного поля (\vec{H}).

Для характеристики магнитного состояния магнетика вводится *вектор намагничивания* \vec{j} , равный отношению векторной суммы магнитных моментов атомов в малом объеме ΔV к величине этого объема:

$$\vec{j} = \frac{\sum \vec{p}_{mat}}{\Delta V}$$

Намагниченность \vec{j} – величина векторная. Её направление определяется направлением намагничивающего поля \vec{H} . В изотропных веществах направление \vec{j} совпадает с направлением намагничивающего поля \vec{H} , а в анизотропных – направление вектора \vec{j} и \vec{H} различны. Единица намагниченности в системе единиц СИ – ампер на метр $A \cdot m^{-1}$ ($1 A \cdot m^{-1}$ – намагниченность, при которой $1 m^3$ вещества обладает магнитным моментом $1 A \cdot m^2$).

Интенсивность намагничивания тел \vec{j} и намагничивающее внешнее магнитное поле \vec{H} связаны между собой соотношением:

$$\vec{j} = \chi \vec{H}$$

где χ – скалярный коэффициент пропорциональности, называемый магнитной восприимчивостью. Магнитная восприимчивость χ – безразмерная скалярная величина, характеризующая связь намагниченности \vec{j} вещества с магнитным полем в этом веществе.

Вектор намагничивания \vec{j} , связан с \vec{B} и \vec{H} :

$$\vec{j} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \mu \vec{H}, \quad \text{откуда} \quad \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} + \mu_0 \vec{j}$$

Магнитная проницаемость μ и магнитная восприимчивость χ связаны между собой следующим соотношением:

$$\mu = 1 + \chi \quad (\text{СИ})$$

Магнитная проницаемость μ может быть как больше, так и меньше единицы, а магнитная восприимчивость χ может быть как положительной, так и отрицательной.

Магнитная индукция \vec{B} в ферромагнетиках сложным образом зависит от напряженности внешнего поля \vec{H} . Графики зависимости $\vec{B} = \vec{B}(\vec{H})$ и $\vec{j} = \vec{j}(\vec{H})$ для разных веществ представлены на рис. 5. У ферромагнетиков (рис. 5а) в слабых полях \vec{B} 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} . Уже в полях порядка 100 А/м намагничивание \vec{j} у ферромагнетиков достигает насыщения (рис. 5б, кривая 3). Магнитное насыщение - состояние ферромагнетика, при котором его намагниченность \vec{j} достигает предельного значения, не изменяющегося при дальнейшем увеличении напряженности намагничивающего магнитного поля. При достижении насыщения \vec{B} продолжает увеличиваться с ростом \vec{H} по линейному закону:

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

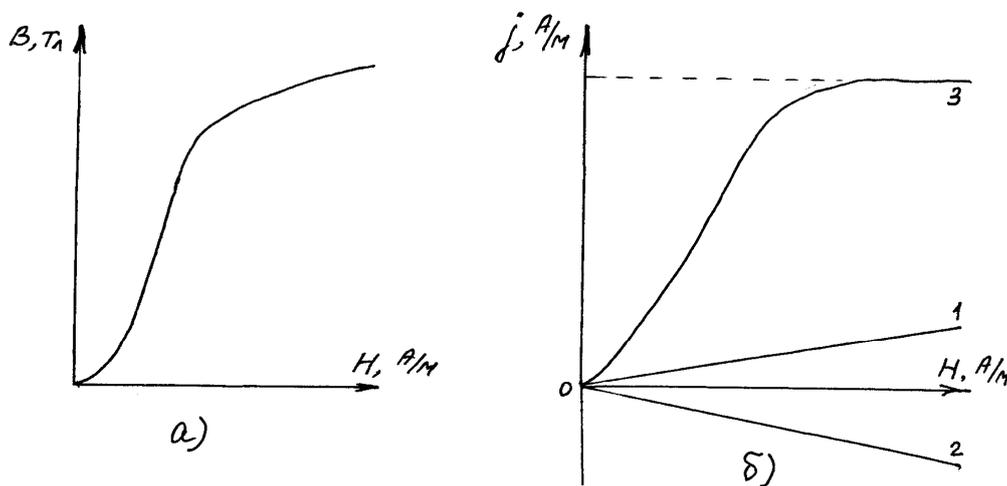


Рис. 5. Кривые намагничивания:

- а) $\vec{B} = \vec{B}(\vec{H})$ для ферромагнетиков, б) $\vec{j} = \vec{j}(\vec{H})$ - 1 - для парамагнетиков; 2 - для диамагнетиков; 3 - для ферромагнетиков.

Кроме нелинейной зависимости $\vec{B} = \vec{B}(\vec{H})$ (рис.5а), называемой *основной кривой намагничивания*, для ферромагнетиков характерно также наличие *гистерезиса* (отставание, запаздывание). При действии на ферромагнетик переменного магнитного поля величина магнитной индукции \vec{B} меняется по замкнутой петле 1–2–3–4–5–6–1 (рис. 6), которая называется *петлей гистерезиса*. Появление гистерезиса у ферромагнетиков связано с наличием в их структуре доменов. С увеличением напряжённости магнитного поля магнитные моменты доменов поворачиваются в направлении поля. Эти процессы необратимы, что и служит причиной гистерезиса.

Если довести намагничивание до насыщения или выше (например, точка 1 на рис.6) и затем уменьшить напряжённость магнитного поля, то намагничивание следует не по 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 $B_{ост}$ которая называется *остаточной индукцией*. Намагничивание обращается в ноль лишь под действием поля \vec{H} , имеющего направление, противоположное полю, вызвавшему намагничивание. Значение такой напряжённости $H_{коэрц}$ называется *коэрцитивной силой*. Таким образом, при изменении величины поля от максимально положительного до максимально отрицательного значения и обратно, кривая, характеризующая намагничивание, образует петлю гистерезиса.

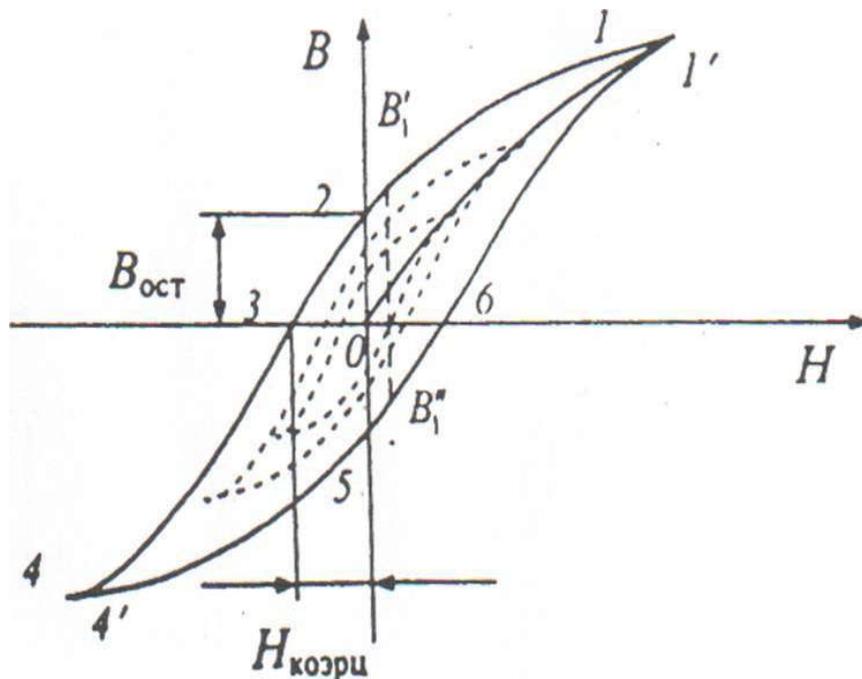


Рис. 6. Петля гистерезиса

Если постепенно увеличивать амплитуду переменного тока, определяющего напряженность магнитного поля \vec{H} , то можно наблюдать постепенное увеличение площади петли (см. штриховые кривые на рис. 6). При достаточно большой напряженности петля перестает меняться (максимальная петля). Максимальная петля гистерезиса является характеристикой магнитных свойств материала. В частности, пересечение ее с осью ординат определяет остаточную индукцию $B_{ост}$, а пересечение с осью абсцисс – напряженность поля, необходимую для размагничивания образца, т.е. коэрцитивную силу $H_{коэрц}$. Осциллографический метод исследования петли гистерезиса позволяет наблюдать ее визуально и относительно просто определять $B_{ост}$ и $H_{коэрц}$. Площадь петли гистерезиса пропорциональна работе, затраченной на перемагничивание ферромагнетика переменным магнитным полем. Ферромагнетик с большой площадью петли называют *жестким*, 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. 7:

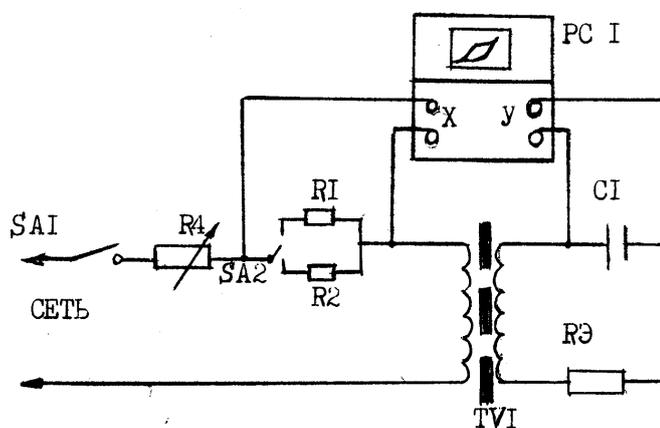


Рис. 7. Принципиальная схема установки

TV_1 - трансформатор;

R_1, R_2, R_3 - постоянные сопротивления;

R_4 - переменное сопротивление ("ток первичной обмотки");

C_1 - конденсатор в цепи вторичной обмотки трансформатора;

РС₁ - 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.7, $U_x \sim \vec{H}$ 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 TV_1 .

