Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»
Институт математики, информационных технологий и физики
Кафедра общей физики

РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Учебно-методическое пособие

Ижевск
2026

УДК 537.8(075.8)
ББК 22.33р30
Р851

Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом УдГУ

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, зав. каф. математики и физики УдГАУ
О. В. Карбань

Составитель: ст. преподаватель каф. общей физики ИМИТиФ УдГУ
Галлямов С. Р.

Р851 Руководство к лабораторным работам по курсу «Электричество» : учеб.-метод. пособие / сост.: С. Р. Галлямов. – Ижевск : Удмуртский университет, 2026. – 5,2 Мб. – Текст : электронный.

Учебно-методическое пособие составлено на основе изданного в 1991 году преподавателями кафедры общей физики УдГУ руководства к лабораторным работам по электричеству. Пособие предназначено для проведения занятий по физическому практикуму курса «Электричество» со студентами направлений. 10.05.05 «Безопасность информационных технологий в правоохранительной сфере» и 10.03.01.01 «Организация и технология защиты информации».

Пособие содержит описания девяти лабораторных работ, которым предшествуют «Требования по выполнению и оформлению лабораторных работ физического практикума на кафедре общей физики ИМИТиФ УдГУ» и может быть использовано при обучении студентов других непрофильных направлений.

Минимальные системные требования:
Celeron 1600 Mhz; 128 Мб RAM; Windows XP/7/8 и выше, 8x DVD-ROM
разрешение экрана 1024×768 или выше; программа для просмотра pdf.

© Галлямов С. Р., сост., 2026
© ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 2026

Руководство к лабораторным работам по курсу «Электричество»
Учебно-методическое пособие

Подписано к использованию 31.08.2026
Объем электронного издания 5,2 Мб
Издательский центр «Удмуртский университет»
426034, г. Ижевск, ул. Ломоносова, д. 4Б, каб. 021
Тел. : +7(3412) 263-751 E-mail: editorial@udsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4

Требования по выполнению и оформлению лабораторных работ физического практикума на кафедре общей физики ИМИТиФ УДГУ 5

Изучение способов расширения пределов измерения амперметра и вольтметра 14

Изучение работы электронно-лучевого осциллографа 24

Определение удельного заряда электрона с помощью вакуумного диода 37

Исследование затухающих колебаний в колебательном контуре 47

Изучение полупроводникового диода и выпрямителей 57

Изучение работы полевого транзистора 70

Изучение работы биполярного транзистора 79

Изучение работы трансформатора 90

Закон Био-Савара-Лапласа. изучение магнитного поля катушки с током 96

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе обучения физический практикум (в том числе по электричеству) является важной составляющей при изучении студентами вуза дисциплины «Физика» («Общая физика»). Известным учебно-методическим пособием физического практикума по электричеству служит издание (Новожилов, В. П. Руководство к лабораторным работам по электричеству, часть 1/ В. П. Новожилов, С. Н. Костенков, Д. В. Сурнин, А. Н. Деев. – Ижевск,1991, – 180с.), применявшееся в обучении более чем в 30 вузах России. Пособие рассчитано на применение универсального оборудования, которое по настоящее время надёжно функционирует и применяется на кафедре общей физики УдГУ при обучении студентов различных направлений подготовки. Однако многолетняя практика обучения (в последнее время особенно) показала, что при выполнении лабораторных работ (далее ЛР) у студентов непрофильных специальностей возникают затруднения, поскольку вышеуказанное издание предназначалось в основном для студентов-физиков. Поэтому составление пособия для студентов непрофильных специальностей является актуальной задачей. Цель предлагаемого ниже пособия – составить вариант руководства к лабораторным работам по курсу «Электричество» для студентов непрофильных направлений специализации с учётом глубины изучаемого ими теоретического материала по курсу и имеющегося лабораторного оборудования. В предлагаемом пособии выполнение подавляющего большинства ЛР рассчитано на применение универсального лабораторного стенда и сменных плат, ранее разработанных под началом В. П. Новожилова. Описания ЛР включают цели, краткую теорию изучаемых явлений, сведения о методике проведения измерений и получения экспериментальных результатов, а также вопросы при подготовке к допуску и зачёту по каждой ЛР. Описаниям ЛР предшествуют «Требования по выполнению и оформлению лабораторных работ физического практикума на кафедре общей физики ИМИТиФ ФГБОУ ВО «УдГУ». Руководство предназначено для студентов непрофильных направлений специализации ФГБОУ ВО «УдГУ» и рекомендуется, в частности, для направлений 10.05.05 «Безопасность информационных технологий в правоохранительной сфере» и 10.03.01.01 «Организация и технология защиты информации».

Составитель благодарен всем коллегам по кафедре общей физики, общение с которыми – обычно не всегда продолжительное, но всегда конструктивное – способствовало достижению поставленной цели. Особая благодарность выражается Е. В. Коробейниковой и К. К. Осинцеву за продуктивное участие при подготовке текста руководства и при постановке ЛР (с целью апробации пособия) в 2025-2026 учебном году в кабинете физического практикума кафедры общей физики ИМИТиФ ФГБОУ ВО «УдГУ».

ТРЕБОВАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА НА КАФЕДРЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ ИМИТиФ ФГБОУ ВО «УДГУ»

Настоящие требования составлены на основе пособия по выполнению лабораторных работ физического практикума для студентов-бакалавров направления «Химия, физика и механика материалов» и предназначены для студентов непрофильных направлений подготовки.

1. В лаборатории (кабинете) физического практикума, студент в первую очередь обязан пройти инструктаж по технике безопасности в этой лаборатории, и расписаться в журнале по ТБ. Студент не прошедший инструктаж по технике безопасности, в лабораторию (кабинет) физического практикума не допускается.

2. Тема лабораторной работы (далее ЛР) задаётся преподавателем. Студент не допускается к выполнению ЛР, если не сдан допуск к ней.

3. Допуск считается сданным, если студент чётко излагает последовательность выполнения ЛР по заранее составленному плану на основе конспекта, оформленного в тетради (48 листов в клетку бывает достаточно) для лабораторных работ по физическому практикуму. При выполнении ЛР группой из двух (и более) студентов наличие конспекта в тетради обязательно для каждого студента.

4. Конспект составляется от руки на основе описания к ЛР, которое выдаётся лаборантом по просьбе студента. В конспекте следует (кратко, но по существу темы) изложить весь материал, представленный в описании к ЛР с формулировкой целей работы, перечислением используемых приборов и материалов.

5. В теоретической части конспекта обязательным является краткий вывод рабочей формулы, по которой будет определяться (измеряться косвенно) физическая величина. Необходимые для вывода формул рисунки должны иметь подрисуночные надписи.

6. В экспериментальной части конспекта обязательным является описание порядка выполнения заданий с перечислением используемых приборов и материалов, рисунков с подрисуночными надписями.

7. Включать установку и проводить измерения можно только с разрешения преподавателя или лаборанта. Не рекомендуется без необходимости изменять положения ручек приборов, так как обычно приборы настроены для работы. До начала работы следует записать характеристики приборов и продумать последовательность измерений.

8. Результаты измерений записываются на отдельных листах, прилагаемых к заключительному отчёту по работе, и визируются лаборантом или преподавателем. Таблицы для записи результатов измерений следует заготовить заранее.

9. Отчёт по лабораторной работе оформляется на листах формата А4, графики – на миллиметровой бумаге.

10. Заготовка отчёта включает титульный лист, формулировку целей работы, перечисление используемых приборов и материалов, краткую теорию, рисунки (схемы, чертежи и т.п.) установок, основные характеристики установок, описание хода выполнения заданий, вида и особенностей представления результатов.

11. Отчёт по работе дополняется представлением результатов в виде таблиц и рисунков (графиков, гистограмм и т.п.), расчётами величин и ошибок. Выводы в отчёте оформляются после полного завершения работы.

12. Работа считается сданной, если 1) отчёт соответствует настоящим требованиям; 2) студент удовлетворительно ответил на вопросы к зачёту по ЛР.

При составлении таблиц следует учитывать следующее:

1. Если вид таблицы не задан в описании к ЛР, то необходимо до получения допуска самостоятельно спланировать и начертить таблицу на основании информации, данной в описании к ЛР. Для этого нужно определить величины, которые будут заноситься в таблицу и как они должны в ней располагаться. Таблица должна содержать столбец «примечания», а пустые строки и столбцы недопустимы.

2. При вычерчивании таблиц необходимо пользоваться простым карандашом, а данные записывать авторучкой. Недопустимо записывать сначала карандашом, а в конце обводить авторучкой.

3. Результат заносится в таблицу после проведения измерения. Допустимо провести пробную серию измерений для проверки работы оборудования или определения диапазона измерений.

4. Таблица должна иметь номер и название, отражающее суть проведенных измерений. Общий множитель для однотипных результатов указывается один раз, в заголовке соответствующего столбца, там же указываются единицы измерения, как правило, соответствующие системе СИ и записанные кириллицей. Например,

Таблица 1. Определение удельного сопротивления меди.

№ измерения	I, мА	U, мВ	ρ, 10^{-7} Ом·м	Примечания

Правила построения графиков

1. График выполняется на миллиметровой бумаге, на которую наносятся координатные оси. Для величины, зависимость от которой рассматривается, всегда используется ось абсцисс.

2. График – это тоже рисунок, который должен содержать подрисуночную надпись с ясным физическим содержанием представленной закономерности.

3. На оси наносится масштаб (а не измеренные величины). Неудачный выбор масштаба – наиболее распространенная ошибка, зачастую обесценивающая график. При выборе масштаба необходимо помнить, что точность построения графика должна быть не ниже точности измерений. Масштаб наносится равноотстоящими друг от друга делениями так, чтобы расстояние между ними составляло 1, 2, 5 единиц (допустимы 2,5 и 4). Число делений с цифрами на каждой оси составляет обычно от 4 до 10. Если необходимо отложить по осям числа, например: 20000, 30000, 40000 и т.д., то проставляются 2, 3, 4 и т.д., а в конце оси около стрелки переменная умножается на 10^{-4}. Каждая из осей должна отстоять от края листа не менее чем на 25 мм. В конце оси около стрелки проставляется переменная и, через запятую, знак единицы измерения, например: $m \cdot 10^{-3}$, кг. На рис.1 приведены примеры неправильного, неудачного и правильного нанесения масштаба.

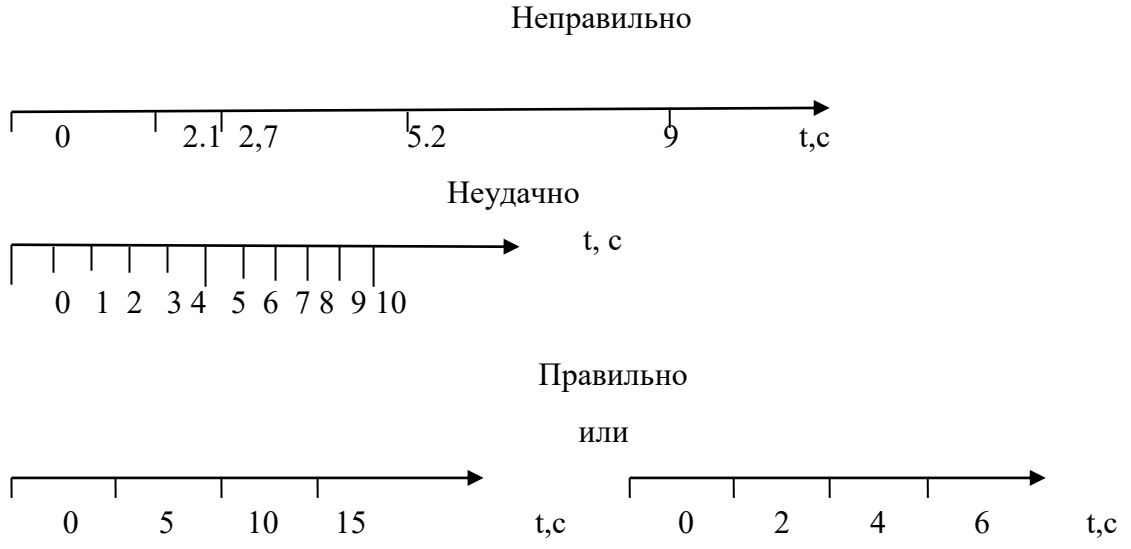


Рис. 1. Примеры неправильного, неудачного и правильного нанесения масштаба

4. Масштаб нужно выбирать так, чтобы кривая заняла большую часть листа как по одной, так и по другой переменной (рис.2), а ошибка (погрешность) измерения соответствовала одному-двум мелким делениям графика. В этом случае экспериментальные точки обозначают окружностями, квадратами, треугольниками (для разных серий измерений, представленных на графике, используют различные обозначения, с соответствующими пояснениями на графике) с центрами в точках, соответствующих экспериментальным данным, а точками обычно обозначают результаты «теоретического» расчёта. Начало отсчёта на графике не обязательно начинать с нуля, иногда удобнее выбирать округлённое число, отличное от нуля.

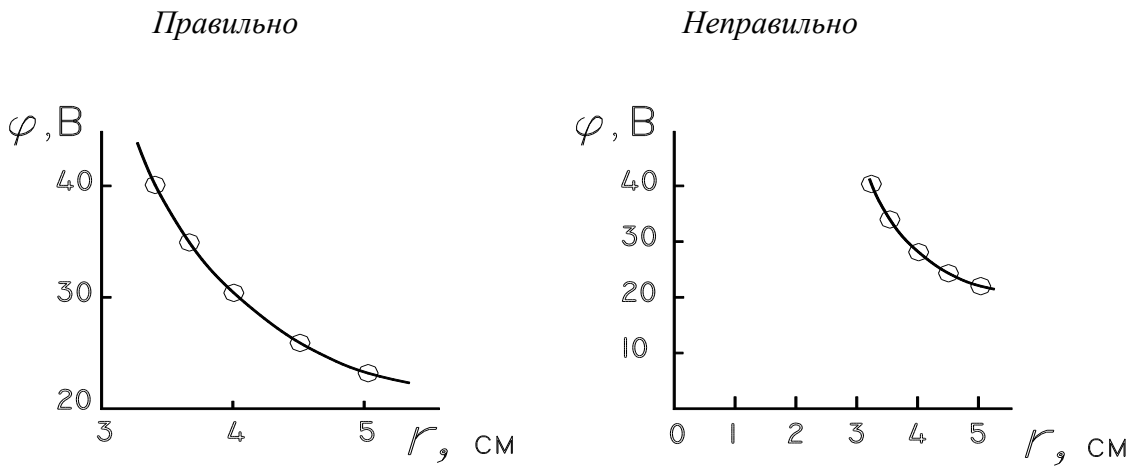


Рис.2. Примеры правильного и неправильного выбора масштаба и начала отсчёта

5. На концах осей указываются откладываемые величины и, через запятую, используемые единицы их измерения. Обычно туда же выносится и порядок масштаба ($10^{\pm n}$, где n – целое число).

6. Если не удаётся выбрать масштаб графика в соответствии с ошибками (см. пункт 4), экспериментальные значения величин (точки) отчетливо наносятся вместе с ошибками ─ отрезками длиной в доверительный интервал (или систематическую погрешность), расположенными параллельно соответствующей оси (см. рис. 3).

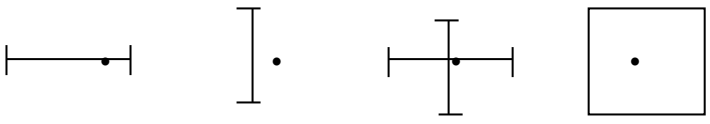


Рис. 3. Варианты нанесения на график экспериментальных точек вместе с доверительными интервалами (или систематическими ошибками)

7. Экспериментальная кривая проводится плавно через доверительные интервалы всех или большинства экспериментальных точек так, чтобы экспериментальные точки наиболее близко и равномерно располагались с разных сторон кривой (см. рис.4, на котором речь идёт о линейной зависимости). При этом сумма отрезков отклонений точек от кривой в одну сторону должна быть равна сумме отклонений точек от этой же кривой в другую сторону; по возможности не должно быть очень больших отклонений точек от кривой, лучше иметь два-три небольших отклонения, чем одно большое.

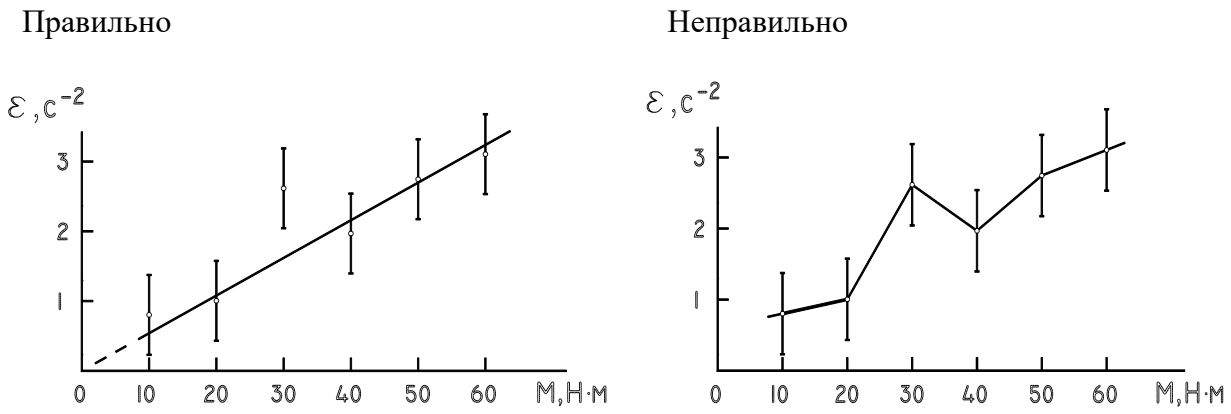


Рис. 4. Правильное и неправильное представление данных на графике

Исключение составляет градуировочный график, на котором точки соединяются последовательно прямыми линиями, так как при этом мы считаем значения величин точными, а кривая служит для отыскания промежуточных значений линейной интерполяцией.

8. Если на графике изображается теоретическая кривая, то указывается формула, по которой она рассчитывается.

9. При изображении нескольких кривых на одном поле графика каждая из них нумеруется или выделяется другим способом. В свободной части поля даются соответствующие пояснения.

10. Если неизвестная величина определяется по графику, то необходимо все построения для нахождения этой величины нанести на график.

Точность записи результатов измерений и правила округлений

Точность записи (число значащих цифр) отдельных измерений и последующих вычислений при их обработке должна быть согласована с точностью результата измерения. В учебной лаборатории рекомендуется придерживаться следующих правил.

1. При числе измерений менее 100 окончательную ошибку (погрешность) результата измерения следует округлять до одной значащей цифры. Например, если расчёт ошибки даёт 0,347 м/с, то это значение нужно округлить до 0,3 м/с. Однако есть исключение из этого правила – если первая значащая цифра в ошибке 1, то сохраняют две значащие цифры в ошибке. Пусть, например, некоторый расчёт дал ошибку 0,14, округлив это значение до 0,1, мы уменьшим ошибку сразу на 40 %, так что правильнее в этом случае – привести в качестве ошибки величину 0,14.

2. Число цифр в результатах промежуточных расчётов обычно должно быть на одну больше, чем в окончательном результате. Ошибки при промежуточных вычислениях должны быть выражены не более чем тремя значащими цифрами.

3. Когда ошибка в измерении рассчитана, необходимо проанализировать, какие цифры в измеренной величине являются значимыми. Утверждение типа L=(127,548± 2) см нелепо. Погрешность 2 означает, что вместо цифры 7 на третьем месте от начала в действительности может быть любая цифра в интервале от 5 до 9, последующие же цифры 5, 4 и 8 приводить вовсе бессмысленно, и они должны быть округлены. Корректная запись результата будет выглядеть так: L=(128±2) см. То есть округлять результат измерения следует так, чтобы он оканчивался цифрой того же разряда, что и значение ошибки.

4. Если первая (слева направо) из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр меньше 5, то оставшиеся цифры не изменяют. Лишние цифры в целых числах заменяют нулями, а в десятичных дробях отбрасывают. Например, при сохранении четырёх значащих цифр число 782 447 должно быть округлено до 782 400; число 283,437 – до 283,4.

5. Если первая из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр равна 5, а за ней не следует никаких цифр или идут нули, то округление производят до ближайшего чётного числа, то есть чётную последнюю цифру или нуль оставляют без изменения, нечётную увеличивают на единицу. Например, при сохранении трёх значащих цифр число 264,50 округляют до 264; число 645,5 округляют до 646.

6. Если первая из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр больше или равна 5, но за ней следует отличная от нуля цифра, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу. Например, при сохранении трёх значащих цифр число 17,58 округляют до 17,6; число 18598 – до 18600; число 352,512 – до 353.

В настоящее время выработаны некоторые общие правила записи физических констант, результатов измерений и расчётов, ставшие фактическим

стандартом (по крайней мере, в физике). Все указанные исходные данные, предполагаемые для дальнейшего использования, записывают только значащими цифрами (в виде десятичных дробей). Запятую ставят сразу после первой отличной от нуля цифры, а число (в составе значащих цифр) умножают на десять в соответствующей степени. Нули, стоящие в начале или конце числа, как правило, не записывают. Например, числа 0,00435 и 234000 записывают в виде $4{,}35 \cdot 10^{-3}$ и $2{,}34 \cdot 10^{5}$. Подобная запись, иногда называемая ***стандартной***, упрощает возможные дальнейшие вычисления, особенно в случае формул, удобных для логарифмирования (то есть умножение, деление, возведение в степень и т.п.). Именно в такой стандартной форме в физических справочниках приводят основные физические константы. Например, скорость света в вакууме $c = 2{,}9979 \cdot 10^{8}$ м/с, заряд электрона $e = 1{,}60219 \cdot 10^{-19}$ к и т.д. Подобным же образом с использованием стандартной формы числа можно записать и полный результат измерения, то есть с учётом ошибки, например, $(1{,}60 \pm 0{,}01) \cdot 10^{-19}$ к, естественно, дополнительно указав доверительную вероятность, если здесь ошибка – случайная.

Рекомендации по написанию выводов к лабораторной работе

Выводы к лабораторной работе являются учебной моделью написания выводов для всякого научного исследования. Текст выводов должен дать читателю возможность в короткое время, не обращаясь к самой работе, получить ясное представление о полученных в работе результатах и способах их получения. Написание выводов требует от студента чёткого понимания того, что он делал и что получил, умения пользоваться научной терминологией, обобщать и делать выводы. Выводы по лабораторной работе должны формально содержать следующие основные блоки:

1. Краткое описание того, что, каким методом и на каком оборудовании выполнялось. При этом не должно быть пересечений с описанием, данным во введении к лабораторной работе. То есть, не следует переписывать введение в выводы. Пример: «В данной работе определялась величина элементарного заряда методом Милликена в ходе трёх серий измерений, проводившихся при подаче на обкладки конденсатора напряжений в 300, 400 и 500В».

2. Описание выбранного диапазона, в котором производились измерения, интервалов между измерениями и количества измерений, а также, по возможности, обоснование такого выбора.

3. Описание, каким методом обрабатывались данные (если это имело место) и как использовались результаты, например, строились графики, рассчи-

тывались константы и т. д. Например, «Прямые построены по методу наименьших квадратов».

4. Описание полученных графиков. При этом необходимо различать экспериментальные данные и построенные по ним кривые и теоретические зависимости. Важно понимать следующее:

а) они не обязаны совпадать;

б) никакая экспериментальная зависимость не является абсолютно достоверной, так как всегда могут при дополнительных измерениях найтись точки, изменяющие картину; степень достоверности зависит от количества данных (и распределения их в диапазоне измерений) и их ошибок;

в) с помощью эксперимента нельзя доказать или проверить теорию, ибо экспериментальные данные могут лишь свидетельствовать в пользу той или иной теоретической модели, поэтому принято говорить о степени согласия с теорией.

Например, *неверно*: «полученные данные доказывают справедливость закона сохранения импульса». *Предпочтительно*: «полученные данные находятся в хорошем согласии с законом сохранения импульса».

5. Описание результатов, полученных из анализа графиков или другими методами, а также их ошибок, с указанием, как эти ошибки рассчитывались. При этом необходимо указать характер ошибки: случайный, приборный или систематический.

6. *Обсуждение источников ошибок.* Необходимо попытаться найти реальную причину неточностей в методике эксперимента или в характеристиках экспериментального оборудования. Недопустимо формально ссылаться на неточность приборов, объясняя этим неудачные результаты.

7. *Обсуждение согласия (если такое имеется) теории и эксперимента.* Необходимо обязательно указать, совпали ли результаты в пределах погрешности или нет. Здесь можно высказать своё мнение, и допустимы неточные оценки: «удовлетворительно согласуется, находится в хорошем согласии, не согласуется» и т.д. Выводы принято выражать в безличной форме, например: «В работе исследовалась зависимость…». Такая форма изложения предпочтительнее для научных работ, потому что она способствует объективности изложения. Недопустимо пытаться все выводы сформулировать одним предложением, нарушать последовательность изложения и делать смысловые разрывы в тексте. В выводах не принято вставлять таблицы с результатами измерений, допустимы лишь значения окончательного результата (или небольшие таблицы с окончательными результатами). Недопустимо вклеивать

в выводы графики и иллюстрации. На них можно и нужно ссылаться. Не рекомендуется представлять экспериментальные и табличные значения в разных системах единиц. Необходимо также объяснять в выводах расхождение в экспериментальных и табличных значениях. Для простоты сравнения результаты должны быть представлены в одинаковом виде. Каждый результат необходимо сравнивать с табличными или теоретическими значениями, ранее полученными в литературе по данной тематике. Ссылка на источник из литературы должна иметь номер (обычно в квадратных скобках, например, [1]). Соответствующая номеру ссылка расшифровывается в списке литературы (или библиографическом списке) с обязательным указанием 1) автора (авторов); 2) названием книги (или статьи из научного журнала); 3) города, в котором находится издательство (журнал); 4) издательства, в котором эта книга напечатана (для статьи – название журнала); 5) года издания; 6) числа страниц. Например, если в одном из пунктов выводов ЛР по определению удельного заряда электрона сказано: «…измеренное значение удельного заряда электрона $(1{,}68 \pm 0{,}12)\cdot 10^{11}$ к/кг в пределах ошибки измерения согласуется с табличным значением $1{,}76\cdot 10^{11}$ к/кг [1]…» , то в списке литературы ссылка [1] расшифровывается как

ЛИТЕРАТУРА

1. Таблицы физических величин. Справочник / под ред.: акад. И. К. Кикоина. – Москва : Атомиздат, 1976. – 1008 с.»

Отметим, что выше приведён пример источника литературы, как книги без авторов. Приведём примеры оформления ссылок на книги с авторами (автором):

1. Парселл, Э. Берклеевский курс физики. В 5 т. Т.2. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. – Москва : Наука, 1975. – 448 с.

2. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – Москва : Мир, 1982. – 512 с.

3. Новожилов, В. П. Руководство к лабораторным работам по электричеству. Часть 1/ В. П. Новожилов, С. Н. Костенков, Д. В. Сурнин, А. Н. Деев. – Ижевск : Ижевский полиграфический комбинат, 1991. – 180 с.

Информацию по описанию источников литературы в других случаях можно получить в Учебно-научной библиотеке УдГУ.

ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ РАСШИРЕНИЯ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Цель работы: Овладеть теорией способов расширения пределов измерения амперметров и вольтметров и получить практические навыки по расширению их пределов измерения до заданной величины.

Приборы и материалы: микроамперметр, сменная плата, набор сопротивлений, универсальный лабораторный стенд, мультиметр, соединительные провода.

1. ТЕОРИЯ

Амперметр и вольтметр относятся к *электроизмерительным приборам* и служат соответственно для измерения силы тока и напряжения. В электроизмерительных приборах энергия электрического тока преобразуется в механическую энергию отклонения подвижной системы прибора. Как правило, подвижная система имеет указатель в виде стрелки. По способу преобразования энергии и по конструктивным особенностям измерительного механизма известно порядка десяти *систем* электроизмерительных приборов, среди которых наиболее распространёнными являются магнитоэлектрические, электромагнитные и электродинамические. Амперметры *магнитоэлектрической системы* имеют катушку (из тонкой проволоки), которая может поворачиваться на некоторый угол между полюсами постоянного магнита. При пропускании тока через катушку она стремится установиться по полю магнита под действием вращающего момента $M_{вр}$, величина которого пропорциональна току [1,2]. Повороту катушки препятствует специальная пружина, упругий момент которой $M_{упр}$ пропорционален углу закручивания. При равновесии эти моменты будут равными $M_{вр}= M_{упр}$, а ток пропорционален углу поворота катушки, поэтому шкала таких приборов равномерная.

Приборы (в том числе электроизмерительные) характеризуются ***чувствительностью*** – способностью реагировать на изменения входного сигнала. Чувствительность прибора S определяется отношением изменения сигнала ΔY *на выходе* прибора к вызвавшему его изменению сигнала ΔX *на входе* прибора: $S=\Delta Y/\Delta X$. Чувствительность прибора имеет размерность, зависящую от характера измеряемой величины. Для амперметра и вольтметра единицами измерения S являются (дел/А) и (дел/В). Например, при увеличении тока на 6А стрелка амперметра отклонилась на три деления, тогда чувствительность этого амперметра S=3дел/6А=0,5дел/А. Величина C, обратная чувствительности, называется ***ценой деления*** прибора: $C = 1/S$. Электроизмерительные приборы, имеют предел измерения, превышение которого недопустимо. Однако на

практике возникает задача измерения электрической величины (тока или напряжения), превышающей предел измерения данного (обычно дорогостоящего) прибора. В случае амперметра решение задачи возможно при помощи шунтирующего сопротивления (шунта), а в случае вольтметра – при помощи добавочного резистора. Шунт и добавочный резистор служат (относительно дешёвыми) ***средствами***, позволяющими значительно ***расширить*** предел измерения имеющегося прибора до заданной предельной величины. Пределы измерения тока и напряжения задаются преподавателем.

1.1. Измерение постоянного тока при помощи амперметра

Постоянный ток I через сопротивление R (рис.1*а*) зависит от приложенного к R напряжения U по закону Ома: $I=U/R$. Сопротивление, которое оказывает прибор протекающему через него току, называется внутренним сопротивление прибора r. Амперметры (и вольтметры), кроме того, характеризуются током полного отклонения I_r, при котором отклонение стрелки достигает своего максимального значения. Напряжение на зажимах прибора, соответствующее току полного отклонения, называется напряжением полного отклонения U_r. Напряжение полного отклонения, очевидно, равно произведению I_r на r: $U_r = I_r r$.

При измерении силы тока амперметр, параметры которого I_r и r должны быть известны, включают в разрыв исследуемой цепи (рис.1*б*).

а) *б*)

Рис.1. *а*) – ток I через сопротивление R; *б*) – измерение тока при помощи амперметра

Увеличение тока в цепи до I_r вызывает возрастание показаний прибора до полного отклонения указателя. Включение амперметра вызывает уменьшение тока в цепи от U/R до величины $U/(R + r)$, поскольку сопротивление протекающему току возрастает до $(R + r)$. Пусть $I_x = U/(R + r)$ — результат измерения тока амперметром, включенным в цепь, а $I = U/R$ – значение силы тока в отсутствии амперметра, то есть истинное значение тока. Тогда $\Delta I = I_x - I$ – абсолютная и $\varepsilon_I = \Delta I/I$ – относительная погрешности измеряемого тока, вызванные

включением прибора в исследуемую цепь. Величина (модуль) ε_I выражается через известные сопротивления R и r:

$$\varepsilon_I = \frac{|\Delta I|}{I} = \frac{|I_x - I|}{I} = \frac{|U/(R+r) - U/R|}{U/R} = \frac{|(-r)/[(R+r)R]|}{1/R} = \frac{r}{R+r},$$

то есть относительную погрешность, вызванную влиянием амперметра, можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon_I = \frac{r}{R+r} \ . \qquad (1)$$

Из формулы (1) видно, что относительная погрешность уменьшается с уменьшением сопротивления прибора r и увеличением сопротивления нагрузки R. Если $r << R$, то $\varepsilon_I << 1$ и $\Delta I << I$. Это означает, что отличием измеренного тока и его истинным значением можно пренебречь и считать, что при включении амперметра ток не изменяется. Поэтому амперметр – это электроизмерительный прибор с относительно малым внутренним сопротивлением.

1.2. Расширение предела измерения амперметра постоянного тока

Предел измерения амперметра увеличивается при помощи шунтирующего сопротивления (или шунта), подключенного к амперметру параллельно и последовательно в цепь измеряемого тока (рис.2). При этом измеряемый ток $I_{изм}$ разветвляется на две неравные части: большая его часть $I_ш$ проходит через шунт, а меньшая часть $I_п$ (при этом $I_п < I_r$) проходит через прибор, вызывая отклонение указателя (стрелки). При полном отклонении стрелки $I_п = I_r$, а измеряемый ток достигает предельного значения:

$$I_{изм} = I_{пред} = I_ш + I_r, \qquad (2)$$

где $I_{пред}$ – предельное значение измеряемого тока, $I_ш$ – ток через шунт, I_r – ток полного отклонения через электроизмерительный прибор. Из формулы (2) следует, что

$$I_ш = I_{пред} - I_r. \qquad (3)$$

Напряжения на выводах шунта и амперметра равны и составляют:

$$U = I_r r = I_ш R_ш. \qquad (4)$$

Используя формулы (2), (3) и (4), находим сопротивление шунта:

$$R_ш = I_r r / (I_{пред} - I_r),$$

или

$$R_ш = r / (I_{пред} / I_r - 1). \qquad (5)$$

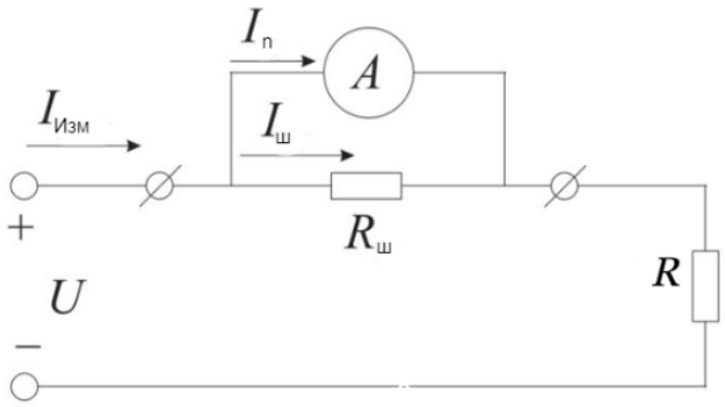


Рис.2. Электрическая схема подключения шунта к амперметру [3]

Следовательно, для расширения предела измерения тока амперметра от первоначального предельного значения I_r до выбранного предельного значения $I_{пред}$ необходим шунт, сопротивление которого $R_ш$ можно рассчитать по формуле (5). Для этого необходимо знать внутреннее сопротивление амперметра r, первоначальное предельное значение тока I_r и выбранный предел измерения $I_{пред}$. Из формулы (5) следует, что чем больше выбранный предел измерения тока, тем меньше должно быть сопротивление шунта.

При неполном отклонении стрелки $I_п < I_r$ и $I_{изм} < I_{пред}$:

$$I_{изм} = I_ш + I_п. \quad (6)$$

Поскольку напряжения на выводах шунта и амперметра равны:

$$r\, I_п = R_ш\, I_ш, \quad (7)$$

то, выражая $I_ш$ из (7) и подставляя в (6) получим

$$I_{изм} = I_п\, [(r/R_ш)+1]. \quad (8)$$

Поэтому измеряемый ток $I_{изм}$ пропорционален $I_п$ – току через амперметр A. Поскольку шунтирование амперметра сопротивлением $R_ш$ приводит к отклонению его стрелки на максимальный угол при достижении измеряемого тока равного $I_{пред}$, то стрелка будет указывать на крайнее правое деление шкалы амперметра, так как $I_п = I_r$. Если $I_п < I_r$, то стрелка амперметра будет указывать на деление шкалы, соответствующее измеряемому току, меньшему, чем $I_{пред}$. Установление соответствия делений шкалы амперметра значениям измеряемой величины тока $I_{изм}$ далее будем называть *градуировкой* (*калибровкой*) шкалы амперметра.

1.3. Измерение постоянного напряжения при помощи вольтметра

Пусть участок цепи имеет сопротивление $R_{уч}$. Напряжение на сопротивлении $R_{уч}$, через которое проходит ток I, выражается по закону Ома: $U=IR_{уч.}$ Для измерения постоянного напряжения на участке цепи, вольтметр V (пара-

метры которого I_r, r, U_r) включают параллельно сопротивлению $R_{уч}$ (рис.3). Включение прибора вызывает уменьшение сопротивления участка цепи от значения $R_{уч}$ до R_0 (из-за параллельного подключения сопротивления прибора r): $R_0 = R_{уч}r/(R_{уч}+r)$. Поэтому при помощи вольтметра измеряется напряжение $U_х = U_{изм}$, приложенное к сопротивлению R_0. Тогда $U_х = IR_0$ — напряжение на сопротивлении R_0 , через которое проходит тот же ток I. Пусть U – напряжение на сопротивлении $R_{уч}$ в отсутствии вольтметра, то есть истинное значение напряжения, а $U_х = U_{изм}$ – результат измерения напряжения вольтметром, включенным в цепь. Тогда $\Delta U = U_х - U$ – абсолютная и $\varepsilon_U = \Delta U / U$ – относительная погрешности измеряемого напряжения, вызванные включением прибора в исследуемую цепь. Величина ε_U выражается через известные сопротивления $R_{уч}$ и r :

$$\varepsilon_U = \frac{|\Delta U|}{U} = \frac{|U_х - U|}{U} = \frac{|IR_0 - IR_{уч}|}{IR_{уч}} = \frac{[(R_{уч}r)/(R_{уч}+r)] - R_{уч}}{R_{уч}} = \frac{R_{уч}}{R_{уч}+r},$$

то есть относительную погрешность, вызванную влиянием вольтметра, можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon_U = \frac{R_{уч}}{R_{уч}+r}. \qquad (9)$$

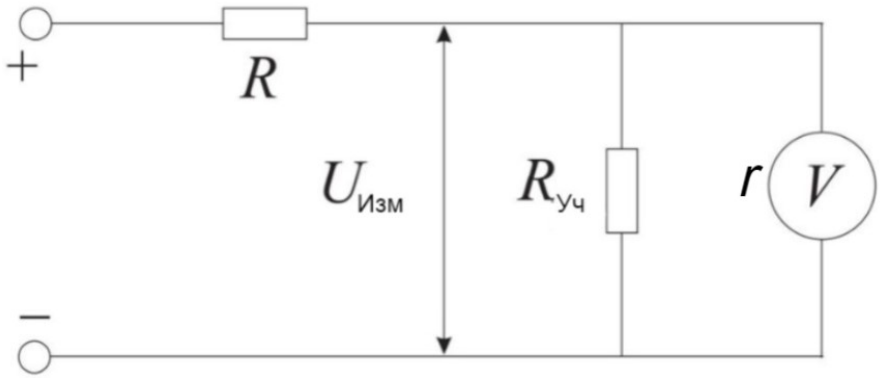


Рис.3. Электрическая схема измерения постоянного напряжения на участке цепи при помощи вольтметра [3]

Из формулы (9) следует, что ε_U уменьшается с увеличением сопротивления прибора r и уменьшением сопротивления участка цепи $R_{уч}$. Если $r >> R_{уч}$, то $\varepsilon_U << 1$ и $\Delta U << U$, то есть отличием измеренного напряжения вольтметром и его истинным значением можно пренебречь и считать, что при включении вольтметра напряжение на сопротивлении $R_{уч}$ не изменяется. Поэтому вольтметр – это электроизмерительный прибор с относительно большим внутренним сопротивлением.