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 SA_2):

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

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

2. ЭДС индукции во вторичной катушке трансформатора определяется как

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

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

$$U_c \ll I_2 R_3,$$

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 "x" и вход "y") 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:

$$H = X \frac{N_1 \alpha_x}{R_{1,2} l}$$

$$B = Y \frac{\alpha_y \tau}{N_2 S}, \quad (7)$$

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 . В данном осциллографе значение коэффициента $\alpha_y = 0,01$ В/дел .

– 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} . Значение коэффициента α_x неизменно и равно $\alpha_x = 0,5$ В/дел.

Положение масштабных переключателей ("Усилитель Y " и SA_2) следует выбирать таким образом, чтобы изображение петли гистерезиса занимало максимальную площадь в пределах экрана осциллографа.

При построении кривой намагничивания необходимо измерить координаты точки 1 (рис. 6) 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 " на экране осциллографа появляется вертикальная линия, проходящая через точку A (рис. 8). Отрезок, отсекаемый этой прямой от оси X , даёт значение X_{\max} . При нажатии на кнопку "пластина Y " на экране осциллографа появляется горизонтальная линия, проходящая через точку A (рис. 8). Отрезок, отсекаемый этой прямой от оси Y , даёт значение Y_{\max} .

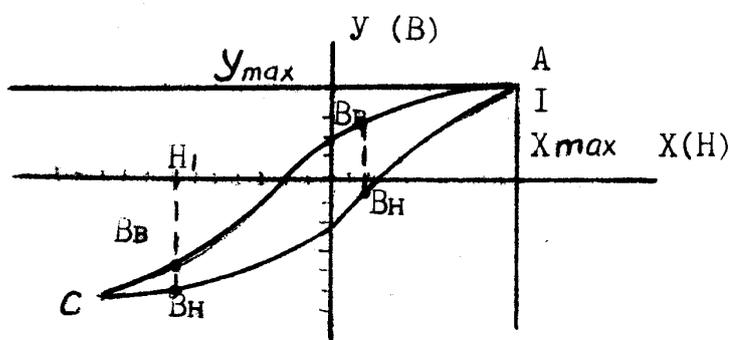


Рис. 8. Определение значений X_{\max} и Y_{\max} на экране осциллографа

Подставляя значения X_{\max} и Y_{\max} в формулы (7), получим

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

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

Магнитную проницаемость ферромагнетика можно рассчитать по формуле

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

4. Порядок выполнения работы

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 $\leftarrow \rightarrow$ и \updownarrow установите эту точку в центр экрана - на пересечение координатных осей. После этого ручки $\leftarrow \rightarrow$ 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).

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 гистерезиса (рис. 6). Ручкой $\leftarrow\rightarrow$ 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 линии 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 ($Y_{ни}$) 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.

Таблица 1

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

№	Ув, дел	Ун, дел

5. Обработка результатов измерений

5.1. По формулам (8) и (9) рассчитайте значения H_{\max} и B_{\max} и их погрешности. 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 $0,1 \alpha_y$ большого деления шкалы (малое деление).

Рассчитайте доверительную границу погрешности измерений X_{\max} и Y_{\max} , считая, что она определяется систематической погрешностью измерений. 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 (12), которая выводится из выражения (11):

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

где B_n и B_e – значения магнитной индукции соответственно для нижней и верхней ветвей петли при заданном H (см. рис. 8).

Приближённое значение величины A можно получить численным интегрированием по формуле трапеции

$$A = \frac{2H_{\max}}{n} \left(\frac{(B_B - B_H)_1}{2} + (B_B - B_H)_2 + \dots + (B_B - B_H)_8 + \frac{(B_B - B_H)_9}{2} \right) \quad (12)$$

где n - число делений интервала измерения H .

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

$$(B_e - B_n)_1 = 0$$

$$(B_e - B_n)_9 = 0$$

При расчёте значений $(B_e - B_n)_i$ следует учитывать знак величин B : величина B отрицательна для тех частей петли, которые находятся ниже оси X (см. рис.8). Расчёт значений величины B следует производить по формуле (7).

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Как классифицируются магнетики?
- 6.2. В чем заключается явление диамагнетизма?
- 6.3. В чем заключается явление парамагнетизма?
- 6.4. В чём заключается явление ферромагнетизма?
- 6.5. Почему значение μ велико для ферромагнетиков?
- 6.6. Что называется коэрцитивной силой?
- 6.7. Что называется остаточной индукцией?

ИЗУЧЕНИЕ РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА

1. Задачи работы

1.1. Измерение постоянной времени разряда конденсатора τ .

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 фарад (Φ) - это ёмкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл. Следовательно, $1\Phi = 1\text{Кл}/1\text{В}$.

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 он 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.

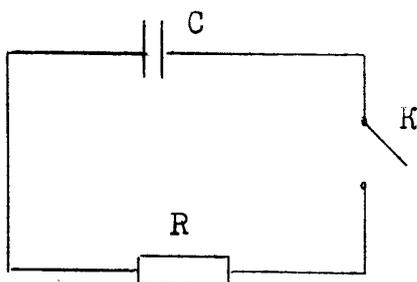


Рис. 1. Принципиальная схема установки для изучения разряда конденсатора

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 $I = \frac{dU}{dt}$, 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 напряжения U от времени t

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{CR}} , \quad (5)$$

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

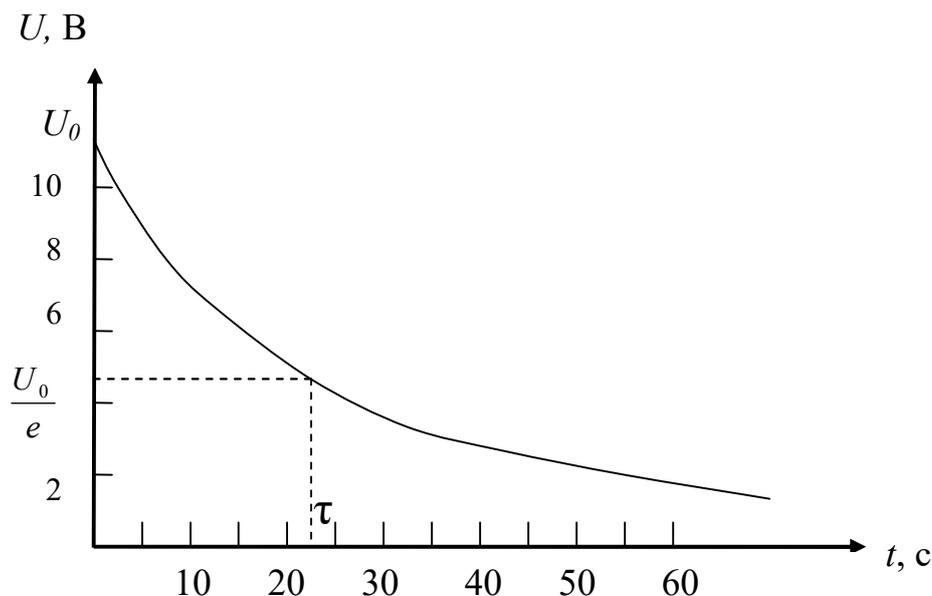


Рис. 2. Зависимость напряжения от времени при разряде конденсатора.

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").

$$a = -\frac{1}{CR}$$

График функции натурального логарифма напряжения $\ln U$ от времени t представлен на рис. 3.

Величина CR имеет размерность времени и называется *постоянной времени разряда конденсатора* τ :

$$\tau = CR$$

$$\tau = -a^{-1} \quad (7)$$

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).