1.4. Расширение предела измерения вольтметра постоянного тока

Предел измерения вольтметра увеличивается при помощи добавочного резистора $R_{доб}$, подключенного к вольтметру последовательно (рис.4). При этом измеряемое напряжение $U_{изм}$ равно сумме напряжений U_R и $U_п$, где U_R большая часть напряжения $U_{изм}$ падает на $R_{доб}$, а меньшая $U_п$ (при этом $U_п < U_r$) вызывает отклонение указателя (стрелки) прибора. При полном отклонении стрелки $U_п = U_r$, а измеряемое напряжение достигает своего предельного значения:

$$U_{изм} = U_{пред} = U_R + U_r, \tag{10}$$

где $U_{пред}$ – предельное значение измеряемого напряжения, U_R – напряжение на добавочном сопротивлении, U_r – напряжение электроизмерительного прибора. Поскольку через $R_{доб}$ и вольтметр V проходит одинаковый ток , то

$$U_R / R_{доб} = U_r/r, \tag{11}$$

откуда следует

$$R_{доб} = rU_R / U_r . \tag{12}$$

Учитывая, что

$$U_R = U_{пред} – U_r \tag{13}$$

и

$$U_r = I_r r, \tag{14}$$

получим $R_{доб} = (U_{пред} – U_r) r / U_r$

или

$$R_{доб} = U_{пред}/ I_r – r. \tag{15}$$

Следовательно, для расширения предела измерения вольтметра от первоначального значения напряжения U_r до выбранного предельного значения $U_{пред}$ необходимо добавочное сопротивление, которое можно рассчитать по формуле (15). Для этого необходимо знать внутреннее сопротивление, которое можно рассчитать по формуле (15).

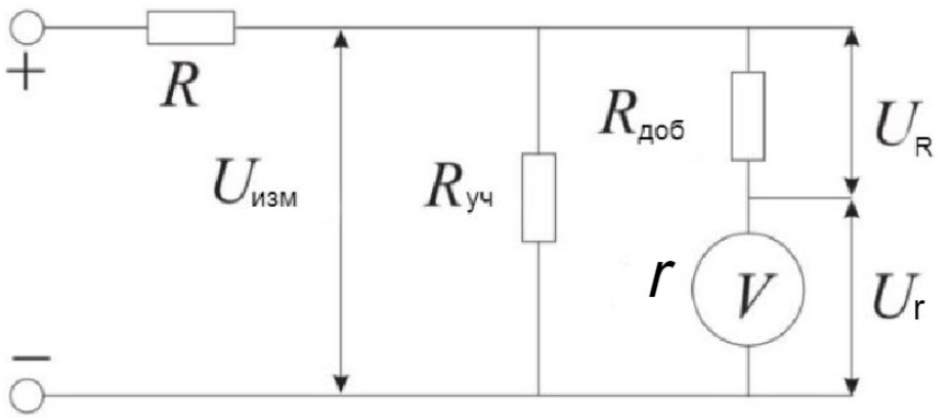


Рис.4. Электрическая схема подключения добавочного резистора к вольтметру [3]

Для этого необходимо знать внутреннее сопротивление вольтметра r, первоначальное значение напряжения U_r и выбранный предел измерения $U_{пред}$. Из формулы (15) следует, что чем больше выбранный предел измерения напряжения, тем больше должно быть добавочное сопротивление.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

2.1. Описание схемы эксперимента

В лабораторной работе используется универсальный лабораторный стенд, который является источником стабилизированного постоянного напряжения и обеспечивает выход постоянного напряжения «+15В» и «+5В». Электрические элементы, необходимые для выполнения эксперимента, смонтированы на специальной сменной плате. Измерение необходимого напряжения в работе производится вольтметром.

2.2. Описание сменной платы

Резисторы и электроизмерительный прибор, необходимые для выполнения эксперимента, смонтированы на специальной сменной плате. Схема расположения электрических элементов и внешний вид сменной платы приведены на рис. 5. На сменной плате расположены: электроизмерительный прибор (обозначим его как μA), переменный резистор R_r, необходимый для точного подбора добавочного сопротивления и шунта, эталонный постоянный резистор Rэ, необходимый для градуировки шкалы электроизмерительных

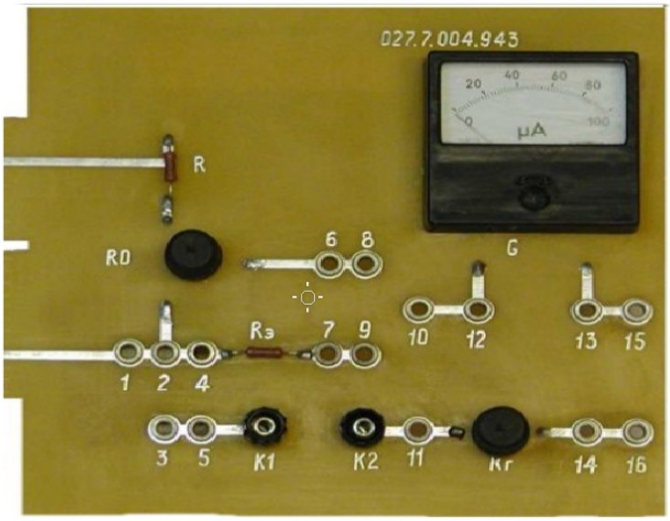


Рис. 5. Сменная плата с электроизмерительным прибором [3]

приборов, потенциометр *Ro* для регулирования напряжения исследуемой цепи от 0 до 15В, постоянный резистор *R*, предназначенный для ограничения тока в цепи. Номинальные значения элементов указаны на плате. Для подключения добавочного сопротивления и шунта на сменной плате предусмотрены клеммы «*К*1» и «*К*2».

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Градуировка шкалы амперметра

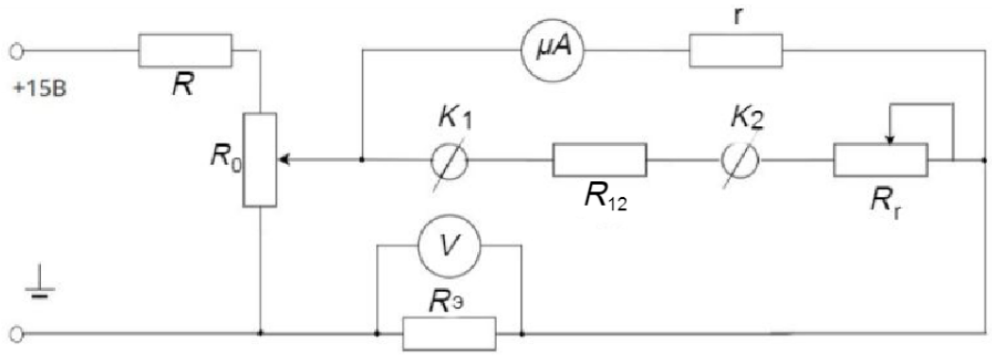


Рис. 6. Электрическая схема для градуировки шкалы амперметра

До градуировки шкалы амперметра необходимо предварительно рассчитать сопротивление шунта $R_ш$ по формуле (5). Из набора сопротивлений выбрать сопротивление с номинальным значением R_{12} наиболее близким к расчётному значению $R_ш$. При этом R_{12} не должно превышать $R_ш$: $R_{12} \leq R_ш$. Выбранное сопротивление с номинальным значением R_{12} с помощью клемм «*К*1» и «*К*2» подключить согласно электрической схеме на рис.6. При помощи переменного резистора R_r добиться показания омметра (подключенного к гнёз-

дам *5* и *14*) наиболее близкого к расчётному значению $R_ш$. Тогда шунтирующее сопротивление представляет из себя последовательное соединение сопротивлений R_{12} и R_r, а $R_ш=R_{12}+R_r$. Монтаж приведённой на рис.6 электрической схемы производится на сменной плате при помощи соединительных проводов. Градуировка шкалы амперметра производится при помощи вольтметра *V* и эталонного сопротивления $R_э$, смонтированного на сменной плате. Зная $R_э$ и падение напряжения на нём, можно определить ток в цепи, соответствующий делению, на которую указывает стрелка.

3.2. Градуировка шкалы вольтметра

Для градуировки шкалы вольтметра собирается электрическая схема, приведённая на рис. 7.

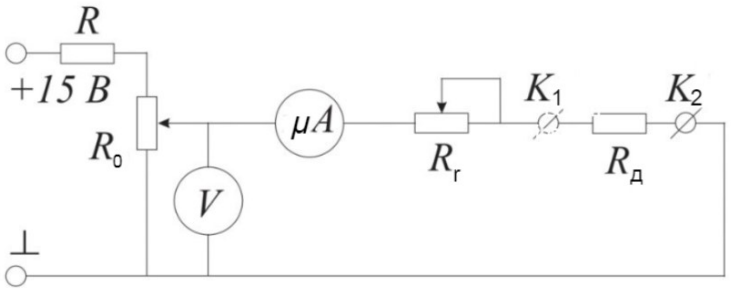


Рис.7. Электрическая схема для градуировки шкалы вольтметра [3]

Монтаж по данной электрической схеме производится на сменной плате при помощи соединительных проводов, используя соответствующие гнезда 1 и 16. Перед подключением добавочного сопротивления $R_д$ к клемм «*K1*» и «*K2*», следует рассчитать его величину по формуле (15). Градуировка шкалы вольтметра производится при помощи образцового вольтметра, обозначенного на схеме как *V***.**

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Упражнение 1. По пределу измерения I_r и внутреннему сопротивлению прибора *r*, установленного на сменной (двухсторонней) плате, рассчитайте сопротивление шунта $R_ш$ для заданного предела измеряемого тока $I_{пред}$.

Упражнение 2. Из набора сопротивлений выбрать сопротивление с номинальным значением R_{12}, наиболее близким к расчётному значению $R_ш$.. При этом R_{12} не должно превышать $R_ш$: $R_{12} \le R_ш$. Установите выбранное сопротивление на плате согласно рис.6. При помощи переменного резистора R_r добейтесь показания омметра (подключенного к гнёздам *5* и *14*) наиболее близкого к расчётному значению $R_ш$.

Упражнение 3. Проведите градуировку шкалы амперметра с увеличенным пределом измерения. Результат представьте в виде градуировочной кривой на миллиметровой бумаге. Рассчитайте цену деления полученного амперметра и оцените ошибку одного измерения при помощи этого амперметра.

Упражнение 4. По пределу измерения U_r и внутреннему сопротивлению прибора, рассчитайте добавочное сопротивление $R_д$ для заданного предела измеряемого напряжения $U_{пред}$.

Упражнение 5. Подберите добавочное сопротивление в соответствии с вычисленной величиной и установите в схему согласно рис. 6. При помощи переменного резистора R_r добейтесь показания омметра (подключенного к гнездам *5* и *14*) наиболее близкого к расчётному значению $R_д$.

Упражнение 6. Проведите градуировку шкалы вольтметра с увеличенным пределом измерения. Результат представьте в виде градуировочной кривой на миллиметровой бумаге. Рассчитайте цену деления полученного вольтметра и оцените ошибку одного измерения при помощи этого вольтметра.

Запишите выводы по результатам выполненной лабораторной работы.

Вопросы для получения допуска к лабораторной работе:

1. Что такое амперметр и как он включается в электрическую цепь?
2. Что такое вольтметр и как он подключается к электрической цепи?
3. Что служит средством, позволяющим расширить предел измерения имеющегося прибора до заданной предельной величины?
4. Определите сопротивление шунта по заданию преподавателя.
5. Определите добавочное сопротивление по заданию преподавателя.
6. Представьте план градуировки амперметра и вольтметра.

Вопросы к зачёту по лабораторной работе:

1. Поясните полученные графики.
2. В чём преимущество и недостатки применения средств, расширяющих пределы измерения амперметра и вольтметра?

ЛИТЕРАТУРА

1. Парселл, Э. Берклеевский курс физики. В 5 т. Т. 2. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. – Москва : Наука, 1975. – 448 с.

2. Савельев, И. В. Курс физики. В 3 т. Т. 2. Электричество / И. В. Савельев. – Москва : Лань, 2019. – 468 с.

3. Новожилов, В. П. Руководство к лабораторным работам по электричеству. Ч. 1 / В. П. Новожилов, С. Н. Костенков, Д. В. Сурнин, А. Н. Деев. – Ижевск : Ижевский полиграфический комбинат, 1991. – 180 с.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Цели работы: 1. Изучение принципа работы электронно-лучевого осциллографа. 2. Экспериментальное определение периода, частоты, амплитуды периодических сигналов, определение разности фаз двух гармонических колебаний одинаковой частоты, определение частоты и фазы гармонического напряжения методом фигур Лиссажу.

Приборы и принадлежности: электронно-лучевой осциллограф, звуковой генератор, универсальный лабораторный стенд, сменная плата.

1. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Основное назначение электронно-лучевого осциллографа (ЭЛО) – *наглядное отображение (визуализация)* электрических сигналов на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Для достижения этой цели служит электронный луч, след которого на экране ЭЛТ позволяет исследовать параметры электрического сигнала, подаваемого на вход осциллографа. Внутри баллона ЭЛТ в высоком вакууме расположены электронно-лучевая пушка *1*, отклоняющие пластины «*X*» и «*Y*» и люминесцирующий экран *2* (рис. 1)**.**

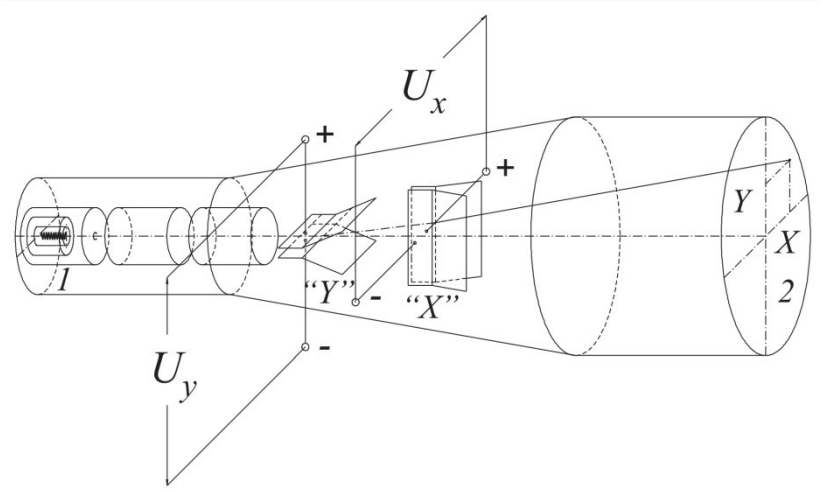


Рис.1. Устройство электронно-лучевой трубки электронно-лучевого осциллографа [3]

Электронно-лучевая пушка *1*, (катод которой служит для эмиссии электронов) формирует тонкий луч электронов, ускоренных большим напряжением между катодом и анодом пушки [1-3]. При прохождении между отклоняющими пластинами «*X*» и «*Y*», электронный луч отклоняется пропорционально поданным на пластины напряжениям U_x и U_y. Попадая на люминесцирующий экран *2*, электронный луч вызывает свечение, которое продолжается в течение облучения, а также и после его окончания, в течение

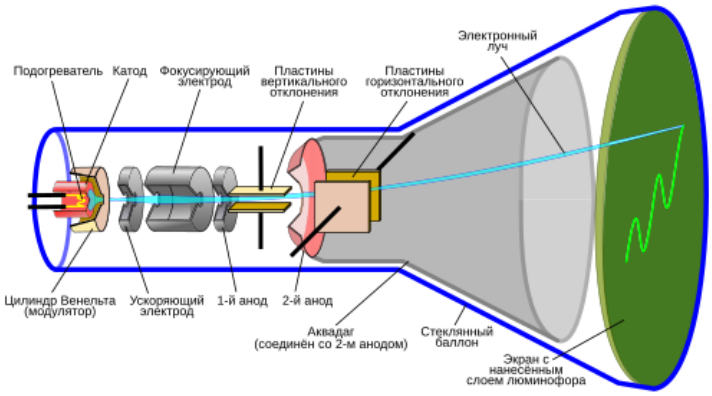


Рис. 2. Траектория следа электронного луча на люминесцирующем экране

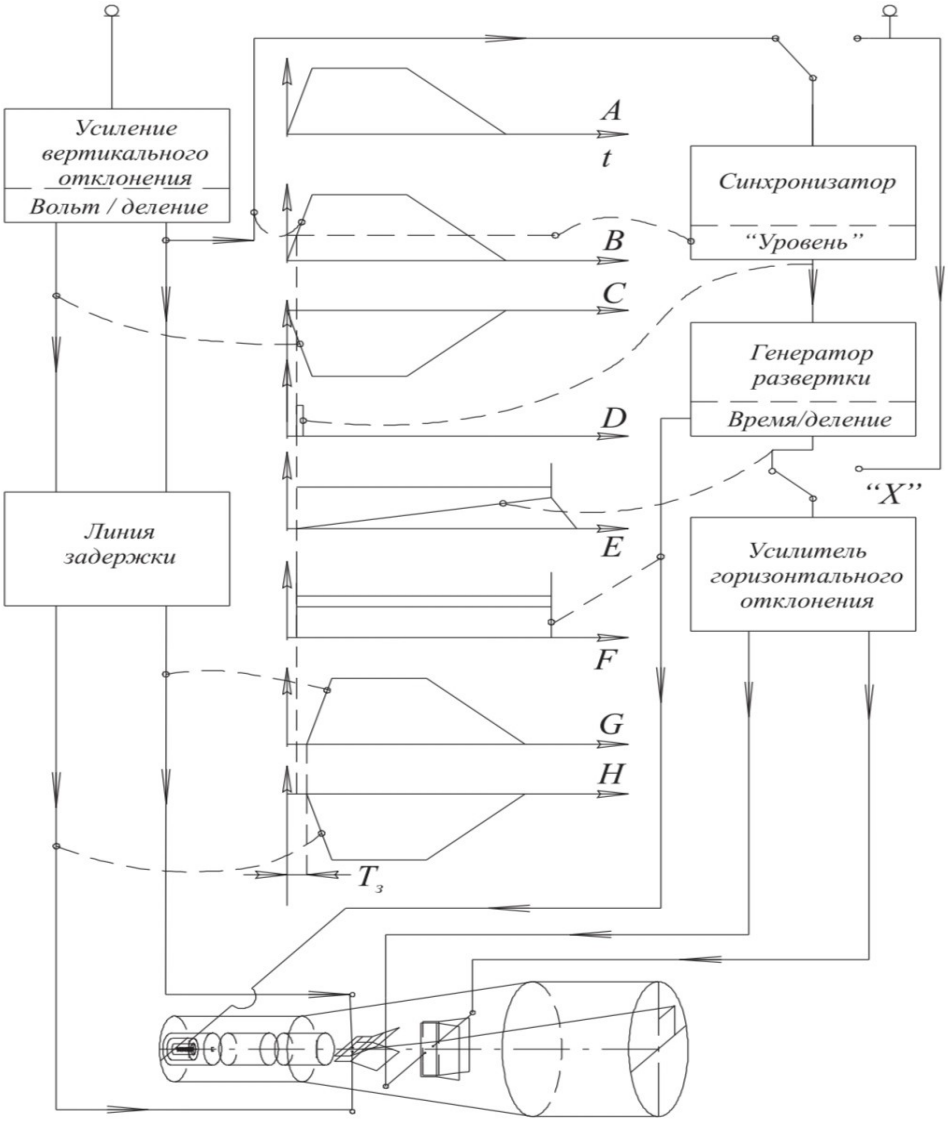


Рис.3. Блок-схема осциллографа [3]

времени люминесценции. Если $U_x = 0$ и $U_y = 0$, то луч попадает в центр люминесцирующего экрана. При непрерывном изменении по времени U_x и U_y на экране формируется осциллограмма – светящаяся траектория (рис.2), которая позволяет визуально наблюдать функциональную зависимость U_y от U_x: $Uy=f$

(U_x). Обычно осциллограмма отражает $U_y(t)$, то есть зависимость U_y от времени t. Для этого в качестве U_x используется растущее линейно во времени напряжение

$$U_x = \alpha \cdot t \,, \tag{1}$$

где α - коэффициент пропорциональности. По такой осциллограмме можно определить полярность, амплитуду и длительность сигнала. Осциллограф имеет проградуированную в вольтах шкалу по вертикали и в секундах по горизонтали. Это обеспечивает возможность одновременного наблюдения и измерения параметров сигнала во времени. Упрощенная блок-схема осциллографа в режиме исследования временной зависимости сигнала приведена на рис. 3. Исследуемый сигнал *А* подаётся на вход усилителя вертикального отклонения, коэффициент усиления которого изменяется переключателем «вольт/деление». В усилителе вертикального отклонения происходит согласование величины отклонения луча с величиной входного сигнала.

Горизонтальное перемещение луча создается генератором развёртки (или генератором пилообразного напряжения), который формирует, для этой цели, пилообразное напряжение *Е*. Генератор пилообразного напряжения формирует (на время прямого хода) импульс подсвета луча *F*, «открывающий» электронно-лучевую пушку. На время обратного хода электронная пушка «закрывается» и свечения экрана не происходит. Пилообразное напряжение, линейно нарастающее по времени по закону (1), поступает на вход усилителя горизонтального отклонения, который обеспечивает на выходе напряжение, пропорциональное входному. Это выходное напряжение (также линейно нарастающее по времени) подается на горизонтально отклоняющие (то есть отклоняющие электронный луч) пластины «*X*». При этом электронный луч перемещается по экрану с постоянной скоростью, создавая, таким образом, линейную **развёртку времени**. Скорость развёртки можно изменять переключателем «время/деление». Для получения стабильного изображения каждая новая развёртка должна начинаться с одной и той же точки исследуемого сигнала. Это обеспечивается подачей исследуемого сигнала *В* с усилителя вертикального отклонения на синхронизатор, который формирует импульс запуска генератора развертки *Д* в момент, соответствующий выбранной точке сигнала. Эта точка, обычно, определяется по достижению сигналом определённой величины при заданном знаке производной сигнала по времени.

Поскольку срабатывание синхронизатора требуют ненулевого времени, то в тракт исследуемого сигнала высокоскоростных осциллографов вводится линия задержки, на которой исследуемый сигнал задерживается на величину

времени задержки $\tau_з$. Используемый в данной работе двухлучевой осциллограф позволяет изучать функциональную связь между двумя электрическими напряжениями, которые характеризуются формой, амплитудой и фазой. В двухлучевом осциллографе установлены две электронно-лучевые пушки, на горизонтально отклоняющие пластины которых подаётся напряжение с одного и того же генератора развёртки, а на вертикально отклоняющие пластины – с двух независимых усилителей вертикального отклонения. Поэтому у двухлучевого осциллографа два входа: *Y*1 и *Y*2. Это даёт возможность измерения, например, разности фаз между двумя напряжениями U_1 и U_2 одинаковой частоты.

2.ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

2.1. Измерения в режиме непрерывной развёртки

Этот режим может быть использован только для наблюдения периодических колебаний с достаточно стабильной частотой. При этих измерениях генератор развёртки (ГР) осциллографа работает в режиме *автоколебаний*, частота которых регулируется. Для получения неподвижной осциллограммы период колебаний напряжения ГР должен быть кратен периоду колебаний исследуемого напряжения. Поскольку, из-за нестабильности периодов ГР и исследуемого сигнала, это условие постоянно нарушается, то для его восстановления применяется схема синхронизации, роль которой в этом режиме сводится к автоматической подстройке частоты колебаний ГР. Измерение промежутков времени осуществляется по измерению расстояния (в делениях) по горизонтальной оси между двумя точками и перевод его (расстояния в делениях) во временной интервал в соответствии с положением переключателя «время/деление».

2.2. Измерение в режиме ждущей развёртки с синхронизацией исследуемым сигналом

Режим ждущей развёртки может быть применён для исследования как периодических, так и непериодических процессов. В этом режиме генератор развёртки начинает формировать пилообразное напряжение только после прихода импульса запуска, который формируется синхронизатором в определённой точке исследуемого сигнала так, как это было описано в разделе 1. Поскольку до прихода импульса запуска напряжение на выходе генератора развёртки не меняется, то в отсутствии входного сигнала развёртка на экране осциллографа не наблюдается. Этот факт может быть использован для проверки

правильности выбора режима: *при отключении входного сигнала развёртка должна исчезать.*

2.3. Измерение в режиме ждущей развёртки с синхронизацией внешним сигналом

Этот режим может быть применен для исследования синхронных периодических и непериодических процессов. В этом случае начало развёртки может быть синхронизировано одним из процессов, а исследоваться другой. Для примера рассмотрим два синхронных напряжения, эпюры которых приведены на рис. 4.

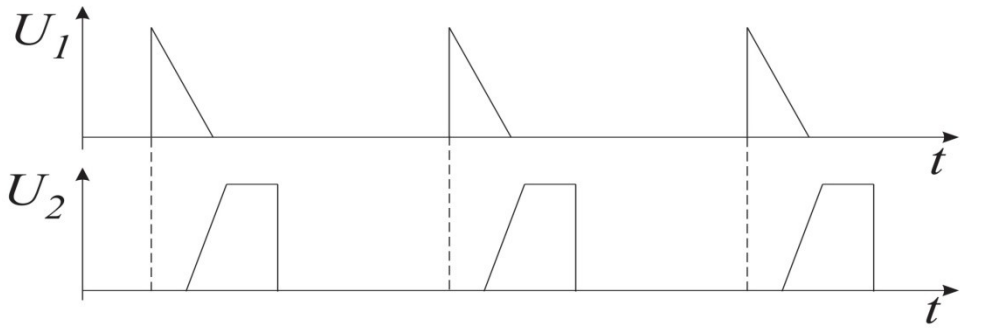


Рис.4. Эпюры двух синхронных напряжений U_2 и U_1 [3]

Как видно из рис.4, напряжение U_2 меняется синхронно с U_1. Поэтому для наблюдения U_2 можно запускать развёртку напряжением U_1, при этом на экране осциллографа будет наблюдаться осциллограмма, приведенная на рис. 5.

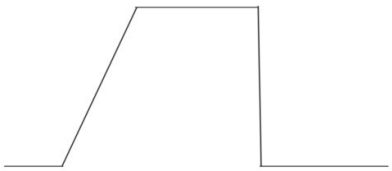


Рис.5. Осциллограмма напряжения U_2 в режиме внешней синхронизации [3]

Практически этот режим осуществляется переключением синхронизатора в режим внешней синхронизации, подачей на вход синхронизации напряжения U_1, а на вход усилителя вертикального отклонения – напряжение U_2. Проверка правильности выбора режима может быть осуществлена отключением синхронизирующего напряжения (U_1) от входа внешней синхронизации, что должно приводить к исключению развёртки.

Режим ждущей развёртки с синхронизацией внешним сигналом может быть использован для измерения временной задержки одного сигнала относительно другого: например, для измерения сдвига фаз двух напряжений.

Для измерения сдвига фаз (между двумя сигналами напряжения) необходимо синхронизировать развёртку внешним сигналом, подать его параллельно на вход вертикального отклонения осциллографа и запомнить положение на экране характерных точек осциллограммы (точка *A* на осциллограмме 1 рис. 6).

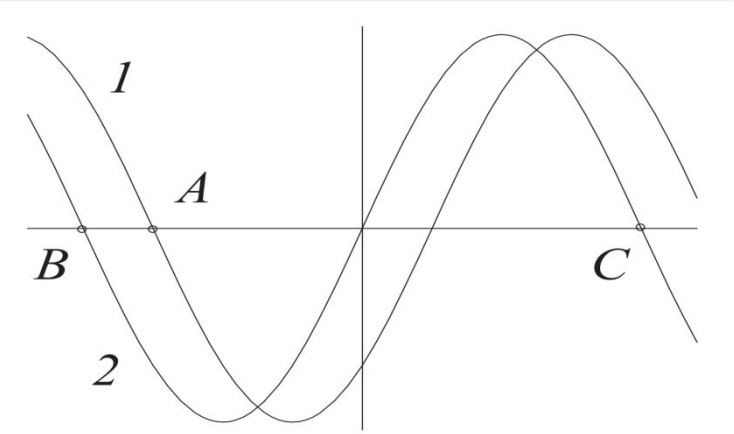


Рис. 6. Осциллограмма двух напряжений при ненулевой разности фаз между ними [3]

После этого, не меняя условий внешней синхронизации, подать на вход вертикального отклонения исследуемый сигнал (осциллограмма 2 на рис. 5). Измерив расстояние между соответствующими точками (*B* и *A* на рис. 5), поделив его на период колебаний (*BC* на рис. 5) и умножив на 2π, получим сдвиг фаз Δφ в радианах (или в градусах, если умножить на 360^0).

Для примера, на рис.6 величина $\Delta\varphi = 2\pi\ BA/BC$ [рад] и $\Delta\varphi = 360^0\ BA/BC$ [град], причём напряжение *2* опережает напряжение *1* на угол Δφ, так как соответствующая ему точка *B* достигается по времени раньше, чем точка *A*.

2.4. Измерение частот и фаз методом фигур Лиссажу

Фигуры Лиссажу получаются при сложении двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний электронного луча. (Примером фигуры Лиссажу из курса механики служит траектория движения материальной точки, координаты которой на взаимно перпендикулярных осях *x* и *y* имеют вид гармонических колебаний: $x(t)= R\cos\omega t$ и $y(t)=R\sin\omega t$. Исключая ωt, находим $x^2+y^2=R^2$. То есть траекторией движения материальной точки является окружность радиуса *R*, а не зависящая явно от времени траектория и есть фигура Лиссажу. При $x(t)= A\cos\omega t$ и $y(t) = B\sin\omega t$ фигурой Лиссажу служит эллипс с полуосями *A* и *B*, а при $x(t)= A\cos\omega t$ и $y(t) = B\cos\omega t$ – прямая $y= (B/A)x$.)

2.4.1. Измерение неизвестной частоты колебаний гармонического напряжения

Гармоническое напряжение, частота которого *ν неизвестна*, подаётся на вход вертикального отклонения «*Y*». А на вход усилителя горизонтального отклонения «*X*» подается опорное гармоническое напряжение, частота которого *известна*. При выполнении условия кратности частоты опорного напряжения частоте исследуемого сигнала на экране осциллографа наблюдается неподвижная осциллограмма, которая для гармонических колебаний представляет собой одну из фигур Лиссажу. На рис. 7 приведены некоторые фигуры Лиссажу для разных отношений частоты колебания опорного напряжения к частоте колебания исследуемого напряжения.

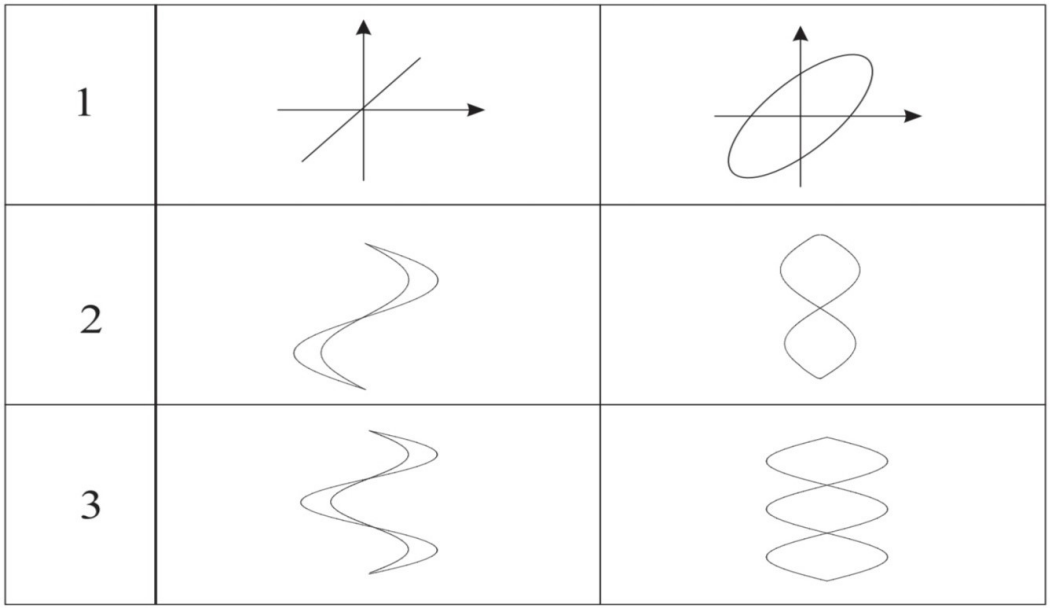


Рис. 7. Фигуры Лиссажу для разных отношений частоты колебания опорного напряжения к частоте колебания исследуемого напряжения [3]

Практически, для измерения частот колебаний плавно изменяют частоту колебаний опорного напряжения до тех пор, пока осциллограмма не станет соответствовать фигуре Лиссажу первого порядка (*N*=1). В этом случае частота исследуемого напряжения равняется частоте опорного напряжения.

При кратном соотношении частот ν_x и ν_y на экране появляется более сложная фигура (*N*>1). В этом случае частота по вертикали ν_y так относится к частоте по горизонтали ν_x, как число точек касаний n_x (фигуры Лиссажу) к касательной по горизонтали относится к числу точек касаний n_y (этой же фигуры Лиссажу) к касательной по вертикали:

$$\frac{\nu_y}{\nu_x} = \frac{n_x}{n_y}. \qquad (2)$$

2.4.2. Измерение сдвига фаз между двумя гармоническими напряжениями одинаковой частоты

Для измерения сдвига фаз φ между двумя напряжениями одной и той же частоты ω на вход вертикального отклонения подается одно из них, а на вход горизонтального отклонения – другое. Поскольку частоты обоих напряжений одинаковы, то на экране будет изображение фигуры Лиссажу первого порядка (рис. 8).

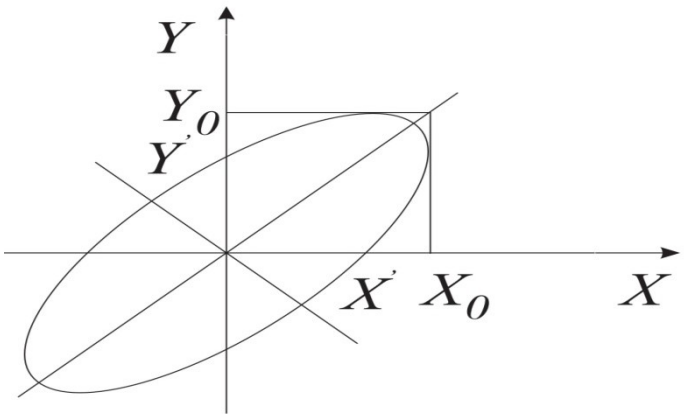


Рис. 8. Фигура Лиссажу первого порядка для двух напряжений одинаковой частоты [3]

Величина сдвига фаз φ определяется по формуле (3) или (4):

$$\frac{X'}{X_0} = \sin\varphi, \text{ где } X' \text{ - отклонение по X при Y=0} \qquad (3)$$

$$\frac{Y'}{Y_0} = \sin\varphi, \text{ где } Y' \text{ - отклонение по Y при X=0 ,} \qquad (4)$$

где X', X_0, Y', Y_0 определяются по рис.8. Формулы (3) и (4) получены в Приложении.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Упражнение 1. Изучите назначение органов управления осциллографа и процедуры выбора режимов измерения по руководству по эксплуатации.

Упражнение 2. Исследуйте форму периодического напряжения в точках «А», «В» и «Н» сменной платы. Определите периоды, частоты и амплитуды этих напряжений в режиме непрерывной развёртки. Зарисуйте осциллограммы (*на миллиметровой бумаге*), указав масштабы по осям.

Упражнение 3. Исследуйте форму напряжения в точке «С» в режиме развёртки с синхронизацией исследуемым сигналом: определите амплитуду

и длительность импульсов. Выясните роль регулировки «Уровень синхронизации» и переключателя «Синхронизация +» и «Синхронизация –». Зарисуйте осциллограммы при разных положениях этого переключателя и регулировки «Уровень синхронизации». Объясните, чем отличаются эти осциллограммы и почему.

Упражнение 4. Изучите руководство по эксплуатации звукового генератора.

Упражнение 5. (По заданию преподавателя выполните одно из упражнений – 5.1 или 5.2).

5.1. Подайте напряжение от звукового генератора частотой 5 кГц между точками «E» и ⏚ сменной платы. Измерьте сдвиг фаз между напряжением в точках «F» и «G» в режиме ждущей развёртки с синхронизацией внешним сигналом, как описано в пункте 2.3. Зарисуйте полученные осциллограммы.

5.2. Подайте на вход «E» сменной платы напряжение от звукового генератора. Напряжение с точки «F» подайте на вход «X» осциллографа, переведённого в режим развёртки от внешнего источника. Подайте на вход «Y» осциллографа напряжение с точки «G» сменной платы. Измерьте сдвиг фаз между напряжением в точках «F» и «G» как описано в пункте 2.4.2 и зарисуйте полученную фигуру Лиссажу.

Упражнение 6.

6.1. В режиме развёртки от внешнего источника подайте на вход «*Y*» напряжение с точки «H», а на вход усилителя горизонтального отклонения (вход «*X*») опорное напряжение от звукового генератора частотой ν = 12,5Гц. Зарисуйте полученную фигуру Лиссажу на миллиметровой бумаге и определите согласно формуле (2) неизвестную частоту переменного напряжения в точке «H».

6.2. Повторите п.6.1 при частотах ν 25 Гц, 100 Гц и 150Гц на входе «*X*». По фигурам Лиссажу определите частоту переменного напряжения в точке «H» для каждой частоты ν.

6.3. Найдите среднеквадратичную ошибку среднего значения частоты переменного напряжения в точке «H».

Запишите выводы по результатам выполненной лабораторной работы.

Вопросы для получения допуска к лабораторной работе:

1. Основное назначение электронно-лучевого осциллографа. Устройство ЭЛТ осциллографа. Роль электронно-лучевой пушки в работе ЭЛТ. Объясните необходимость высокого вакуума внутри баллона ЭЛТ.

2. Объясните процессы: а) горизонтальной развёртки электронного луча на люминесцирующем экране при отсутствии сигнала на пластинах «*Y*»; б) вертикальной развёртки синусоидального напряжения $Uy(t)=U_0 sin\omega t$ при отсутствии сигнала на пластинах «*X*».

3. Объясните процесс визуализации синусоидального напряжения $Uy(t)=U_0 sin\omega t$ при включенном генераторе пилообразного напряжения.

4. Что такое фигура Лиссажу? О чём говорит порядок фигуры Лиссажу?