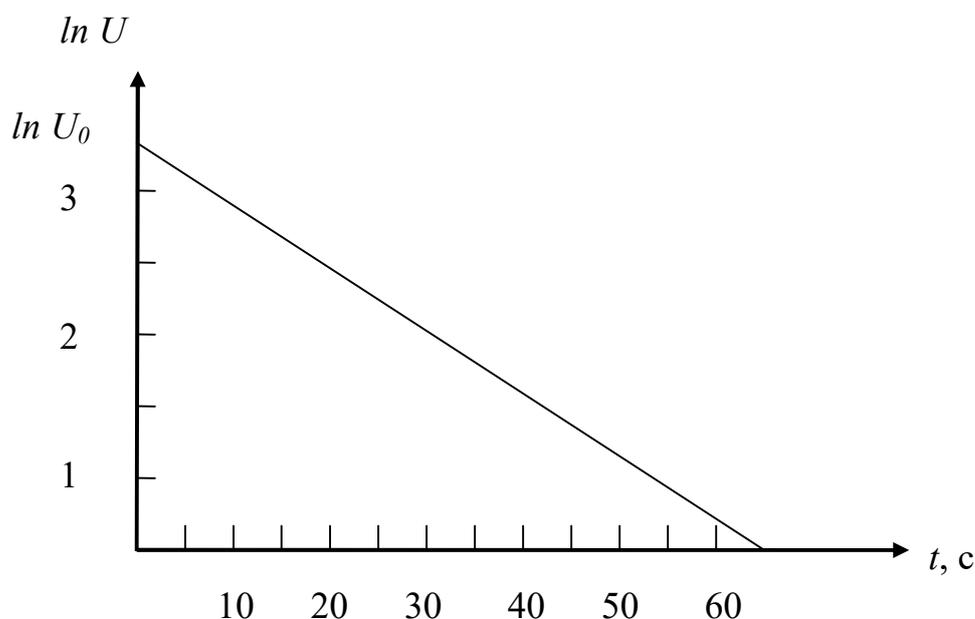


Рис. 3. Зависимость напряжения от времени при разряде конденсатора в полулогарифмическом масштабе

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

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

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.

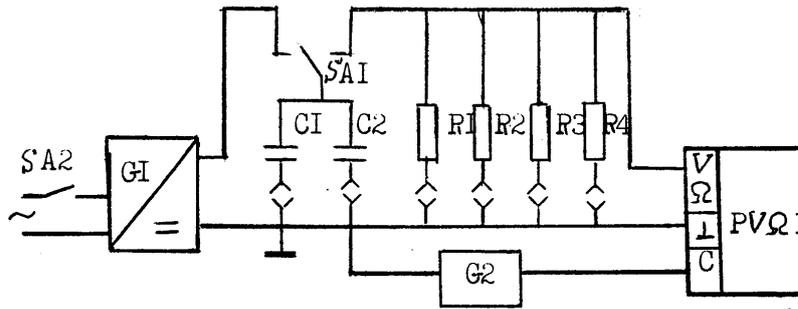


Рис. 4. Принципиальная схема установки

G1 - источник питания электрической схемы;

G2 - генератор импульсов, включающих измерительный прибор (задающий генератор);

PV1 - 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 зарядка конденсатора C от источника питания G1, одновременно с этим производится измерение величины сопротивления R цифровым вольтметром PV1 типа ВК7-10А/1.

В положении переключателя SA1 "разряд" происходит разряд конденсатора C через сопротивление R; при этом цифровой вольтметр PV1 измеряет напряжение на конденсаторе C. 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. Выбираем промежуток времени между показаниями прибора 5 секунд.

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 C 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. Заранее определите промежуток времени между высвечиванием цифр на индикаторе вольтметра - настройте прибор на высвечивание цифр через 5 с. Измерение падения напряжения следует начать после переключения тумблера на "разряд" и проводить в течение 60 с (всего получится 12 точек).

Данные заносите в таблицу.

Таблица

№ п/п	t , с	U , В	$\ln U$	R , кОм
1				
2				
...				
11				
12				

5. Обработка результатов измерений

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

5.2. Постройте график зависимости натурального логарифма напряжения $\ln U$ от времени t для серии измерений (таблица).

5.3. Графической обработкой зависимости натурального логарифма напряжения $\ln U$ от времени t найдите значение углового коэффициента a для серии измерений.

5.4. Рассчитайте абсолютную погрешность Δa как абсолютную погрешность углового коэффициента прямой линии для серии $\ln U$ от t .

5.5. Используя связь величин a и τ ((6) и (7)), найдите результат измерения величины постоянной времени разряда конденсатора τ , а также погрешность $\Delta \tau$ как результата косвенного измерения.

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

6. Контрольные вопросы

6.1. Что называется электроёмкостью (ёмкостью) конденсатора?

6.2. От чего зависит величина ёмкости конденсатора? Приведите формулы электроёмкости плоского конденсатора и шара.

6.3. Что называется постоянной времени разряда конденсатора?

6.4. От чего зависит величина постоянной времени разряда конденсатора?

6.5. Как влияет величина постоянной времени разряда конденсатора 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.

6.9. Как определить результирующую ёмкость конденсаторов при их последовательном и параллельном соединении?

6.10. Как рассчитать энергию заряженного уединенного проводника и заряженного конденсатора?

РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

1. Задачи работы

1.1. Измерение напряжения и вычисление силы тока на участках заданной электрической цепи.

1.2. Проверка выполнения первого и второго правил Кирхгофа.

2. Предварительные сведения

Законы Ома позволяют достаточно просто рассчитывать любые электрические цепи, представляющие один замкнутый контур. Однако непосредственный расчет разветвленной электрической цепи, содержащей несколько замкнутых контуров довольно сложен. Для этих целей требуются другие правила.

Точка разветвленной цепи, в которой сходится больше двух проводников, называется *узлом* (рис. 1). Участок разветвленной цепи между двумя узлами называется *ветвью*.

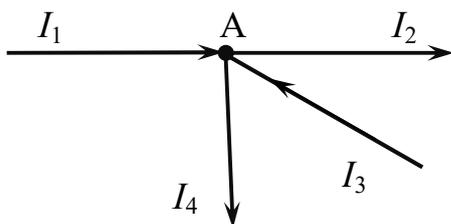


Рис. 1. Узел разветвленной электрической цепи

Вычисление токов, текущих в отдельных ветвях сложной разветвленной цепи, представляет известные трудности. Эта задача решается проще с использованием двух правил Кирхгофа. Правила Кирхгофа являются следствиями, вытекающими из законов сохранения заряда и энергии.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

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

Токи, входящие в узел, условно считаются положительными. Токи, выходящие из узла, — отрицательными. Заранее направление токов в ветвях не известно, поэтому они выбираются и указываются на схеме произвольно.

При определении того, какие проводники сходятся в данном узле, следует учитывать, что в принципиальных электрических схемах сопротивление участка цепи R включает сопротивление соединительных проводов. Таким образом, в схеме, изображенной на рис. 2, сопротивление соединительных проводов считается равным нулю. Произведение $I \cdot R = U$ называют падением

напряжения или просто напряжением на участке. На участке АВ сопротивление равно нулю и, учитывая вышеизложенное, падение напряжения равно нулю ($U_{AB} = 0$).

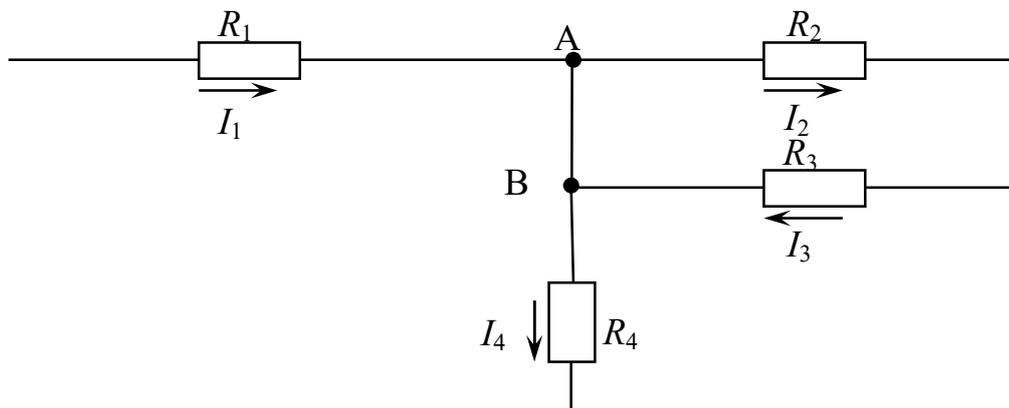


Рис. 2. Принципиальная схема узла электрической цепи

Таким образом, все четыре сопротивления можно считать подключёнными к узлу А (см. рис.1). Уравнение (1) для узла А 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 $(N - 1)$ уравнений будут независимыми.

Второе правило Кирхгофа: в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма произведений токов I_k на соответствующие сопротивления R_k равна алгебраической сумме ЭДС ε_i , действующих в этом контуре:

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

При составлении уравнений по второму правилу Кирхгофа следует руководствоваться следующими положениями:

1. Выбрать **произвольно** направление обхода контуров и изобразить его на схеме стрелками (рис. 3).

2. Выбрать **произвольно** и обозначить на схеме направления токов во всех ветвях. Правильное направление токов определяется при решении задачи: если искомый ток окажется отрицательным, то его направление противоположно выбранному. При этом следует руководствоваться правилом, что все токи не могут сходиться или выходить из одного узла.