5. Представьте план выполнения упражнений 2, 3, 5 и 6.

Вопросы к зачёту по лабораторной работе:

1. Объясните назначение основных частей ЭЛТ осциллографа и принцип их работы. Электрон, вылетевший из электронной пушки и попавший на люминофор (например, в центр экрана ЭЛТ) должен отталкивать последующий электрон, тем самым препятствовать визуализации следа электронного луча. Почему такое явление не происходит?

2. Какие переключатели осциллографа и для чего они были применены в ходе выполнения лабораторной работы? Для измерения угла разности фаз, казалось бы, необходим переключатель «угол/деление». Почему осциллограф не имеет такого переключателя?

3. На экране осциллографа наблюдается фигура Лиссажу в виде окружности, чему равен угол сдвига фаз между двумя синусоидальными напряжениями $U_x(t)$ и $U_y(t)$, поданными на соответствующие входы осциллографа? Что можно сказать о частоте этих напряжений?

4. На экране осциллографа наблюдается фигура Лиссажу, уравнение которой имеет вид $y=x$. Запишите временные зависимости напряжений $U_x(t)$ и $U_y(t)$, поданных на входы осциллографа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парселл, Э. Берклеевский курс физики. В 5 т. Т. 2. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. – Москва : Наука, 1975. – 448 с.

2. Савельев, И. В., Курс физики. В 3 т. Т. 2. Электричество / И. В. Савельев. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 468 с.

3. Новожилов, В. П. Руководство к лабораторным работам по электричеству, часть 1 / В. П. Новожилов, С. Н. Костенков, Д. В. Сурнин, А. Н. Деев. – Ижевск : Ижевский полиграфический комбинат, 1991. – 180 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Вывод формул (3) и (4)

Проанализируем форму фигуры Лиссажу первого порядка по рис.8. Зависимости отклонений от времени t по координатам X и Y имеют вид:

$$X(t) = K_x U_{ox} \cos\omega t$$

$$Y(t) = K_y U_{oy} \cos(\omega t+\varphi) \ , \qquad (1П)$$

где K_x и K_y – коэффициенты пропорциональности между напряжениями, поданными на входы X и Y, и отклонениями луча в этих направлениях, U_{ox}, U_{oy} – амплитуды гармонических колебаний. Введя обозначения амплитуд $X_o=K_xU_{ox}$ и $Y_o=K_y U_{oy}$, получим:

$$X(t) = X_o\cos\omega t$$

$$Y(t) = Y_o \cos(\omega t+\varphi)$$

или

$$X/X_0= \cos\omega t$$

$$Y/Y_0=\cos(\omega t+\varphi). \qquad (2П)$$

Подставив, $\cos\omega t=X/X_0$ и $\sin\omega t=\sqrt{1-\frac{X^2}{X_0^2}}$ в

$$\cos(\omega t+\varphi) = \cos\omega t \cos\varphi - \sin\omega t \sin\varphi = Y/Y_0 \qquad (3П)$$

запишем

$$\frac{X}{X_0}\cos\varphi - \frac{Y}{Y_0} = \sin\varphi\sqrt{1-\frac{X^2}{X_0^2}} \ . \qquad (4П)$$

Возведём обе части (4П) в квадрат:

$$\frac{X^2}{X_0^2}\cos^2\varphi - 2\frac{XY\cos\varphi}{X_0 Y_0} + \frac{Y^2}{Y_0^2} = \left(1 - \frac{X^2}{X_0^2}\right)\sin^2\varphi$$

и выполнив преобразования с учётом того, что $\sin^2\varphi + \cos^2\varphi = 1$ получаем:

$$\frac{X^2}{X_0^2} + \frac{Y^2}{Y_0^2} - \frac{2X \cdot Y \cdot \cos\varphi}{Y_0 \cdot X_0} = \sin^2\varphi \ . \qquad (5П)$$

Пусть в формуле (5П) величина Y=0, а $X \neq 0$, тогда получим формулу (3) п. 2.4.2:

$$\frac{X'}{X_0} = \sin\varphi, \text{ где } X' \text{ - отклонение по } X \text{ при } Y=0. \qquad (6П)$$

Формула (4) п. 2.4.2 получается аналогично, то есть при X=0 и $Y \neq 0$ в формуле (5П):

$$\frac{Y'}{Y_0} = \sin\varphi, \text{ где } Y' \text{ - отклонение по } Y \text{ при } X=0. \qquad (7П)$$

Величины X', X_0, Y', Y_0 показаны на рис. 8.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА С ПОМОЩЬЮ ВАКУУМНОГО ДИОДА

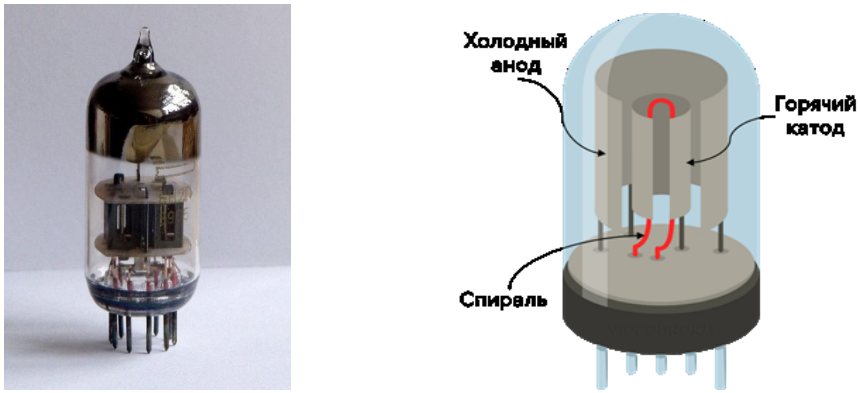
Цель работы: Изучить физические процессы в вакуумном диоде и получить его вольтамперную характеристику. Измерить величину удельного заряда электрона.

Приборы и материалы: вольтметр, сменная плата, универсальный лабораторный стенд, электронная лампа.

1. ТЕОРИЯ

1.1. Общие сведения

Вакуумный диод – это электронная лампа, представляющая собой баллон, внутри которого электрические явления происходят в высоком вакууме – в среде с высокой степенью разряжения остаточных газов. Электронные лампы, имеющие два электрода – *катод* и *анод*, называются *диодами*.



а) *б*)

Рис. 1. Вакуумный диод в стеклянном баллоне: *а*) – внешний вид; *б*) – устройство

Катод и анод размещены внутри стеклянного (рис.1), керамического или металлического баллона. Работа вакуумного диода основана на явлении *термоэлектронной эмиссии* – процессе выхода электронов из твёрдых тел в вакуум или газ, обусловленный нагревом тела. Например, вольфрамовый катод начинает испускать электроны при температуре около 1400°С, оксидный катод – при температуре около 350°С.

Катод служит для эмиссии электронов. Он изготовлен из материала, имеющего большое число (порядка числа Авогадро) свободных электронов. При нагревании катода спиралью электроны покидают его поверхность, то есть эмитируют за счёт термоэлектронной эмиссии. При этом поверхность горячего катода заряжается положительно, поэтому эмитированные электроны

будут притягиваться положительно заряженной поверхностью катода. В результате в некоторой ограниченной по объёму области вокруг катода образуется облако электронов. Электроны с малыми скоростями из облака падают обратно на катод. При постоянной температуре катода $T_к$ облако стабилизируется: на катод падает столько же электронов (с малыми скоростями), сколько из него эмитирует. Электроны, ушедшие с катода безвозвратно, образуют отрицательный заряд, называемый *объёмным* или пространственным, препятствующий движению электронов к аноду. *Анод* служит для притяжения и улавливания электронов эмиссии, то есть для создания, направленного к нему потока электронов. При подаче на анод отрицательного относительно катода потенциала все эмитированные электроны возвращаются на катод. Электроны притягиваются к аноду, если он имеет положительный, относительно катода, потенциал φ_a. Разность потенциалов между анодом и катодом φ_a-$\varphi_к$ называют *анодным напряжением* и обозначают U_a. Положительное анодное напряжение U_a создает ускоряющее электрическое поле **E**, направленное от анода к катоду, поскольку вектор напряжённости направлен от положительных зарядов [1,2]. Под действием поля **E**, электроны, имеющие отрицательный заряд $q_e = -1{,}6 \cdot 10^{-19} к$, движутся от катода к аноду, так как сила $\mathbf{F}=q_e\mathbf{E}$, действующая на отрицательный заряд, будет направлена к аноду, то есть противоположно вектору **E.** Поток электронов есть электрический ток *I*, направленный вдоль вектора напряжённости поля **E**, то есть от положительного анода к отрицательному катоду.

При отрицательном напряжении U_a электрическое поле **E** направлено от катода к аноду, а сила **F**, действующая на отрицательный заряд, будет попрежнему направлена противоположно вектору **E**, то есть к катоду. Тогда поток электронов от катода к аноду, то есть ток *I* равен нулю. Поэтому при

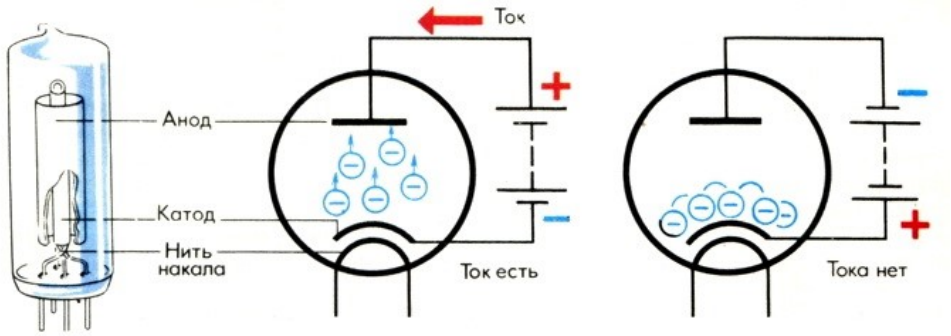


Рис. 2. Электроны от катода (с косвенным накалом) двигаются к аноду при положительном анодном напряжении, а при отрицательном – остаются около катода.

положительном напряжении U_a через диод течёт электрический ток, а при отрицательном U_a ток через диод не проходит (рис.2). Это свойство диода используется в выпрямителях переменного тока и для детектирования сигналов высокой частоты. Однако при недостаточном положительном потенциале анода не все электроны могут преодолеть действие объёмного заряда, и часть их возвращается на катод. Чем выше потенциал анода, тем больше электронов преодолевает объёмный заряд и уходит к аноду. Поток электронов, движущихся внутри лампы от катода к аноду и попадающих на анод, называют *анодным током.* Электроны этого тока движутся внутри лампы от катода к аноду, а вне лампы – от анода к плюсу источника тока, затем внутри него и от минуса источника к катоду лампы. Если потенциал анода отрицателен относительно катода, то поле между анодом и катодом тормозит электроны, вылетающие из катода, и возвращает их на катод. В этом случае анодный ток равен нулю. Анодный ток существует при выполнении двух условий: при температуре накала катода $T_к$, достаточной для электронной эмиссии, и при положительном потенциале анода относительно катода.

1.2. Физические процессы в вакуумном диоде

Рассмотрим плоский диод, анодное напряжение которого создает между анодом и катодом электрическое поле **E**. Горячий катод испускает большое число электронов, создающих в пространстве «анод-катод» отрицательный объёмный заряд, который препятствует движению электронов к аноду. Наиболее плотный объёмный заряд находится вблизи катода. С увеличением расстояния от катода плотность объёмного заряда уменьшается. Поэтому электрическое поле **E** между анодом и катодом является *неоднородным.* В зависимости от характера этого поля возможны два режима работы диода – *режим объёмного заряда* и *режим насыщения*. 1) **Режим объёмного заряда** или точнее *режим ограничения анодного тока объёмным зарядом* является основным режимом для работы диода. В этом случае напряженность поля вблизи катода должна быть равна нулю. Действительно, если считать, что электроны, покидающие катод, имеют практически нулевую скорость, то, если напряженность поля вблизи катода направлена к аноду, ни один из электронов не покинет катода, и ток окажется равным нулю. Если напряжённость поля направлена к катоду, то все электроны, которые эмитировал катод, будут его покидать, и ток будет постоянным, не зависящим от напряжения, что противоречит наблюдаемым фактам. Остается одна возможность: нулевая напряженность поля на катоде. В этих условиях изменение потенциала внутри лампы и ток определяются объёмным зарядом. Зависимость тока I, проходящего через электрическое устройство (резистор, диод и т.п.), от приложенного к нему напряжения

U называется *вольтамперной характеристикой* (ВАХ) этого устройства. ВАХ вакуумного диода ─ зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a при постоянном токе через спираль накала, при котором температура катода $T_к$ постоянна, показана на рис.3.

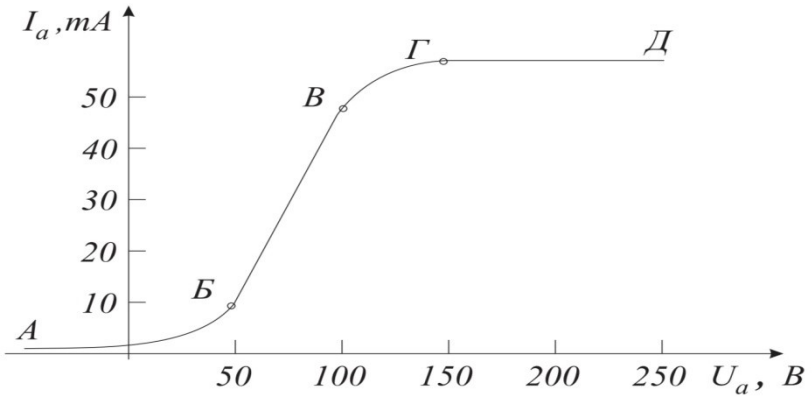


Рис. 3. Вольтамперная характеристика (ВАХ) вакуумного диода [3]

Участок ВАХ, где U_a <0 – следствие ненулевых начальных скоростей и тепловой диффузии электронов. При U_a = 0, малый ток, текущий «сам по себе» – это ток быстрых электронов, способных преодолеть пространственный заряд. Абсолютное большинство испущенных электронов возвращается назад, на катод, но относительно быстрые электроны преодолевают пространственный заряд и доходят до анода. Энергия, необходимая для этого движения электронов, заимствуется не от источника анодного напряжения, а от источника тока накала. С увеличением тока через спираль накала точка *А* сдвигается влево, так как начальная скорость электрона увеличивается. Средний участок *БВ* приближённо считается *линейным* участком ВАХ. Верхний участок *ВГ* на рис.3 соответствует плавному переходу от режима *объёмного* заряда к режиму *насыщения*.

2) **Режим насыщения** возникает после точки *Г*, когда все *N* электронов, покинувших катод за время Δt, будут достигать анода. В этом режиме ни один электрон не возвращается на катод, то есть объёмный заряд исчезает. При этом поле **E** на всем протяжении от катода до анода возрастает и ускоряет любой электрон, вылетевший из катода. Число эмитированных в единицу времени электронов $N/\Delta t$ определяется температурой катода $T_к$, поэтому $N/\Delta t$ будет постоянной величиной при $T_к$ = const. Тогда и анодный ток $I_a = q_e N/\Delta t$ (достигнув своего максимального значения, ограниченного лишь скоростью эмиссии электронов с катода) становится постоянным, не зависящим от увеличения U_a (увеличение U_a не приводит к возрастанию I_a). Таким образом, постоянство I_a (участок *ГД* на рис. 3) соответствует *режиму насыщения*. В первом приближении насыщение тока можно считать абсолютным: ток насыщения идеального

диода не зависит от напряжения на аноде. В реальных приборах в режиме насыщения ток анода медленно растёт с ростом анодного напряжения. Это явление связано с эффектом Шоттки: рост напряжённости поля **E** приводит к росту тока эмиссии, так как работа выхода электрона из катода уменьшается. В оксидных катодах, пористая поверхность которых образована спеканием гранул оксидов бария, стронция и кальция, прирост эмиссионного тока особенно велик из-за неоднородностей пористой поверхности. Можно говорить, что оксидные катоды практически не насыщаются.

1.3. Вывод формулы удельного заряда электрона

Рассмотрим диод как конденсатор (рис.4), ёмкость которого определяется как

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d}, \qquad (1)$$

где ε_0=8,85·10^{-12} Ф/м – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, S и d – площадь пластин и расстояние между пластинами конденсатора соответственно.

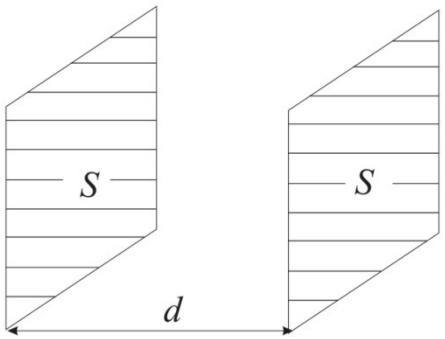


Рис. 4. Диод с плоскопараллельными электродами [3]

Если катод нагрет до определенной температуры, то эмитированные им электроны устремляются к аноду, создавая ток:

$$I = \frac{q^*}{t}, \qquad (2)$$

где q*– заряд, прошедший между анодом и катодом за время t – время пролета электрона от катода к аноду, так как за время t все электроны, находящиеся между катодом и анодом, попадут на анод. Из теории тока, ограниченного объёмным зарядом, следует, что заряд q* удовлетворяет неравенству $q<q^*<2q$, где q – заряд на обкладках конденсатора в отсутствии эмиссии. По определению, заряд, находящийся на обкладках плоского конденсатора, равен:

$$q = C \cdot U \tag{3}$$

или

$$q = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d} \cdot U \,. \tag{4}$$

С учётом выражения (4) формула (2) преобразуется к виду

$$I = \frac{\varepsilon_0 \cdot S \cdot U}{d \cdot t}. \tag{5}$$

Умножив числитель и знаменатель (5) на *d*, получим:

$$I = \frac{\varepsilon_0 \cdot S \cdot U}{d^2} \cdot \frac{d}{t}, \tag{6}$$

где $\frac{d}{t}$ — средняя скорость движения электронов (V_{cp}).

Если считать движение электронов равноускоренным и пренебречь их начальной скоростью, то можно записать:

$$V_{cp} = \frac{1}{2} V \,, \tag{7}$$

где V – конечная скорость электрона, достигшего анода. Из закона сохранения энергии найдем скорость V:

$$\frac{m_e \cdot V^2}{2} = e \cdot U \,, \tag{8}$$

$$V = \sqrt{\frac{2e \cdot U}{m_e}} \tag{9}$$

и подставив её (скорость V) в формулу (6) с учётом условия (7), получим *приближённую* зависимость между током и напряжением:

$$I = \frac{\sqrt{2}\varepsilon_0 \cdot S}{2d^2} \cdot \sqrt{\frac{e}{m_e}} \cdot U^{\frac{3}{2}}. \tag{10}$$

Точное выражение для тока носит название уравнения ***Богуславского-Ленгмюра*** (или *закон* $\frac{3}{2}$) и имеет вид

$$I = \frac{4\sqrt{2} \cdot \varepsilon_0 S}{9d^2} \cdot \sqrt{\frac{e}{m_e}} \cdot U^{\frac{3}{2}} \quad , \tag{11}$$

из которого получаем величину удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{81 \cdot I^2 \cdot d^4}{32 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot S^2 \cdot U^3} \quad . \tag{12}$$

Зная площадь электродов S, расстояние между ними d, силу тока I и напряжение U, удельный заряд электрона можно найти по формуле (12).

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

2.1. Описание схемы эксперимента

В лабораторной работе для определения удельного заряда электрона с помощью вакуумного диода используется универсальный лабораторный стенд, который является источником стабилизированного напряжения и обеспечивает выход постоянного напряжения «+15В» и «+5В» при токе до 300мА, а также является источником переменного напряжения «6,3В» для косвенного нагрева катода. Электрическая схема, необходимая для выполнения эксперимента, смонтирована на специальной плате.

2.2. Описание сменной платы

Для определения удельного заряда электрона с помощью вакуумного диода используется сменная плата, на которой смонтированы электрические элементы исследуемой цепи.

Принципиальная электрическая схема сменной платы приведена на рис. 5.

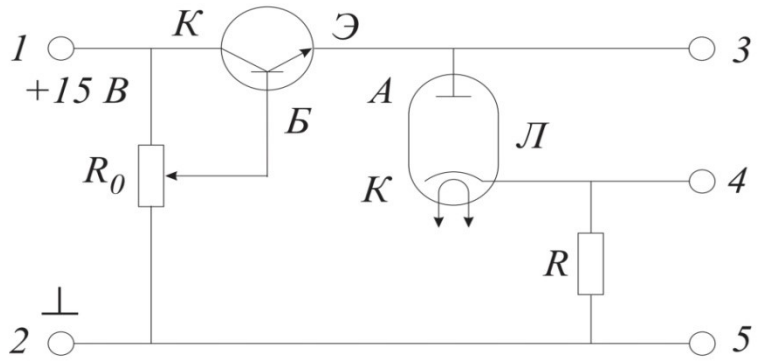


Рис. 5. Электрическая схема для определения удельного заряда электрона [3]

Внешний вид платы с расположением на ней электрических элементов схемы приведён на рис. 6.

На плате расположен вакуумный диод (радиолампа Л), параметры которого d – расстояние между электродами и S – площадь электродов известны: d =(0,60±0,05)*мм*; S = (1,45±0,22)·10^{-4} *м*^{2}. На сменной плате смонтированы из-

мерительное сопротивление R и потенциометр $R0$, с помощью которого регулируется величина анодного напряжения на схеме. Анодное напряжение снимается с эмиттера транзистора Т, установленного на сменной плате. Изменяя положение движка потенциометра, можно изменять напряжение на аноде лампы. На сменной плате имеются гнёзда 3, 4 и 5, облегчающие монтаж нужных схем измерения.

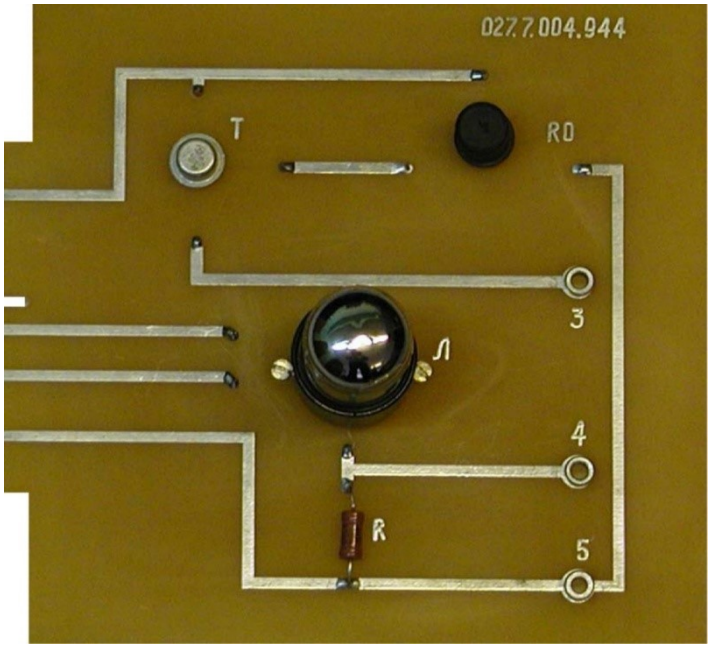


Рис.6. Внешний вид сменной платы для определения удельного заряда электрона [3]

3. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Определение удельного заряда электрона при помощи вакуумного диода осуществляется при использовании электрической схемы, приведённой на рис. 5. Для измерений необходимо установить сменную плату в универсальный лабораторный стенд и при помощи соединительных проводов и гнёзд 3, 4 и 5 подсоединить вольтметр. Включив приборы в сеть, дать им прогреться несколько минут. Измерение напряжения между анодом и катодом U, входящее в формулу (12), выполняется с помощью вольтметра. Для этого следует измерить напряжение U_{35} между точками «3» и «5» и напряжение U_{45} между точками «4» и «5».

Анодный ток в цепи лампы I_A (в формуле (12) обозначен как I) определяется по падению напряжения на измерительном сопротивлении R. Величина сопротивления указана на сменной плате, а напряжение на нём измеряется вольтметром. Напряжение между анодом и катодом U вычисляется как разность между U_{35} и напряжением на измерительном сопротивлении U_{45}. Изме-

рение сопротивления R выполняется омметром. Для измерения R необходимо отключить питание стенда и при помощи соединительных проводов подключить омметр к точкам «4» и «5». Измерение напряжения на R осуществляется при подключении вольтметра к этим же точкам.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Упражнение 1. Снять зависимость анодного тока диода I_A от напряжения между анодом и катодом U. Зависимость $I_A(U)$ представить графически и сравнить с теоретической зависимостью. Построить график зависимости квадрата анодного тока от куба напряжения между анодом и катодом диода.

Упражнение 2. Измерить величину удельного заряда электрона $\frac{e}{m}$ при помощи формулы (12) для не менее восьми пар измеренных значений I_A и U и определить ошибку измерения. Сравнить полученную экспериментальную величину удельного заряда электрона с известным табличным значением.

Запишите выводы по результатам выполненной лабораторной работы.

Вопросы для получения допуска к лабораторной работе:

1. Что называют удельным зарядом электрона и чему равно его табличное значение? Что такое вакуумный диод? Почему электрические явления в нём должны происходить при высокой степени разряжения остаточных газов?

2. Дайте определение явлению термоэлектронной эмиссии?

3. Что такое ВАХ вакуумного диода? Объясните возможные режимы работы диода. Что означают выражения «режим объёмного заряда» и «режим насыщения»?

4. В каком режиме работы диода следует измерять удельный заряд электрона, представьте план его измерения.

Вопросы к зачёту по лабораторной работе:

1. Объясните полученные зависимости: 1) анодного тока I_A от анодного напряжения U и 2) квадрата I_A от куба U.

2. Чему равно относительное отклонение измеренного среднего значения удельного заряда электрона от табличного значения. Попадает ли оно (табличное значение e/m) в интервал ошибки измеренного среднего значения?

ЛИТЕРАТУРА

1. Парселл, Э. Берклеевский курс физики. В 5 т. Т. 2. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. – Москва : Наука, 1975. – 448 с.

2. Савельев, И. В., Курс физики. В 3 т. Т. 2. Электричество/ И. В. Савельев. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 468 с.

3. Новожилов, В. П. Руководство к лабораторным работам по электричеству, часть 1 / В. П. Новожилов, С. Н. Костенков, Д. В. Сурнин, А. Н. Деев. – Ижевск : Ижевский полиграфический комбинат, 1991. – 180 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Цель работы: изучить режимы затухания электромагнитных колебаний в колебательном контуре.

Приборы и материалы: электронный осциллограф, омметр, универсальный лабораторный стенд, сменная плата.

1. ТЕОРИЯ

1.1. Колебательный контур

Замкнутый контур, содержащий последовательно соединенные катушку индуктивности L, конденсатор C и активное сопротивление R, называют ***колебательным контуром*** (рис. 1).

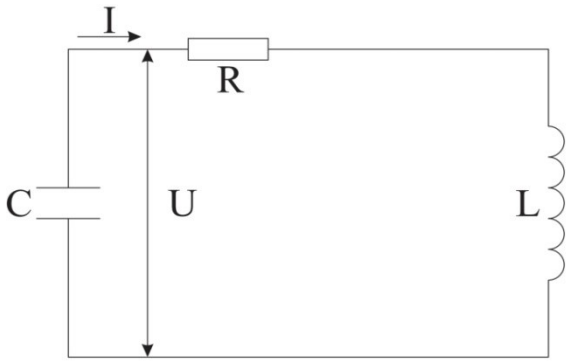
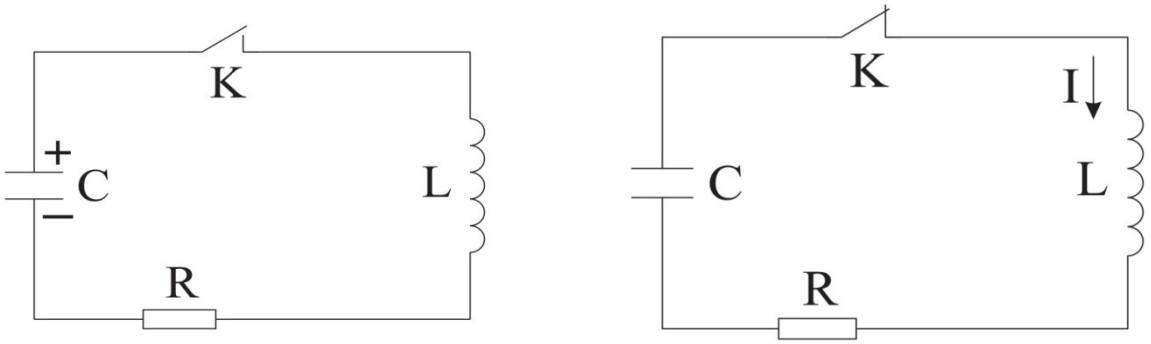


Рис. 1. Колебательный контур; L – катушка, C – конденсатор, R – активное сопротивление, U – напряжение на конденсаторе [3]

Колебания в колебательном контуре возникают следующим образом. Пусть верхняя обкладка конденсатора заряжена положительно, а нижняя – отрицательно (рис. 2а), а тока в контуре нет. При этом вся энергия колебательного контура сосредоточена в конденсаторе.



а) *б*)

Рис. 2. Конденсатор в колебательном контуре; *а)* – ключ K разомкнут; *б*) – ток I в колебательном контуре при замкнутом ключе K [3]

Замкнём ключ K (рис. 2б), конденсатор начнет разряжаться, и через катушку L потечёт ток I. Энергия электрического поля конденсатора $CU^2/2$ начнет превращаться в энергию магнитного поля катушки $LI^2/2$. Этот процесс закончится, когда конденсатор полностью разрядится, а ток в цепи достигнет максимума. С этого момента ток, не меняя направления, начинает убывать. Однако он прекращается не сразу – его будет поддерживать ЭДС самоиндукции. Ток будет перезаряжать конденсатор. При этом возникнет электрическое поле, стремящееся ослабить ток. Когда заряд на конденсаторе достигнет максимума, ток прекратится. С этого момента конденсатор вновь начнёт разряжаться, ток потечёт в обратном направлении и т. д. – процесс будет повторяться. В контуре при отсутствии сопротивления проводников совершались бы строго периодические незатухающие колебания. Такие колебания сопровождаются взаимными превращениями энергии электрического поля в энергию магнитного поля. Если же сопротивление проводников $R \neq 0$, то помимо описанного процесса будет происходить преобразование электромагнитной энергии в теплоту согласно закону Джоуля-Ленца. Сопротивление проводников цепи R (включая сопротивление подводящих проводов) принято называть *активным* сопротивлением.

1.2. Дифференциальное уравнение колебательного контура

Пусть в момент времени t заряд на конденсаторе C равен q, а разность потенциалов между пластинами или напряжение $U_C=U$. Будем считать U положительным, когда верхняя пластина заряжена положительно и укажем направление тока I согласно рис. 2б. Тогда ток и заряд запишутся согласно определению тока и электроёмкости конденсатора

$$I = -\frac{dq}{dt}, q = CU\ . \tag{1}$$

Напряжение на конденсаторе равно сумме напряжений на сопротивлении R и на индуктивности L, то есть $U = U_R+U_L$, при этом напряжение на индуктивности $U_L = L\dfrac{dI}{dt}$, тогда

$$U = IR + L\frac{dI}{dt}\ . \tag{2}$$

Здесь и ниже изложение построено на основе [1, 2]. Исключим из q, I и U две переменные. Для этого используем (1) в виде

$$I = -C\frac{dU}{dt}, \tag{3}$$

тогда (2) запишется как

$$U = -RC\frac{dU}{dt} - LC\frac{d^2U}{dt^2} \text{ или } LC\frac{d^2U}{dt^2} + RC\frac{dU}{dt} + U = 0. \quad (4)$$

Сократим второе уравнение в (4) на LC и получим дифференциальное уравнение 2-го порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2U}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dU}{dt} + \frac{1}{LC}U = 0. \quad (5)$$

В качестве решения этого уравнения возьмём функцию:

$$U(t) = Ae^{-\alpha t}\cos\omega t, \quad (6)$$

где A, α и ω – постоянные.

Найдем первую производную $\frac{dU}{dt}$:

$$\frac{dU}{dt} = -Ae^{-\alpha t}(\alpha\cos\omega t + \omega\sin\omega t), \quad (7)$$

а затем вторую производную $\frac{d^2U}{dt^2}$:

$$\frac{d^2U}{dt^2} = Ae^{-\alpha t}\left[(\alpha^2 - \omega^2)\cos\omega t + 2\omega\alpha\sin\omega t\right] \quad (8)$$

и подставив (6), (7) и (8) в (5), получим

$$(\alpha^2 - \omega^2 - \frac{R}{L}\alpha + \frac{1}{LC})\cos\omega t + (2\omega\alpha - \frac{R}{L}\omega)\sin\omega t = 0. \quad (9)$$

Функции, зависящие от времени sinωt и cosωt, не могут быть нулями одновременно (ни при каком t), поэтому для выполнения (9) должны быть нулями коэффициенты перед sinωt и cosωt:

$$\alpha^2 - \omega^2 - \frac{R}{L}\alpha + \frac{1}{LC} = 0 \quad (10)$$

и

$$2\omega\alpha - \frac{R}{L}\omega = 0. \quad (11)$$

Из (11) найдём коэффициент затухания α:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \tag{12}$$

и подставив в (10) найдём ω^2:

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} \quad . \tag{13}$$

Так как $\omega^2 > 0$, то из (13) следует, что

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad . \tag{14}$$

Величину $2\sqrt{\frac{L}{C}}$ называют критическим сопротивлением:

$$R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \, . \tag{15}$$

Функция (6) является частным решением дифференциального уравнения (5). Возможно и такое частное решение:

$$U(t) = Be^{-\alpha t} \sin \omega t \tag{16}$$

Согласно теории дифференциальных уравнений, общее решение есть сумма частных решений:

$$U(t) = Ae^{-\alpha t} \cos \omega t + Be^{-\alpha t} \sin \omega t = e^{-\alpha t}(A \cos \omega t + B \sin \omega t), \tag{17}$$

где A и B находятся из начальных условий. Например, A равно значению напряжения на конденсаторе при $t = 0$: $A = U(t=0)$.

1.2.1 Свободные незатухающие колебания

Если в контуре активное сопротивление $R=0$, то колебания в таком контуре являются свободными незатухающими. Их уравнение есть частный случай уравнения (6), когда $R=0$:

$$\frac{d^2U}{dt^2} = -\frac{1}{LC}U \quad . \tag{18}$$

Здесь мы видим, что $U(t)$ – функция от времени после двукратного дифференцирования выражается через $U(t)$ со знаком минус. Поэтому решением этого уравнения является гармоническая функция:

$$U(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \alpha)\,, \tag{19}$$

где U_0 – амплитуда напряжения на конденсаторе, α – начальная фаза, ω_0 – собственная частота контура (или резонансная частота [1]) определяется из формулы (13) при R=0:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}\,. \tag{20}$$

График функции (19) показан на рисунке 3.

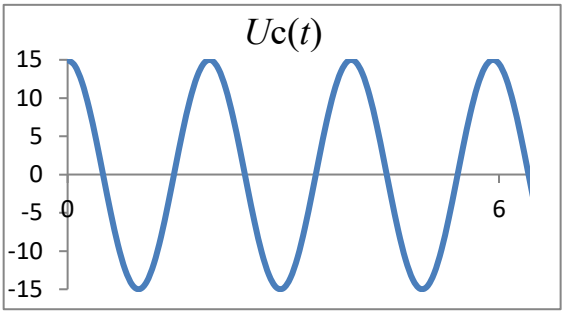


Рис. 3. График незатухающих колебаний в колебательном контуре

1.3. Режимы затухания в колебательном контуре

При R >0, согласно закону Джоуля-Ленца, на сопротивлении R за время Δt будет необратимо выделяться теплота $Q=(U^2/R)\Delta t$, поэтому колебания будут затухать. В зависимости от величины сопротивления R в сравнении с $R_{кр}$ по (15) возможны три режима затухания при:

1) $R < R_{кр}$; 2) $R > R_{кр}$; 3) $R = R_{кр}$.

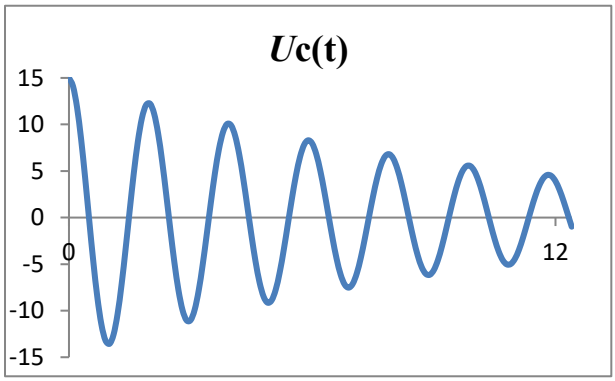


Рис. 4. График затухающих колебаний в колебательном контуре

1) $R < R_{кр}$. Напряжение на конденсаторе будем определять по формуле (6) $U(t) = Ae^{-\alpha t}\cos\omega t$, график этой функции показан на рис.4

2) $R > R_{кр}$, тогда $\omega^2 < 0$, то есть частота будет мнимой, в этом случае решение уравнения (5) будет иметь вид

$U(t) = Ae^{-\beta t}$ и для двух значений β_1 и β_2 общее решение есть

$$U(t) = Ae^{-\beta_1 t} + Be^{-\beta_2 t}, \text{ где } \beta_1 = \alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \qquad \beta_2 = \alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}. \quad (21)$$

Таким образом, колебаний нет, есть только монотонное затухание (рис. 5)

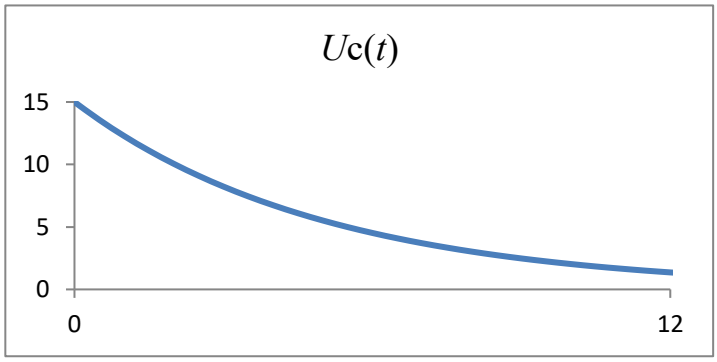


Рис. 5. Режим монотонного затухания в колебательном контуре

3) $R = R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$. Этот случай соответствует «критическому» затуханию без колебаний. Поскольку $\omega^2 = \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} = 0$, то колебаний нет и $\beta_1 = \beta_2 = \beta$. Поэтому общее решение (17) будет иметь вид:

$$U(t) = (A + B)e^{-\beta t} \quad (22)$$

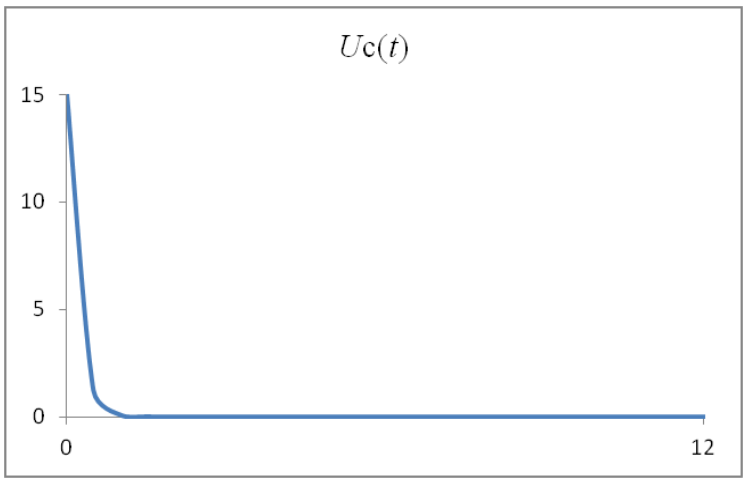


Рис.6. Критический режим затухания в колебательном контуре

В этом случае затухание происходит наиболее быстро (рис. 6), то есть полная энергия в конуре с заданными L и C рассеивается наиболее быстро.