3. Ток I_k берется со знаком плюс, если его направление совпадает с направлением обхода контура, в противном случае берется знак минус.

4. ЭДС ε_i берется со знаком плюс, если при обходе контура движение **внутри источника тока** происходит от отрицательной клеммы к положительной, в противном случае берется знак минус.

Обращаем внимание, что направление тока на схеме никакого отношения к знаку ЭДС не имеет.

Приведем метод составления уравнений для расчета токов, текущих в ветвях цепи, изображенной на рис. 3.

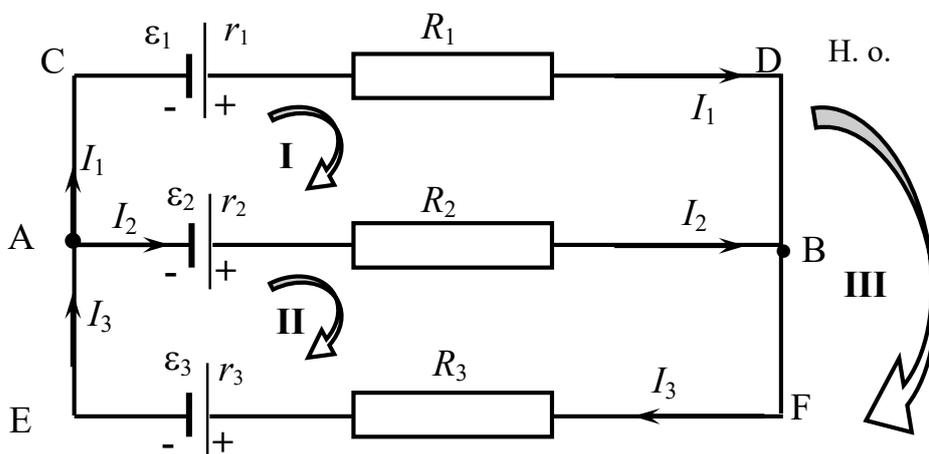


Рис. 3. Схема разветвленной электрической цепи

1. Выберем направление обхода контуров по часовой стрелке и обозначим на рисунке.

2. Расставим произвольно направления токов в ветвях цепи и обозначим их стрелками.

3. Применим первое правило Кирхгофа для узла В (см. рис. 3.). Токи I_1 и I_2 входят в узел, а ток I_3 выходит. В этом случае уравнение имеет вид:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \quad (3)$$

Применение правила Кирхгофа для узла А (см. рис. 3) дает то же самое уравнение.

4. Применим второе правило Кирхгофа для контуров ACDB (I), ABFE (II), выделенных на рис. 3:

$$\begin{cases} I_1 r_1 + I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_2 r_2 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2, & (4) \\ I_2 r_2 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_3 r_3 = \varepsilon_2 - \varepsilon_3. & (5) \end{cases}$$

При составлении уравнений учтено, что каждый источник тока имеет внутреннее сопротивление r_i , которое в эквивалентной электрической схеме изображается как сопротивление, включенное последовательно с источником

тока. Решая совместно систему трех уравнений: (3), (4) и (5), получим значения трех неизвестных токов: I_1, I_2, I_3 .

Отметим, что на схеме, изображённой на рис. 3, можно выделить три замкнутых контура. Применительно к замкнутому контуру CDFE (III) в соответствии со вторым правилом Кирхгофа получим уравнение:

$$I_1 R_1 + I_1 r_1 + I_3 R_3 + I_3 r_3 = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \quad (6)$$

Из уравнений (4) - (6) независимыми будут только уравнения для тех контуров, которые нельзя получить наложением других контуров друг на друга. Так, например, для цепи, изображённой на рис. 3, 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. 4), в которую входят источники постоянного тока ε_1 и ε_2 , сопротивления $R_1 \dots R_7$, ключи K_1 и K_2 и переключатели $\Pi_1 \dots \Pi_4$.

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 перестройте принципиальную схему (Рис. 4) и укажите узлы на схеме.**

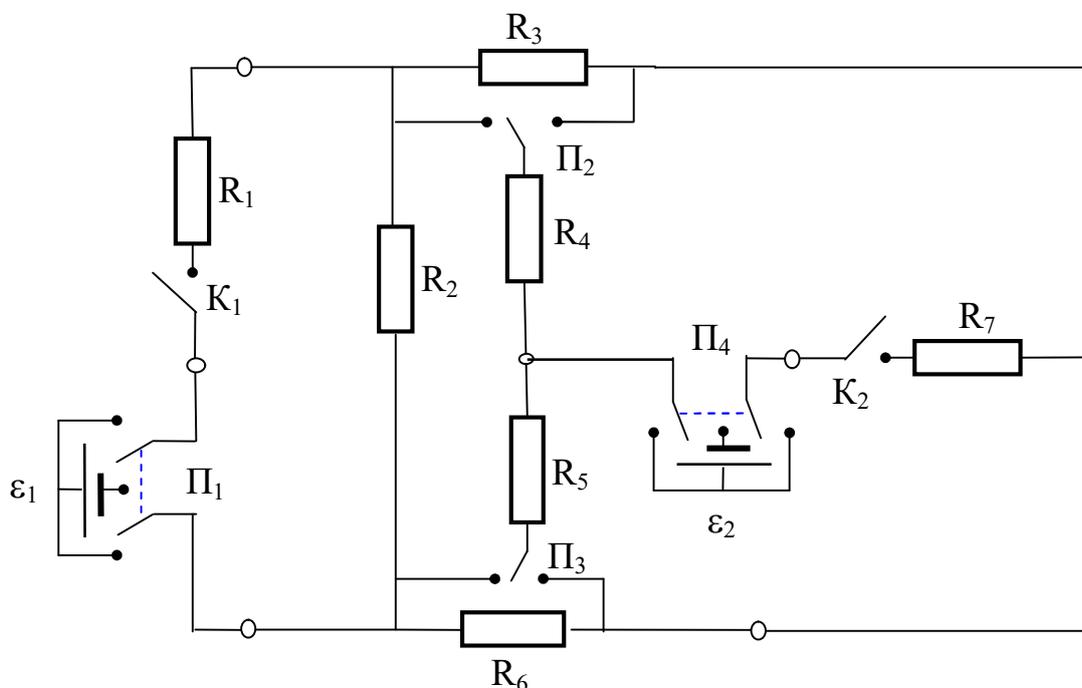


Рис. 4. Принципиальная схема лабораторной установки

Для проверки правил Кирхгофа необходимо:

1) Измерить вольтметром напряжения U на каждом сопротивлении в отдельности по номерам, указанным в схеме. Если при подключении вольтметра стрелка прибора отклоняется влево, то нужно поменять выходные контакты.

2) Одновременно с измерениями напряжений расставить направления токов на схеме. Считать, что при отклонении стрелки вольтметра вправо, положительный контакт вольтметра подключен к плюсу, а отрицательный — к минусу. За направление тока принято направление движения положительных зарядов (от положительного потенциала к отрицательному).

3) Рассчитать токи, протекающие через каждое сопротивление, по закону Ома

$$I_k = \frac{U_k}{R_k} \quad (7)$$

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.

При составлении уравнения, соответствующего второму правилу Кирхгофа, напряжение на внутреннем сопротивлении источника тока следует включать в общую сумму напряжений на участках цепи

$$\sum_k I_k R_k + \sum_i I_i r_i = \sum_i \varepsilon_i \quad (8)$$

где ε_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

$$U_i = \varepsilon_i - I_i r_i \quad (9)$$

Подставив ε_i из выражения (9) в уравнение (8) и произведя преобразования, получим следующее уравнение для второго правила Кирхгофа:

$$\sum_k I_k R_k = \sum_i U_i \quad (10)$$

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

$$\sum_k U_k = \sum_i U_i \quad (11)$$

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 $R_1 \dots R_7$. Данные измерений занесите в таблицу.

4.5. Определить *полярность* напряжения на каждом сопротивлении и обозначить на схеме. Указать направление тока на участках схемы в соответствии с измеренной полярностью падения напряжения на этих участках (направление тока совпадает с движением положительных зарядов, т.е. от положительного потенциала к отрицательному).

5. Обработка результатов измерений

5.1. Определить величину силы тока на каждом участке цепи (формула (7)).

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 уравнения по первому правилу Кирхгофа. При этом следует считать, что правило выполняется, если точка ноль входит в доверительный интервал результата измерений величины f , определяемой по формуле

$$f = \sum_k I_k \quad (12)$$

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 правила Кирхгофа. Правило выполняется, если точка ноль входит в доверительный интервал результата измерений величины φ , определяемой по формуле

$$\varphi = \sum_k U_k - \sum_i U_i \quad (13)$$

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. Что называется узлом электрической цепи?
- 6.2. Как формулируются и записываются правила Кирхгофа?
- 6.3. Как определить знак ЭДС источника тока?
- 6.4. Почему в работе для проверки второго правила Кирхгофа измеряют не ЭДС источника ε_i , а напряжение на источнике тока U_i ?
- 6.5. Сколько замкнутых контуров и узлов вы можете указать на схеме, изображённой на рис. 4?