Затухание колебаний в контуре характеризуется логарифмическим декрементом затухания δ, который определяется как натуральный логарифм отношения амплитуд колебаний, взятых через период колебаний:

$$\delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \frac{R \cdot T}{2L}, \tag{23}$$

где период колебаний T определяется из формулы (13):

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}} \quad . \tag{24}$$

Как следует из формулы (23), логарифмический декремент затухания пропорционален R.

В работе требуется измерить период колебаний T, критическое сопротивление контура $R_{кр}$ и построить зависимость логарифмического декремента затухания от сопротивления контура $\delta_C(R)$ при двух значениях ёмкости конденсатора C колебательного контура.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

2.1 Описание схемы эксперимента

В лабораторной работе для исследования затухающих колебаний в колебательном контуре используется универсальный лабораторный стенд, который является источником постоянного напряжения «+15В», «+5В».

В лабораторном стенде предусмотрено место для установки сменной платы, на которой смонтированы элементы электрической схемы. Все необходимые измерения осуществляются при помощи омметра и осциллографа.

2.2 Описание сменной платы

Принципиальная электрическая схема сменной платы приведена на рис. 7, а внешний вид платы с расположением на ней электрических элементов схемы приведён на рис. 8.

На сменной плате расположены вибропреобразователь ВП, резистор R_0=300$Ом$, необходимый для ограничения тока в цепи, катушка индуктивности L, два конденсатора C_1, C_2, переменное сопротивление R, с помощью которого можно изменять активное сопротивление контура.

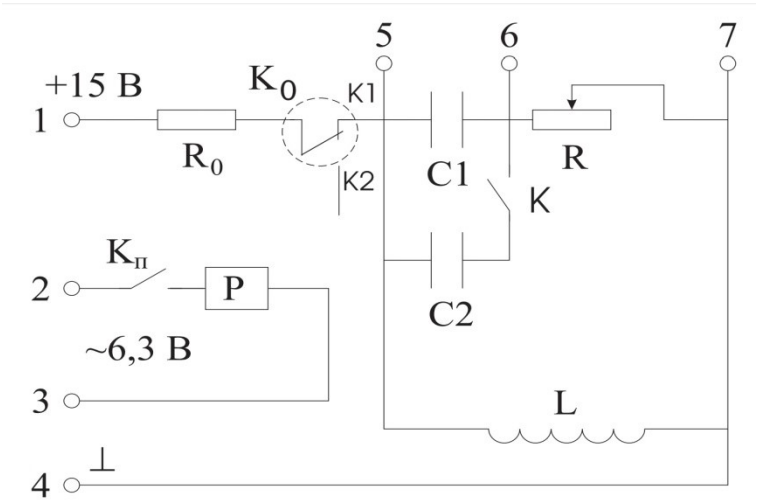


Рис. 7. Электрическая схема сменной платы для исследования процессов в колебательном контуре [3]

Кроме того, на сменной плате смонтированы тумблеры: $K_П$ – для подключения вибропреобразователя и К – для подключения конденсатора C_2 в исследуемый контур. Вибропреобразователь состоит из катушки Р и подвижного упругого контакта K_0. Контакт K_0 замыкается либо с контактом К1, либо с контактом К2 в зависимости от направления тока в обмотке реле (рис.7). На обмотку вибропреобразователя подаётся переменное напряжение частотой 50 *Гц*. Когда контакты K_0 и К1 замкнуты, из шины с напряжением +15В течет ток через резистор R_0 и катушку индуктивности колебательного контура.

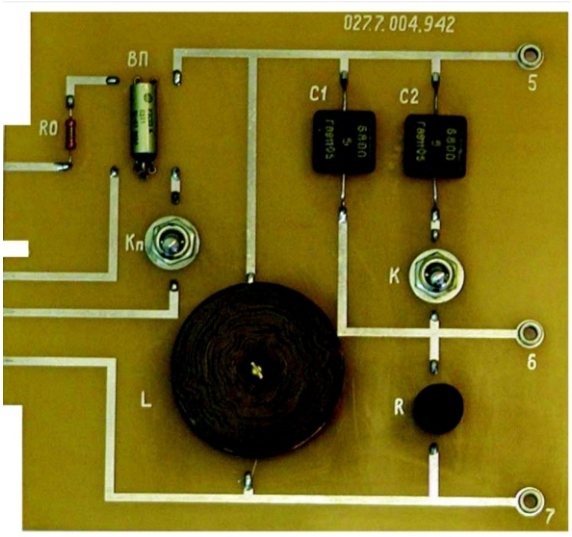


Рис. 8. Внешний вид сменной платы с элементами электрической схемы рис. 7 [3]

Поэтому в колебательном контуре запасается энергия в виде энергии магнитного поля внутри индуктивности L. После размыкания контактов в следующем полупериоде переменного напряжения в колебательном контуре возни-

кают затухающие колебания, которые можно наблюдать на экране осциллографа при подключении входа осциллографа к гнездам «5», «6» и «7».

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерение периода колебаний выполняют с помощью осциллографа. Для увеличения точности измерений следует измерить длительность t максимального числа полных колебаний и разделить t на число полных колебаний. Измерение логарифмического декремента затухания выполняется по осциллограмме затухающих колебаний вычислением логарифмов отношений амплитуд двух последующих колебаний. Измерение активного сопротивления выполняется омметром. Для этого омметр подключают при помощи соединительных проводов к соответствующим гнездам «6» и «7» сменной платы. Значения ёмкостей и индуктивности указаны на сменной плате.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Упражнение 1. Измерение периода слабозатухающих колебаний

Подключить общую шину осциллографа к точке «7» на сменной плате, а вход Y осциллографа к точке «5» и включить вибропреобразователь тумблером $К_П$. Установить минимальное значение сопротивления R и измерить период колебаний по осциллограмме для двух значений ёмкости: при C_1 и после параллельного подключения конденсатора C_2. Для его подключения используйте тумблер К. Проверить соответствие измеренной величины периода формуле Томсона: $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

Упражнение 2. Измерение критического сопротивления

Собрать схему, как указано в упражнении 1. Увеличивать сопротивление R до установления режима критического затухания. Измерить величину сопротивления $R_{кр}$ для двух значений ёмкости: при C_1 и после параллельного подключения конденсатора C_2. Сравнить с тем значением, которое даётся формулой (15).

Упражнение 3. Изучение зависимости логарифмического декремента затухания от сопротивления

Собрать схему, как указано в задании 1. Для не менее восьми значений сопротивлений R измерить логарифмический декремент затухания $\delta_C(R)$ и построить график зависимости $\delta_C(R)$ при C_1. Выполнить измерения и построить график $\delta_C(R)$ после подключения конденсатора C_2 . Сравнить с теоретической зависимостью и объяснить полученные результаты.

Вопросы для получения допуска к лабораторной работе:

1. Сформулируйте определение колебательного контура. Какие режимы колебаний в контуре возможны? От чего эти режимы зависят?

2. Представьте план измерения критического сопротивления контура $R_{кр}$.

3 Что такое логарифмический декремент затухания колебаний? От чего он зависит?

4. Представьте план измерения логарифмического декремента затуханий колебаний в зависимости от активного сопротивления колебательного контура.

Вопросы к зачёту по лабораторной работе:

1. Объясните влияние ёмкости C на экспериментальную и теоретическую зависимости логарифмического декремента затухания $\delta(R)$ от сопротивления R. Как будет влиять на поведение $\delta(R)$ величина индуктивности L в колебательном контуре?

2. В колебательном контуре L=1*мГн*, C=10000*пф* и R =200 *Ом*. Какие режимы затухания колебаний можно наблюдать в этом контуре?

3. При частоте затухающих колебаний ν=50*Гц* логарифмический декремент затухания в колебательном контуре δ=0,01. Через какое время амплитуда колебаний уменьшится в е раз (е≈2,72)?

4. Почему колебательный контур называют ещё и резонансным контуром? При каких частотах ν возможен резонанс в колебательном контуре сменной платы?

ЛИТЕРАТУРА

1. Парселл, Э. Берклеевский курс физики. В 5 т. Т. 2. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. – Москва : Наука, 1975. – 448 с.

2. Савельев, И. В., Курс физики. В 3 т. Т. 2. Электричество / И. В. Савельев. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 468 с.

3. Новожилов, В. П. Руководство к лабораторным работам по электричеству, часть 1 / В. П. Новожилов, С. Н. Костенков, Д. В. Сурнин, А. Н. Деев. – Ижевск : Ижевский полиграфический комбинат, 1991. – 180 с.

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА И ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: Изучить выпрямительные свойств электронно-дырочного перехода полупроводникового диода, вольтамперную характеристику диода и схемы выпрямителей переменного тока.

Приборы: универсальный лабораторный стенд, осциллограф, сменная плата. Полупроводниковый диод – это нелинейный электронный прибор. Он позволяет преобразовать переменный ток в постоянный с помощью находящегося внутри него электронно-дырочного перехода. В отличие от, например, вакуумных диодов, принцип действия полупроводниковых диодов основывается на физических явлениях переноса зарядов (электронов и дырок) в твёрдотельном полупроводнике. Полупроводниковый диод имеет два электрических вывода, которые часто (по аналогии с вакуумным диодом) называют анодом и катодом.

1. ТЕОРИЯ

Вещества по электропроводящим свойствам можно разделить на ***проводники, полупроводники и диэлектрики.*** Удельное сопротивление металлов ρ (в Ом·м) от 10^{-8} до 10^{-6}, полупроводников –10^{-5} – 10^{6}, диэлектриков – 10^{8} –10^{13}. То есть электрическое сопротивление полупроводников находится в промежутке между сопротивлением металлов и диэлектриков [1–4]. Электрические свойства полупроводников резко изменяются под влиянием ряда физических факторов: температуры, освещения, электрического поля, примесей. В отличие от металлов у полупроводников (химически чистых) удельное сопротивление с увеличением температуры уменьшается (рис.1). Кроме того, проводимость полупроводников зависит от количества примесей.

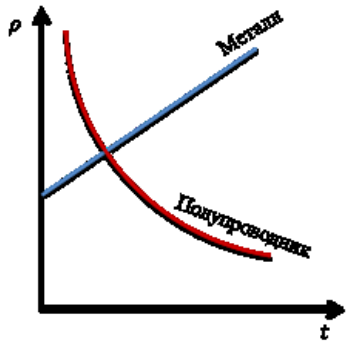


Рис. 1. Зависимости удельного сопротивления ρ полупроводника и металла от температуры *t*

Полупроводники, проводимость которых вызывается наличием «дырок», называются ***полупроводниками p-типа.*** Примесные атомы, валентность которых меньше валентности атомов кристалла, называются *акцепторными*, так

как они захватывают электроны. Примером полупроводника *p* – типа может служить *четырёхвалентный* кремний – полупроводник, в который добавлены атомы *трёхвалентного* элемента (например, индия). Каждый атом индия устанавливает ковалентную связь с тремя соседними атомами кремния. Для связи с четвёртым атомом кремния у атома индия нет валентного электрона, поэтому он захватывает валентный электрон из ковалентной связи соседнего атома кремния. После этого атом индия становится отрицательно заряженным ионом, а в атоме кремния, отдавшего электрон, образуется «дырка». Добавленные атомы примеси в этом случае, называются ***акцепторными***. Примесные атомы с валентностью, превышающей валентность атомов решётки чистого полупроводника, называют ***донорными***, так как они отдают электроны. Полупроводники, проводимость которых обусловлена избыточными электронами, называются ***полупроводниками n-типа.*** Примером полупроводника *n*-типа может служить тот же *четырёхвалентный* кремний – полупроводник, в который добавлены примесные атомы *пятивалентного* полупроводника (например, мышьяка). В процессе взаимодействия каждый атом примеси вступает в ковалентную связь с атомами кремния. Однако для пятого электрона атома мышьяка нет места в насыщенных валентных связях, и он становится свободным электроном. Это означает, что в полупроводнике *n*-типа перенос заряда (ток) осуществляется как в металлах – электронами. Область на границе двух полупроводников с различными типами электропроводимости называется ***электронно-дырочным*** или ***p-n-переходом***. Электронно-дырочный переход обладает несимметричной проводимостью. Это означает, что в месте контакта возникает односторонняя проводимость ─ ток хорошо проходит в одном направлении и почти не проходит в обратном. Работа большинства полупроводниковых приборов основана на использовании свойств одного или нескольких *p-n* -переходов. Рассмотрим физические процессы в таком переходе. Пусть внешнее напряжение на переходе отсутствует. В этом случае положительные «дырки» диффундируют в *n*-полупроводник и нейтрализуют часть электронов. Свободные электроны из *n*-полупроводника также диффундируют в *p*-полупроводник, нейтрализуя часть «дырок». В результате, небольшой слой правого полупроводника оказывается заряженным отрицательно, а левого – положительно. Возникшая контактная разность потенциалов $U_K=\varphi_n-\varphi_p$ (рис. 2) препятствует дальнейшему перемещению электронов и «дырок» через границу раздела. Возникший в *p-n*-переходе слой шириной *d*, называемый «запирающим», обладает большим сопротивлением по сравнению с сопротивлением остальных объёмов *n* - и *p*-полупроводников.

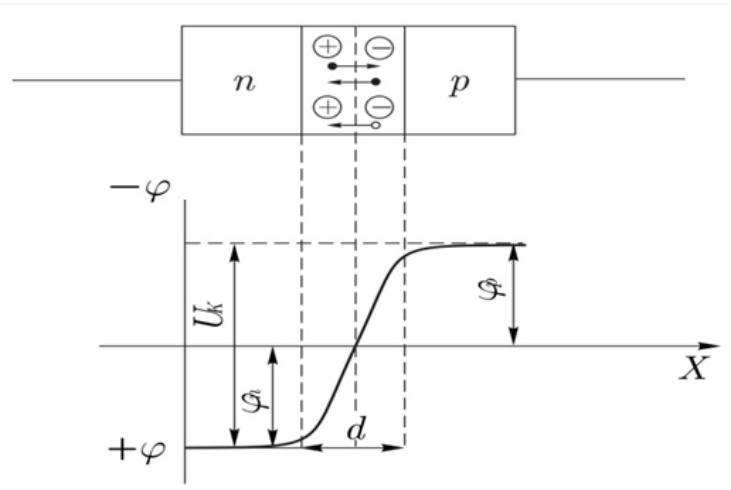


Рис. 2. Контактная разность потенциалов φ_n-φ_p в *p-n*-переходе с образованием «запирающего» слоя шириной *d* [3]

Подключим внешнее напряжение $U_{пр}$ (разность потенциалов) к *p-n* переходу (рис.3). Пусть источник внешнего напряжения подключен положительным полюсом к полупроводнику *p*-типа**,** а отрицательным полюсом к полупроводнику *n*-типа. В этом случае внешняя разность потенциалов будет уменьшать контактную разность потенциалов.

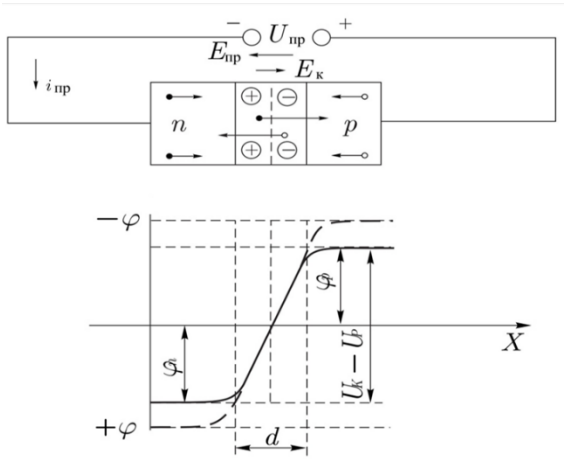


Рис. 3. Подключение внешнего прямого напряжения $U_{пр}$ к *p-n* переходу [3]

Электроны начнут двигаться к положительному полюсу батареи, а «дырки» – к отрицательному, то есть по цепи пойдёт большой ток, который называется прямым током (рис. 3). Пусть источник внешнего напряжения подключен положительным полюсом к области *n*-типа, а отрицательным – к области *p*-типа. Под действием такого обратного напряжения $U_{обр}$ через переход протекает очень небольшой *обратный* ток $I_{обр}$, величина которого в этом случае будет очень мала и обусловлена тепловой диффузией электронов и «дырок» (рис. 4).

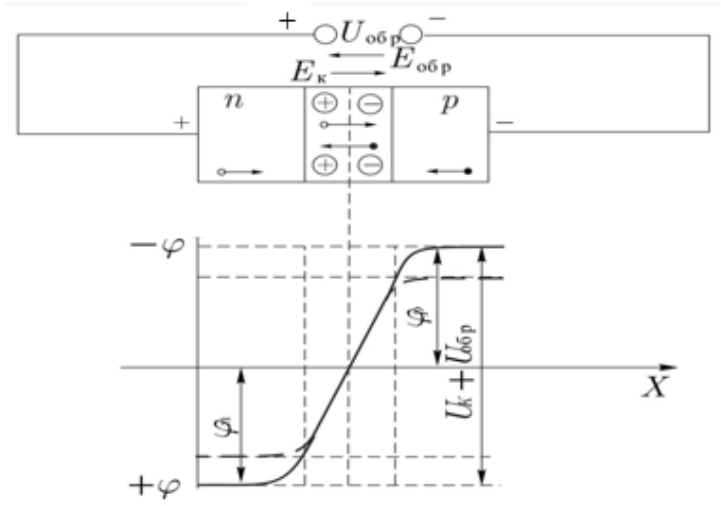


Рис. 4. Подключение обратного внешнего напряжения $U_{обр}$ к *p-n* переходу [3]

График зависимости между током и напряжением называется ***вольтамперной характеристикой*** (ВАХ) данного прибора. Пример такой характеристики для диода небольшой мощности дан на рис. 5.