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

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (1)$$

где I – сила тока в цепи,

ε – электродвижущая сила (ЭДС) источника тока

R – сопротивление нагрузки,

r – внутреннее сопротивление источника.

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.

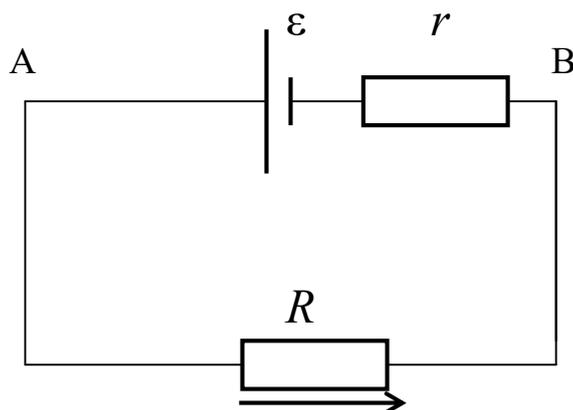


Рис. 1. Замкнутая цепь с источником тока

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 (ε) и внутреннее сопротивление (r), 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

$$U_{AB} = U_R = IR = \frac{\varepsilon R}{R + r} = \frac{\varepsilon}{1 + r/R} \quad (2)$$

С другой стороны

$$U_{AB} = \varepsilon - U_r = \varepsilon - Ir,$$

где U_r – напряжение на внутреннем сопротивлении r .

Из формулы (2) видно, что величина U_{AB} принимает максимальное значение $U_{AB} = \varepsilon$ 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 $I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r}$. При коротком замыкании величина U_{AB} обращается в нуль.

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

$$P_R = I U_R \quad (3)$$

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

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

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

$$P = I U_R + I U_r = I(U_R + U_r)$$

и окончательно

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

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

$$\eta = \frac{P_r}{P} \quad (6)$$

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

$$\eta = \frac{U_R}{\varepsilon} \quad (7)$$

3. Метод исследования и описание установки

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

Перед началом работы установите переключатели K_1 и K_2 в положение, соответствующее своему варианту.

В исходном положении выключатель K_3 разомкнут, и вольтметр V показывает величину ЭДС источника тока ε . При нажатии кнопочного выключателя K_3 цепь замыкается, и вольтметр, подключенный к источнику тока, покажет напряжение на нагрузке U_R . Одновременно следует измерить силу тока в цепи I миллиамперметром A .

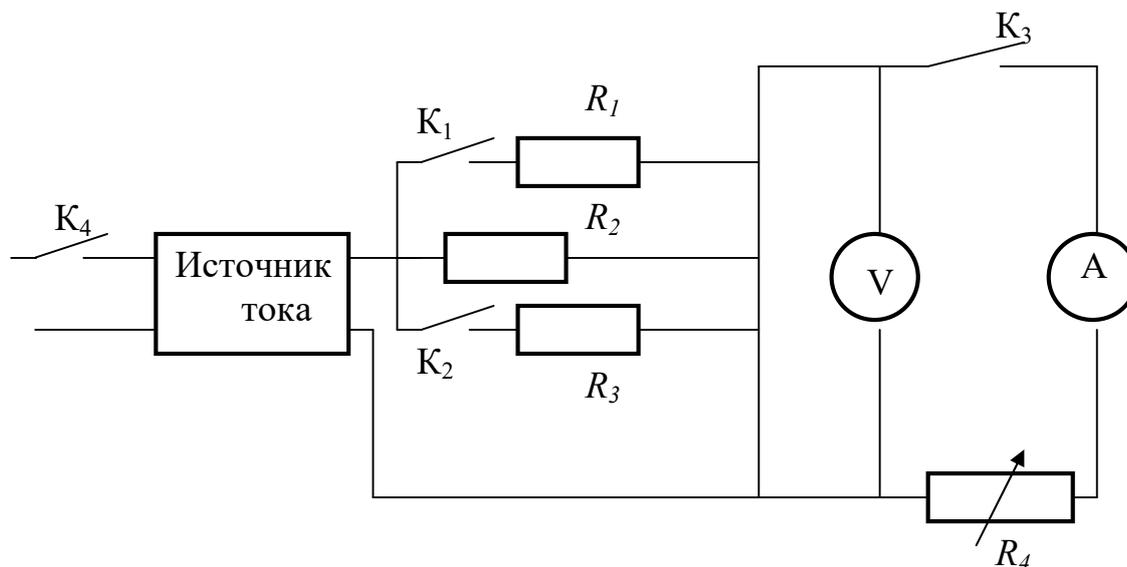


Рис. 2. Принципиальная схема электрической установки

Для построения зависимостей величин P_R , P и η 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 η следует производить по формулам (3), (5), (7) соответственно.

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

1. Методика расчета r 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

$$P_R = IU_R = I(\varepsilon - U_r) = I(\varepsilon - Ir) = \varepsilon I - rI^2 \quad (8)$$

получаем уравнение относительно переменной I .

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

$$I_1 = 0; I_2 = \frac{\varepsilon}{r} = I_{\max}$$

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

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{2r}.$$

Последнее отношение используется для расчета величины r

$$r = \frac{\varepsilon}{2I_0} \quad (9)$$

2. Методика расчета r из графика зависимости $\eta(I)$.

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

$$\eta = \frac{U_R}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon - U_r}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon - Ir}{\varepsilon} = 1 - \frac{r}{\varepsilon} I \quad (10)$$

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

$$a = -\frac{r}{\varepsilon} \quad (11)$$

Отсюда

$$r = -a \cdot \varepsilon \quad (12)$$

4. Порядок выполнения работы

4.1. Поставьте переключатели K_1 и K_2 в положение, соответствующее вашему варианту.

4.2. Включите тумблер K_4 "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 K_3 . Данные измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

№	I , дел	I , А	U_R , В	ε , В

5. Обработка результатов измерений

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

Таблица 2

№ п\п	I, A	$\Delta I, A$	U_R, B	$\Delta U_R, B$	$P, B\Gamma$	$\Delta P, B\Gamma$	$P_R, B\Gamma$	$\Delta P_R, B\Gamma$	$\eta, \%$	$\Delta \eta, \%$

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

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

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

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. (на рисунке для примера приведены три отрезка);
- найти абсциссы середин отрезков A_KB_K – величина I_{0K} ;
- рассчитать среднее значение силы тока \bar{I}_O (абсолютная погрешность силы тока определяется систематической погрешностью миллиамперметра),
- используя соотношение (9), рассчитать значения r и Δr .

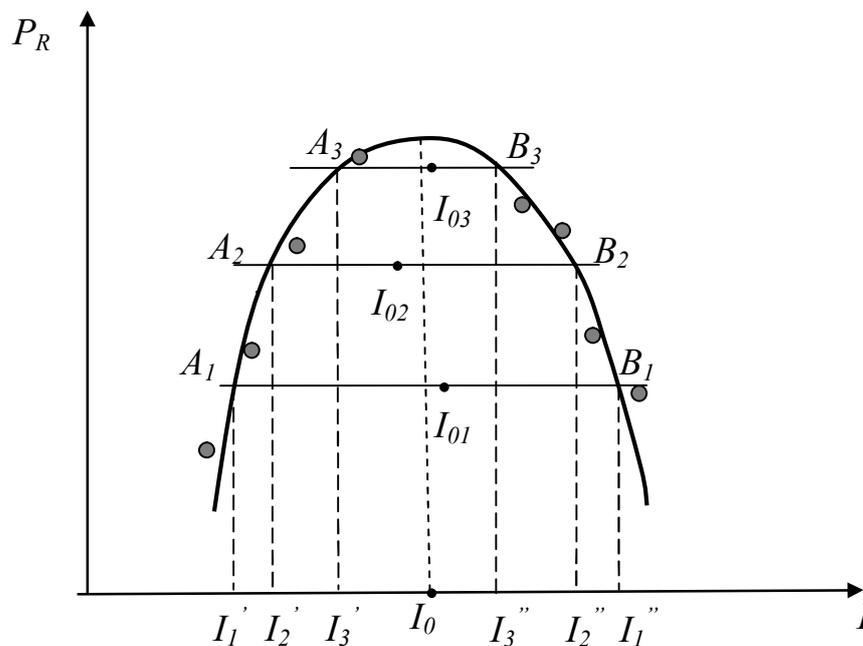


Рис.3 Пояснения к п.п.5.3.1 – Обработка графика $P_R = f_I(I)$

5.3.2. Обработка графика $\eta = f_3(I)$:

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

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?

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: 13,6 эВ; 3,4 эВ; 1,51 эВ 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.

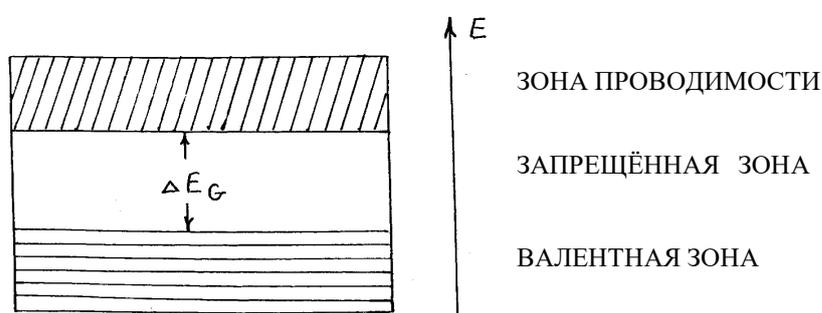


Рис. 1. Зонная структура кристаллических веществ

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 интенсивности рассеяния носителей за счет увеличения числа их столкновений и увеличением количества самих носителей.

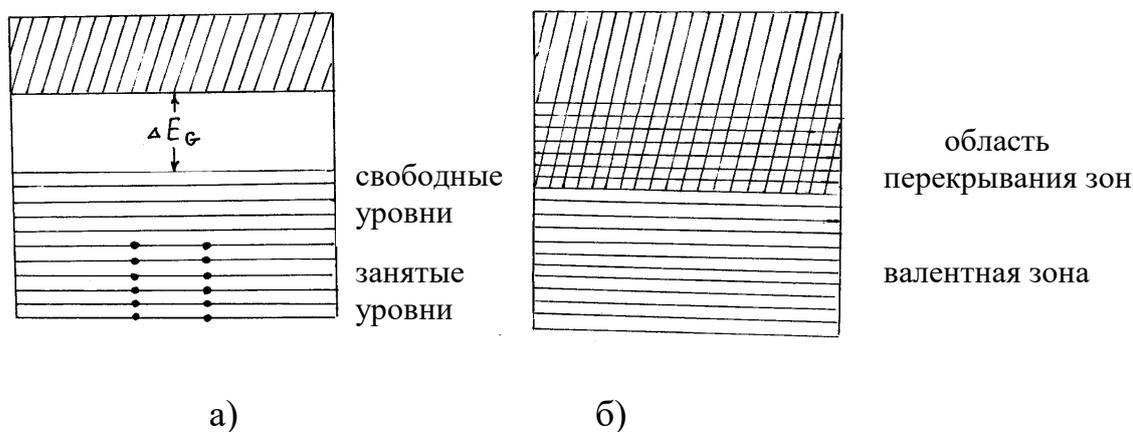


Рис. 2. Типы зонной структуры проводников

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 собственной электрической проводимости.

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.

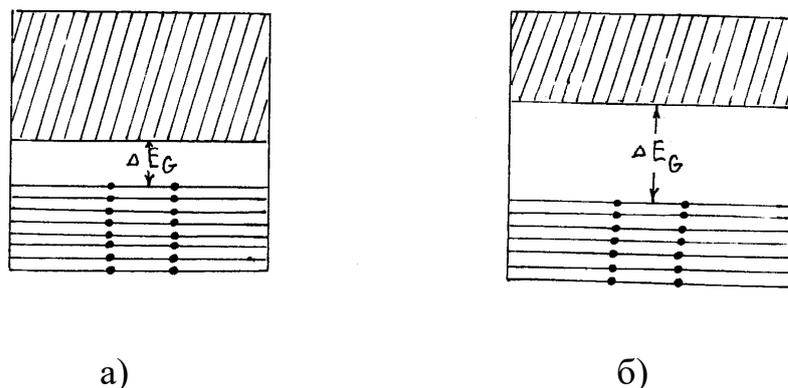


Рис. 3. Зонная структура полупроводников (а) и диэлектриков (б)

Наименьшая энергия E_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

$$R = A e^{\frac{E_0}{2kT}} = A e^{\frac{a}{T}}, \quad (1)$$

где

$$a = \frac{E_0}{2k}, \quad (2)$$

отсюда

$$E_0 = 2ka. \quad (3)$$

Здесь R – сопротивление полупроводника;

E_0 – энергия активации;

T – температура термистора;

A – постоянная, зависящая от свойств полупроводника;

e – 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:

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

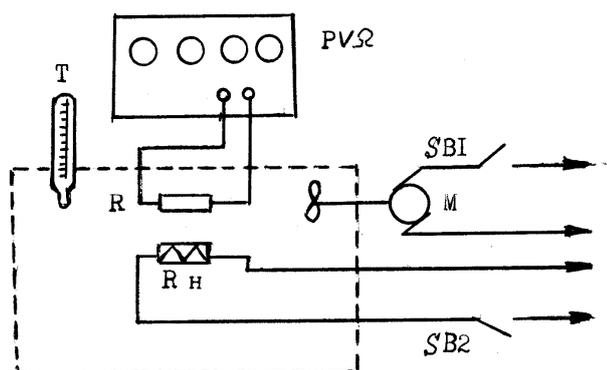
Из формулы (5) и (6) получим выражение температурного коэффициента:

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

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 включается 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 $R_{np} = 2000$ 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 °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. Проведите измерения зависимости сопротивления термистора от температуры. Данные занесите в таблицу 1. По данным измерений постройте график зависимости сопротивления R от температуры. Учитывайте, что доверительная граница абсолютной погрешности термометра считается как обычно, по формуле $\theta = 1,1\sqrt{h^2 + C^2 d^2}$, абсолютная погрешность сопротивления считается через относительную, которая приводится в паспорте прибора В7-22А и равна

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

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

5.2. Произведите расчеты $\ln R$ и $1/T$ и также занесите их в таблицу. Постройте график функции натурального логарифма сопротивления от величины, обратной температуре

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

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

5.4. По формуле (3) вычислите энергию активации E_0 данного термистора. Энергию активации принято выражать в электрон-вольтах. $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

5.5. Вычислите температурный коэффициент α по формуле (7) и его погрешность для каждой температуры. Постройте график зависимости величины температурного коэффициента от температуры $\alpha = f(T)$.

Все расчётные данные занесите в табл. 1

Таблица 1

№ п/п	$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{кОм}$	$T, \text{К}$	$R, \text{Ом}$	$\ln R$	$1/T$	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.

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 *n-p*-перехода полупроводникового выпрямителя.

2. Предварительные сведения

2.1 Примесная и собственная проводимость

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 (c -зону). При низких температурах в этой зоне нет электронов. Между v -зоной и c -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 c - зону. Таким образом, пентивалентные 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.

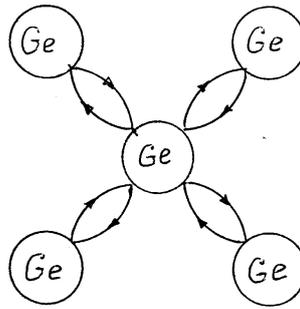


Рис. 1а. Структура связей в кристаллической решётке собственного полупроводника.

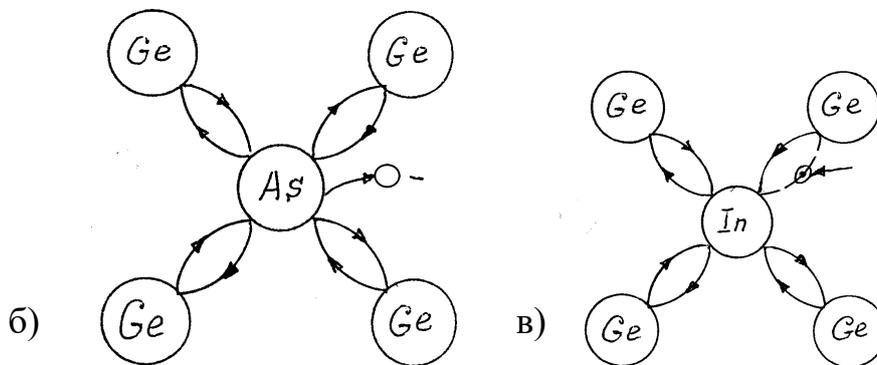


Рис. 1б. Структура связей в кристаллической решётке примесного (донорного) полупроводника.

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

2.2 Образование и равновесное состояние $p-n$ перехода

Рассмотрим подробнее процесс образования $p-n$ перехода. Равновесным называют такое состояние перехода, когда отсутствует внешнее напряжение. Напомним, что в p -области имеются два вида основных носителей заряда: неподвижные отрицательно заряженные ионы атомов акцепторной примеси \ominus и свободные положительно заряженные дырки; а в n -области имеются также два вида основных носителей заряда: неподвижные положительно заряженные ионы атомов акцепторной примеси \oplus и свободные отрицательно заряженные электроны.

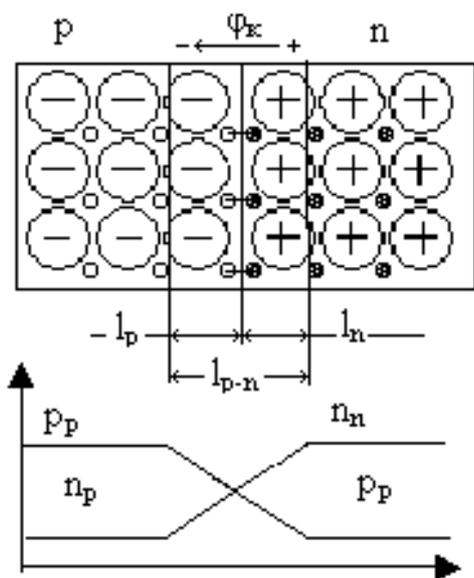


Рис.2 Образование *p-n*-перехода

До соприкосновения *p* и *n* областей электроны, дырки и ионы примесей распределены равномерно. При контакте на границе *p* и *n* областей возникает градиент концентрации свободных носителей заряда и происходит диффузия: электроны из *n*-области переходят в *p* и рекомбинируют там с дырками. Дырки из *p*-области переходят в *n*-область и рекомбинируют там с электронами. В результате такого движения свободных носителей заряда в пограничной области их концентрация убывает почти до нуля и в тоже время в

p области образуется отрицательный пространственный заряд (ОПЗ) ионов акцепторной примеси, а в *n*-области положительный пространственный заряд ионов донорной примеси. Между этими зарядами возникает контактная разность потенциалов φ_k и электрическое поле E_k , которое препятствует диффузии свободных носителей заряда из глубины *p*- и *n*-областей через *p-n*-переход. Таким образом область, обеднённая свободными носителями заряда со своим электрическим полем и называется *p-n*-переходом.

P-n-переход характеризуется двумя основными параметрами, - высотой и шириной:

1. Высота потенциального барьера. Она равна контактной разности потенциалов φ_k . Это разность потенциалов в переходе, обусловленная градиентом концентрации носителей заряда. Это энергия, которой должен обладать свободный заряд, чтобы преодолеть потенциальный барьер:
2. Ширина *p-n*-перехода (рис. 2) – это приграничная область, обеднённая носителями заряда, которая располагается в *p* и *n* областях: $l_{p-n} = l_p + l_n$:

В равновесном состоянии (без внешнего напряжения) через *p-n* переход движутся два встречных потока зарядов (протекают два тока). Это дрейфовый ток неосновных носителей заряда и диффузионный ток, который связан с основными носителями заряда. Так как внешнее напряжение отсутствует, и тока во внешней цепи нет, то дрейфовый ток и диффузионный ток взаимно уравновешиваются и результирующий ток равен нулю

$$I_{др} + I_{диф} = 0.$$

Это соотношение называют условием динамического равновесия процессов диффузии и дрейфа в равновесном $p-n$ -переходе.

2.3 $P-n$ переход при внешнем напряжении, приложенном к нему

Внешнее напряжение нарушает динамическое равновесие токов в $p-n$ -переходе. $P-n$ -переход переходит в неравновесное состояние. В зависимости от полярности напряжения, приложенного к областям в $p-n$ -перехода, возможно два режима работы:

1) **Прямое смещение $p-n$ перехода.** $P-n$ -переход считается смещённым в прямом направлении, если положительный полюс источника питания подсоединен к p -области, а отрицательный к n -области (рис.3б)

При прямом смещении напряжения φ_k и U направлены встречно, результирующее напряжение на $p-n$ -переходе убывает до величины $\varphi_k - U$. Это приводит к тому, что напряженность электрического поля убывает и возобновляется процесс диффузии основных носителей заряда. Кроме того, прямое смещение уменьшает ширину $p-n$ перехода, т.к. $l_{p-n} \approx (\varphi_k - U)^{1/2}$. Ток диффузии, ток основных носителей заряда, становится много больше дрейфового. Через $p-n$ -переход протекает прямой ток I_+

$$I_+ = I_{диф} + I_{др} \approx I_{диф}.$$

2) **Обратное смещение** возникает, когда к p -области приложен минус, а к n -области плюс внешнего источника напряжения (рис.3с).

Такое внешнее напряжение U увеличивает высоту потенциального барьера до величины $\varphi_k + U$; напряженность электрического поля возрастает; ширина $p-n$ перехода возрастает, т.к. $l_{p-n} \approx (\varphi_k + U)^{1/2}$; процесс диффузии полностью прекращается и через $p-n$ переход протекает дрейфовый ток, ток неосновных носителей заряда. Такой ток $p-n$ -перехода называют обратным, он связан с неосновными носителями заряда, которые возникают за счет термогенерации, и обозначают I_- , т.е.

$$I_- = I_{диф} + I_{др} \approx I_{др}$$

Этот ток мал по величине т.к. связан с неосновными носителями заряда, концентрация которых мала. Таким образом, $p-n$ переход обладает односторонней проводимостью.

На рис.3 приведены энергетические диаграммы равновесного $p-n$ перехода и смещенного в прямом и обратном направлении.

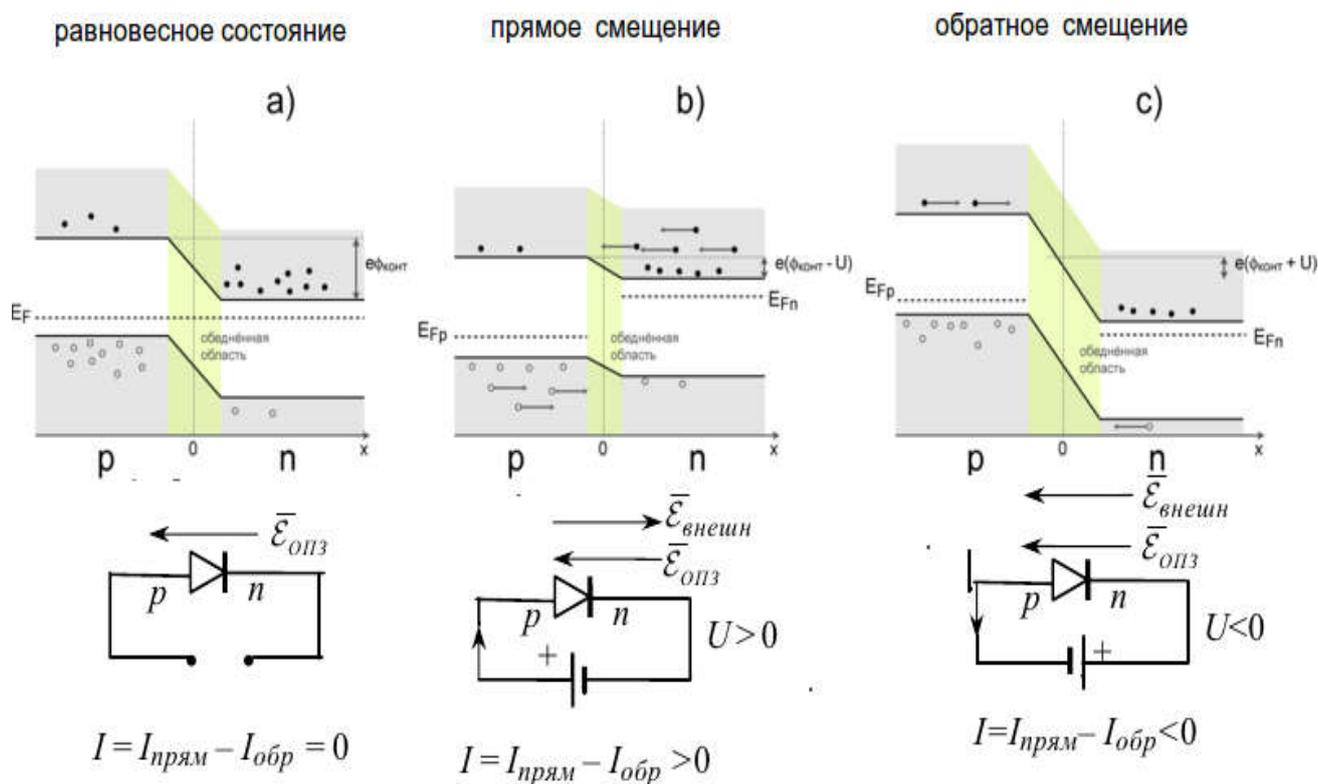


Рис.3 Энергетическая диаграмма $p-n$ -перехода. а) Состояние равновесия б) При приложенном прямом напряжении в) При приложенном обратном напряжении

Свойство $p-n$ перехода пропускать ток только в одном направлении позволяет использовать его как *выпрямитель* переменного тока. На рис.4 приведена схема включения $p-n$ перехода.

Если прикладывать к $p-n$ -переходу синусоидальное напряжение,

$$\varepsilon(t) = E_m \sin \omega t,$$

то в течение положительного (+) полупериода напряжение для $p-n$ перехода является прямым, его сопротивление мало, и через резистор R_H проходит ток, который создает на нем падение напряжения $U_{\text{вых}}$, повторяющее входное напряжение $\varepsilon(t)$. В следующий, отрицательный (-), полупериод напряжение для $p-n$ перехода является обратным, сопротивление его велико, тока практически нет и, следовательно, $U_{\text{вых}} = 0$. Таким образом, через $p-n$ переход и R_H протекает

пульсирующий выпрямленный ток. Он создает на резисторе R_H пульсирующее выпрямленное напряжение $U_{\text{вых}}$.

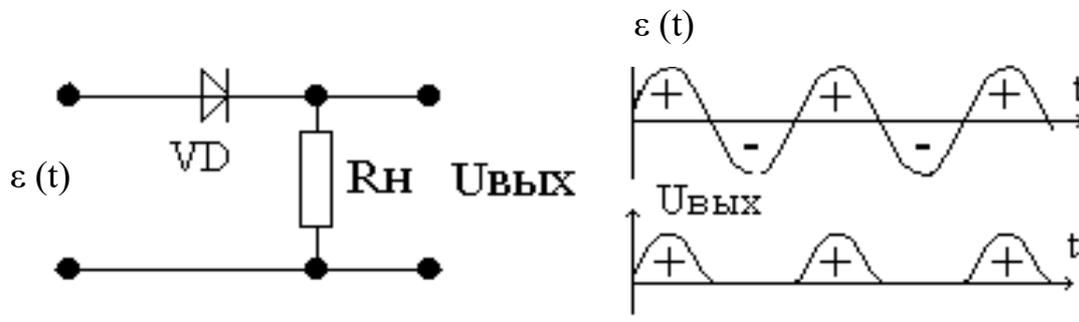


Рис.4 Схема однополупериодного выпрямителя.

Полезной частью выпрямленного напряжения является его постоянная составляющая или среднее значение U_{cp} (за полупериод):

$$U_{\text{cp}} = U_{\text{max}} / \pi = 0,318 U_{\text{max}}$$

Таким образом, U_{cp} составляет около 30% от максимального значения.

В дальнейшем будем называть полупроводниковый выпрямитель *диодом* по аналогии с двухэлектродными лампами.

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 неосновных носителей заряда).

Ток через p - n -переход определяется количеством носителей тока N и их способностью преодолеть барьер, которая 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 p - n -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,

e - заряд электрона, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К (постоянная Больцмана).
Логарифмируя уравнение (12), получаем

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

Следует учесть, что полученное уравнение справедливо для идеального p - n -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 $y = \ln(I_+ + |I_{-max}|)$ (16)

$$x = U$$
 (17)

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

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

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

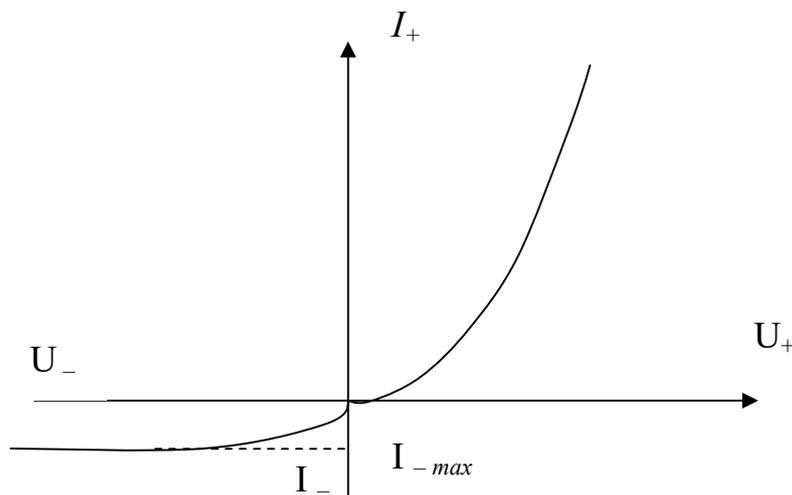


Рис. 5. Вольтамперная характеристика полупроводникового выпрямителя.

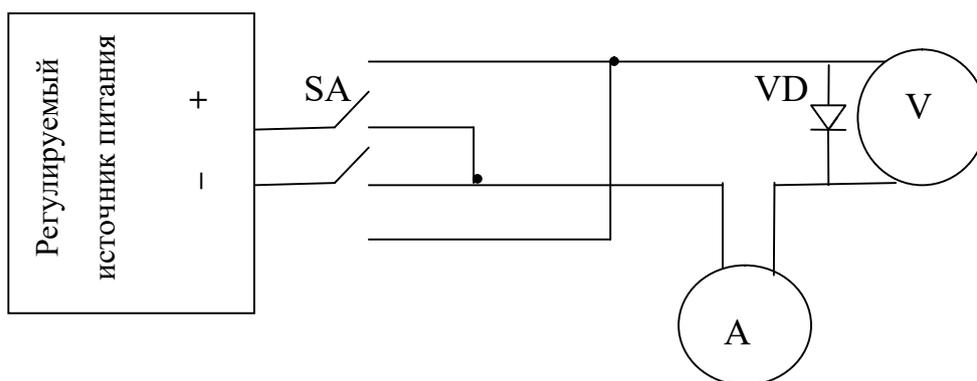
Схема лабораторной установки приведена на рис. 6. Напряжение на полупроводниковый диод VD типа Д-305 подаётся от регулируемого источника постоянного напряжения. Подключение полупроводникового диода в прямом и обратном направлениях осуществляется переключателем SA. Измерение напряжения и силы тока осуществляется 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 верхнем приборе - в положение "U.";
- на нижнем приборе - в положение " A".



VD - исследуемый полупроводниковый диод;

SA - переключатель напряжения;

A и V - цифровые электроизмерительные приборы.

Рис. 6. Принципиальная схема установки

4.3. При измерении ветви вольтамперной характеристики, соответствующей "обратному" току, переведите переключатель SA 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 SA 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 K 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 мА), проводятся по возможности быстро, чтобы не нагревался исследуемый диод, так как это искажает вольтамперную характеристику диода. При всех перерывах в работе переведите переключатель SA в нейтральное положение.

4.6. При обработке данных измерений I и U следует считать, что доверительный интервал их абсолютной погрешности определяется только систематической составляющей и рассчитывается 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

Напряжение U, В	Ток в направлении		Сопротивление в направлении		Коэффициент выпрямления, К
	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 *p-n*-переход?

6.5. Что такое контактная разность потенциалов и как она возникает?

6.6. Какие носители создают «обратный» ток диода?

6.7. Как происходит выпрямление переменного тока полупроводниковым выпрямителем?

Литература

1. *Савельев И. В.* Курс общей физики. В 5-ти кн. [Текст] : учебник. Кн. 2. Электричество и магнетизм / И. В. Савельев. - Москва : Астрель-АСТ, 2004 -2007. - 336 с.
2. *Бондарев Б. В.* Курс общей физики в 3 кн. Книга 2: электромагнетизм, оптика, квантовая физика : учебник для бакалавров / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спирин. — 2-е изд. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 441 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-9916-1754-3. — Режим доступа : www.biblio-online.ru/book/E7ADA2F4-0719-4286-99F9-C06E830661D3.
3. *Зисман Г.А., Тодес О.М.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1974.
4. *Трофимова Т.И.* Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – 6-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2004.
5. *К.Б. Канн.* Курс общей физики: Учебное пособие - М.: КУРС: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 360 с. Учебное пособие ЭБС Znanium.com (<http://znanium.com>).
6. *Калашников С.Г.* Электричество. – М.: Наука, 1970, 1985г
7. *Фокин С.А., Бармасова А.М., Мамаев М.А.* Обработка результатов измерений физических величин. Учебное пособие для лабораторного практикума по физике. - СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. – 62 с.

Интернет-ресурсы:

1. <http://www.phys.spbu.ru/library/studentlectures.html> Лекции для студентов физического факультета СПбГУ
2. <http://pskgu.ru/ebooks/okfizikc.html> Учебные пособия по общей физике.
3. <http://lectoriy.mipt.ru/lecture?category=Physics&lecturer> Видеолекции и открытые образовательные материалы ФизТеха. Лекции по Физике.
4. <http://physics.nad.ru/> - физика в анимациях
5. <http://dmitryukts.narod.ru/kopilka/video.html>- опыты по физике.
6. <https://sites.google.com/site/rggmustud/> Актуальная информация для студентов, проходящих обучение физике в РГГМУ.
7. Электронная библиотека ЭБС «Znanium» (<http://znanium.com/>)
8. Электронная библиотека ЭБС «Юрайт» (<https://biblio-online.ru/>)

Учебное издание

Лабораторный практикум по дисциплине «Физика».

Разделы: Электричество и магнетизм.

I и II курсы

Авторы: А.П. Бобровский, Н.В. Дьяченко, В.В. Косцов,
Е.Ю. Михтеева, И.А. Потапова, А.Л. Скобликова,
В.Г. Сыромятников, П.П. Хлябич, Т.Ю. Яковлева.

Печатается в авторской редакции.

Подписано в печать 13.10.2020. Формат 60×90 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 4,75. Тираж 75 экз. Заказ № 883.
РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская, 79.