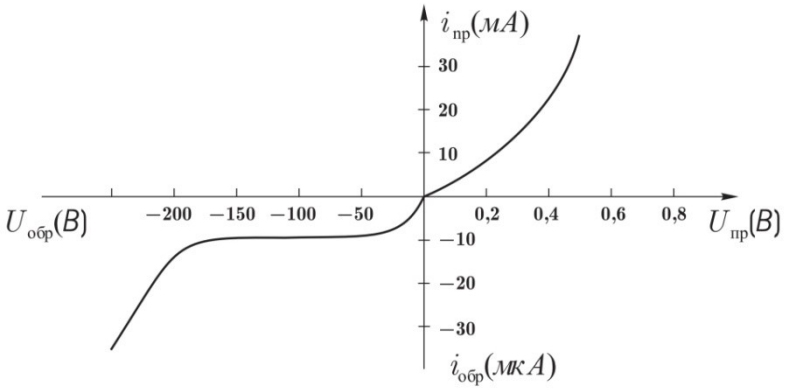


Рис. 5. Вольтамперная характеристика диода [3]

ВАХ показывает, что прямой ток в десятки миллиампер получается при прямом напряжении в десятые доли вольта. Прямое сопротивление бывает не выше нескольких десятков Ом. Обратный ток при обратном напряжении до сотен вольт составляет единицы или десятки микроампер. Это соответствует сопротивлению в несколько сотен тысяч Ом и более. Характеристика для прямого тока имеет значительную нелинейность, так как при увеличении прямого напряжения сопротивление запирающего слоя уменьшается. Поэтому кривая идет с возрастающей крутизной. Но при напряжении в десятые доли вольта запирающий слой практически исчезает и остается только сопротивление *n*- и *p*-областей, которое приближённо можно считать постоянным. Поэтому дальше характеристика становится почти линейной. Небольшая нелинейность

здесь объясняется тем, что при увеличении тока *n*- и *p* - области нагреваются, и от этого их сопротивление уменьшается (рис. 1). Малый обратный ток (единицы микроампер) при увеличении обратного напряжения вначале быстро возрастает. Это вызвано тем, что уже при небольшом обратном напряжении за счёт повышения потенциального барьера в переходе резко снижается диффузионный ток. Следовательно, полный ток резко увеличивается. Однако при дальнейшем повышении обратного напряжения ток растёт незначительно. При превышении некоторого значения обратного напряжения (на рис.5 порядка 200В) возникает пробой *p-n* -перехода, при котором обратный ток резко возрастает, сопротивление запирающего слоя резко уменьшается.

Если внешнюю батарею в рассмотренных случаях заменить источником переменного тока, то в течение одного полупериода электронно-дырочный переход будет пропускать значительный ток, в течение другого – практически нулевой. Это свойство *p-n* перехода используется для выпрямления переменного тока. В выпрямительных устройствах (выпрямительных диодах) энергия переменного тока преобразуется в энергию постоянного тока. Полупроводниковый выпрямительный диод – это полупроводниковый прибор с одним *p–n*-переходом и двумя выводами – анодом и катодом. Полупроводниковые диоды подразделяются на германиевые и кремниевые. Последние более распространены, так как имеют более высокую предельную температуру (120°С против 55°С), обладают меньшими обратными токами и большими допустимыми обратными напряжениями. Однако кремниевые диоды имеют большее прямое падение напряжения (порядка 0,7…1,0 В против 0,3…0,5 В у германиевых). Простейшая схема выпрямителя (или схема ***однополупериодного выпрямителя***) на основе полупроводникового диода показана на рис. 6. Работа однополупериодного выпрямителя происходит следующим образом. От вторичной обмотки трансформатора T_p на вход схемы подается переменное напряжение U_2(Рис. 7*а*). При действии на входе положительной полуволны переменного напряжения потенциал точки Т1 (рис. 6) будет положительным относительно точки Т2. Во время этого полупериода напряжение для диода является прямым, и через него проходит ток, создающий на нагрузочном резисторе $R_{\text{Н}}$ падение напряжения U_{R}.

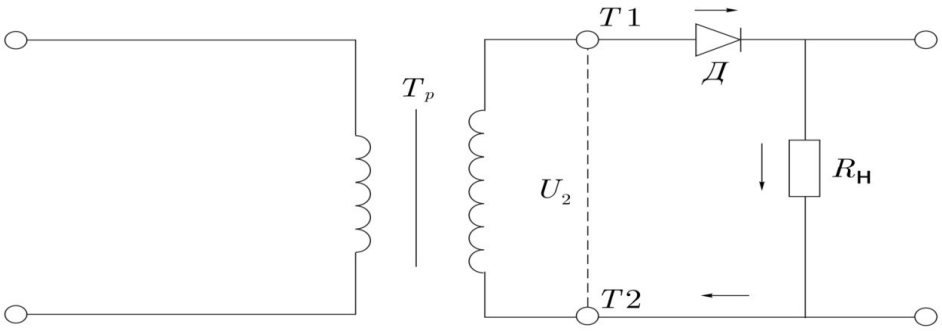


Рис.6. Схема однополупериодного выпрямителя переменного тока на основе полупроводникового диода [3]

В течение следующего полупериода входного напряжения потенциал Т1 отрицательный, а Т2 – положительный. То есть в этот полупериод приложенное напряжение для диода является обратным, тока практически нет и U_R =0.

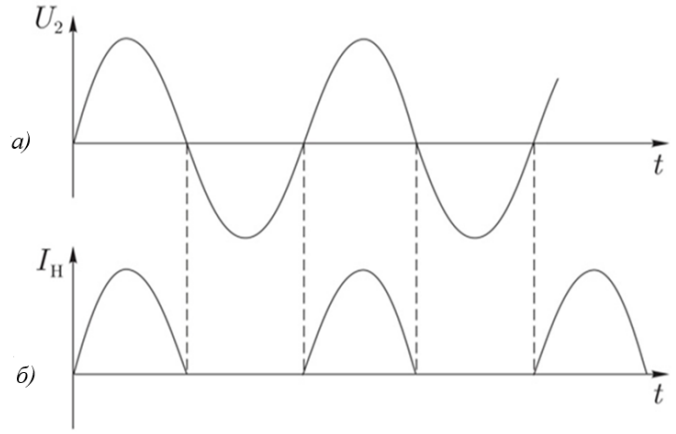


Рис. 7. *а*) – переменное напряжение U_2 вторичной обмотки трансформатора; *б*) – ток $I_н$ через нагрузочный резистор $R_н$ однополупериодного выпрямителя [3]

Следовательно, через диод и нагрузочный резистор проходит пульсирующий ток $I_н$ в виде импульсов, длящихся полпериода и разделенных промежутком также в полпериода (рис. 7*б*). Другие, более сложные схемы для выпрямления переменного тока представляют собой комбинацию нескольких однополупериодных схем. Когда требуется производить двухполупериодное выпрямление, то одной из возможных схем является *мостовая схема*, показанная на рис. 8. В этой схеме переменное напряжение, прикладываемое к противоположным узлам диодного моста, преобразуется в пульсирующее выпрямленное напряжение, снимаемое с двух других узлов. При действии на входе полуволны переменного напряжения (рис. 9*а*) положительной полярности, потенциал точки *Т*1 будет положительным относительно точки *Т*2. Другими словами потенциал точки *Т*2 будет отрицательным относительно точки *Т*1. Поскольку точка *Т*2 служит узлом диодов *Д*3 и *Д*4, (причём, только *Д*3

имеет нужное для проводимости направление включения), то электроны, пройдя через диод *Д*3, движутся к узлу диодов *Д*3 и *Д*1.

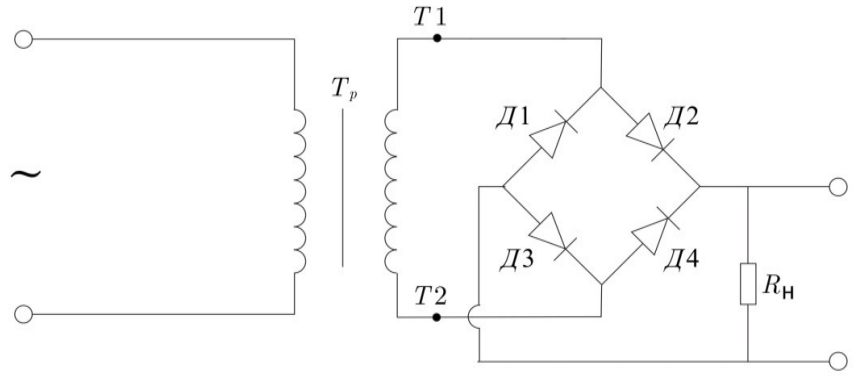


Рис. 8. Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя с помощью четырёх диодов[3]

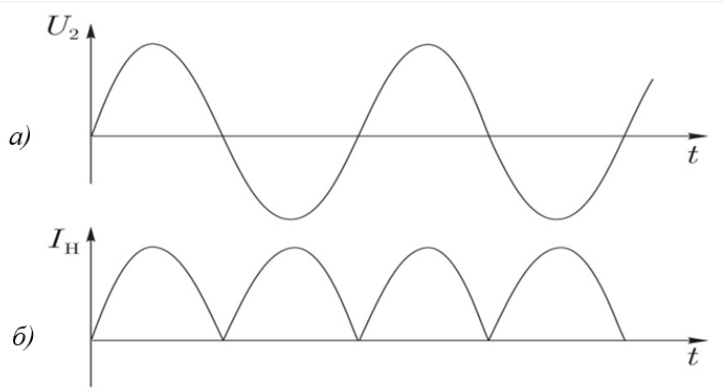


Рис. 9. *а*) – переменное напряжение U_2 вторичной обмотки трансформатора;
б) – ток $I_Н$ через нагрузочный резистор $R_Н$ двухполупериодного выпрямителя [3]

Отрицательная полярность напряжения, приложенного к диоду *Д*1, является запирающей, поэтому электроны двигаются через резистор $R_Н$, на котором возникает падение напряжения U_R. После прохождения через $R_Н$ электроны достигают узла с диодами *Д*2 и *Д*4. Однако диод *Д*4 заперт (так как потенциал *Т*2 отрицателен), а на диоде *Д*2 действует отпирающее напряжение, позволяющее электронам двигаться к *Т*1, потенциал которого положителен при данной полуволне переменного тока. В течение следующего полупериода входного напряжения (рис.9*а*) потенциал *Т*1 отрицательный, а *Т*2 – положительный. Поэтому электроны от *Т*1 перемещаются к узлу с диодами *Д*1 и *Д*2, и, поскольку нужную для проводимости полярность имеет лишь диод *Д*1, электроны проходят через этот диод и опять поступают на резистор $R_Н$, создавая на нём падение напряжения U_R той же полярности, что и в первом случае. Далее электроны, как и прежде, поступают на узел с диодами *Д*2 и *Д*4, и проходят через диод Д4 в точку *Т*2. Таким образом, и отрицательная полуволна создает на резисторе $R_Н$ напряжения U_R положительной полярности. Это озна-

чает, что мостовой выпрямитель обеспечивает двухполупериодное выпрямление (рис. 9*б*). Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения в выпрямителях применяют специальные сглаживающие фильтры. В сглаживающем фильтре применяются конденсаторы большой ёмкости *C*. Часто также в этих фильтрах ставят дроссели – катушки с большой индуктивностью *L*. Чем выше частота пульсаций ω, тем меньше сопротивление конденсатора ($1/\omega C$) и больше сопротивление дросселей (ωL), а следовательно, тем эффективнее работает сглаживающий фильтр.

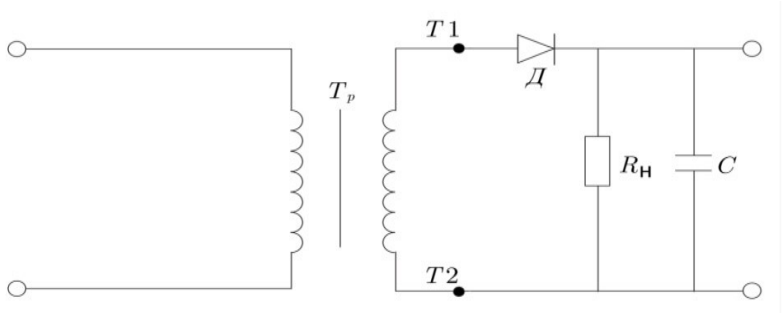


Рис. 10. Схема для сглаживания пульсаций напряжения на нагрузке $R_Н$ с помощью шунтирующего конденсатора *C* [3]

Простейшая схема для сглаживания пульсаций с применением фильтра в виде конденсатора *C*, шунтирующего резистор нагрузки $R_Н$, приведена на рис.10. Во время некоторой части положительного полупериода прямое напряжение на диоде *Д* заряжает конденсатор *C*, поскольку через диод *Д* проходит ток. В то время, когда ток через диод не проходит, конденсатор разряжается через нагрузку $R_Н$ и создает на ней напряжение, которое уменьшается на малую величину. В каждый следующий положительный полупериод конденсатор подзаряжается, и его напряжение снова возрастает. Разрядка конденсатора через сравнительно большое сопротивление нагрузки совершается гораздо медленнее (рис. 11). Вследствие этого напряжение на конденсаторе и включенной параллельно ему нагрузке пульсируют незначительно.

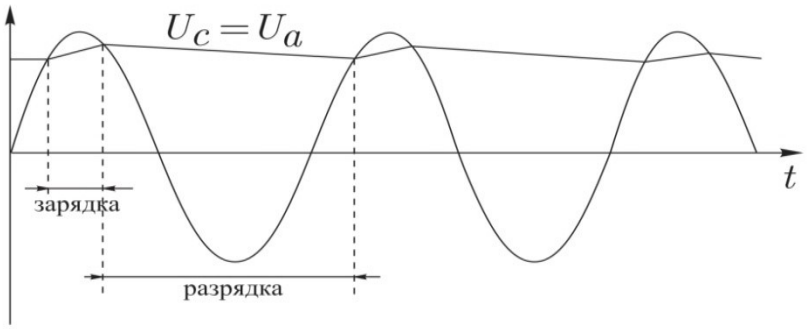


Рис. 11. Сглаживание пульсаций напряжения на нагрузке с помощью конденсатора [3]

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В лабораторной работе для изучения полупроводниковых приборов используется универсальный лабораторный стенд, который является источником переменного напряжения. Электрическая схема, необходимая для выполнения эксперимента, смонтирована на сменной плате. Наблюдение осциллограмм при изучении различных схем выпрямителей осуществляется при помощи осциллографа.

2.1. Описание сменной платы

Объектом исследования являются полупроводниковые кремниевые диоды. Диоды, резисторы и конденсаторы, необходимые для выполнения эксперимента, смонтированы на специальной плате. Принципиальная электрическая схема сменной платы приведена на рис. 12.

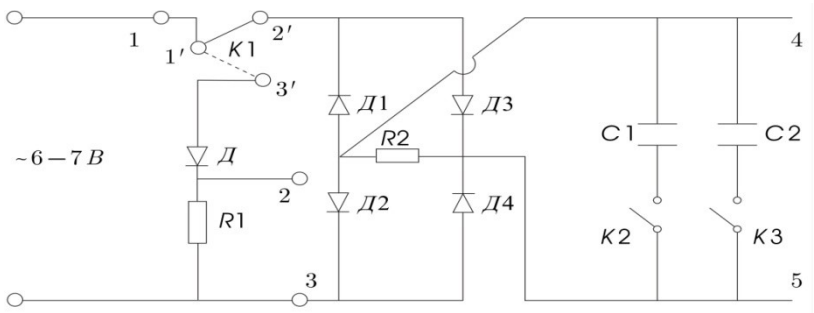


Рис.12. Электрическая схема для исследования полупроводниковых диодов [3]

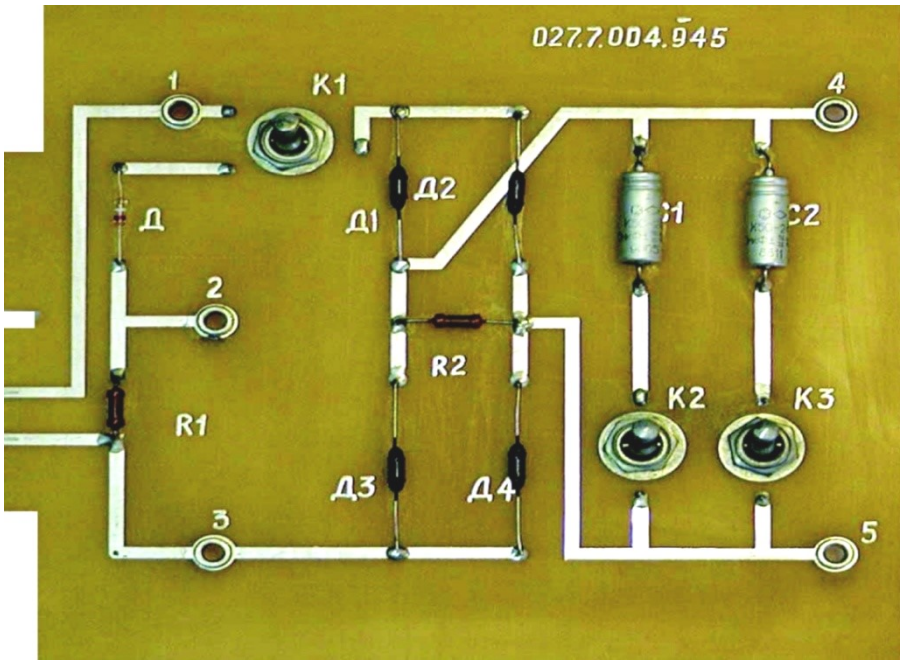


Рис. 13. Внешний вид сменной платы, смонтированной по электросхеме рис. 12 [3]

На сменной плате (рис.13) расположены полупроводниковые кремниевые диоды Д, Д1, Д2, Д3, Д4, необходимые для изучения различных схем выпрямления переменного тока. Постоянные резисторы *R*1 и *R*2 являются нагрузочными сопротивлениями в исследуемых схемах. Конденсаторы *C*1 и *C*2 служат для сглаживания выпрямленного напряжения. Переключатели (тумблеры) К2 и К3 предназначены для поочередного подключения конденсаторов в исследуемую цепь. При помощи тумблера К1, осуществляется подключение к источнику переменного напряжения одной из двух возможных электрических схем. В верхнем положении тумблера К1 (рис. 13) (положение «$1'-2'$» на рис. 12) реализуется схема для изучения двухполупериодного мостового выпрямителя, а в нижнем положении переключателя К1 (рис. 13) (положение «$1'-3'$» на рис. 12) – схема для снятия вольтамперной характеристики и изучения однополупериодного выпрямителя. На сменной плате имеется ряд дополнительных гнезд «1-5» для монтажа схем.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Наблюдение вольтамперной характеристики диода на экране осциллографа

Наблюдение ВАХ диода на экране осциллографа осуществляется при помощи электрической схемы, которая приведена на рис. 14.

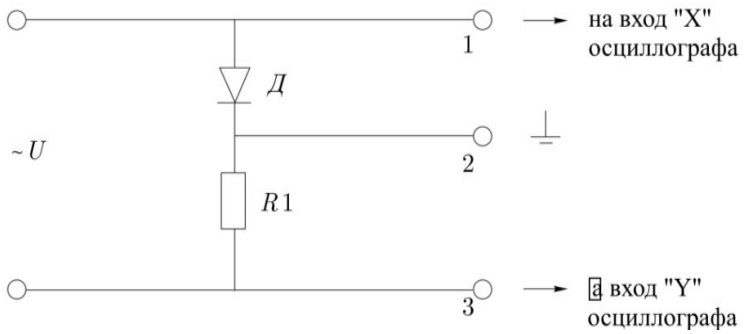


Рис. 14. Электрическая схема для наблюдения ВАХ диода на экране осциллографа

Данная электрическая схема собрана на сменной плате. Для наблюдения ВАХ диода *Д* необходимо установить сменную плату в лабораторный стенд. При помощи соединительных проводов, и, используя соответствующие гнезда «1-3», подсоединить осциллограф к схеме. Включив приборы в сеть, дать им прогреться несколько минут. При подаче переменного напряжения на схему можно наблюдать на экране осциллографа изображение вольтамперной характеристики.

3.2. Изучение выпрямительных схем

3.2.1. Однополупериодный выпрямитель

Для изучения однополупериодного выпрямителя на сменной плате собрана электрическая схема, которая приведена на рис. 15.

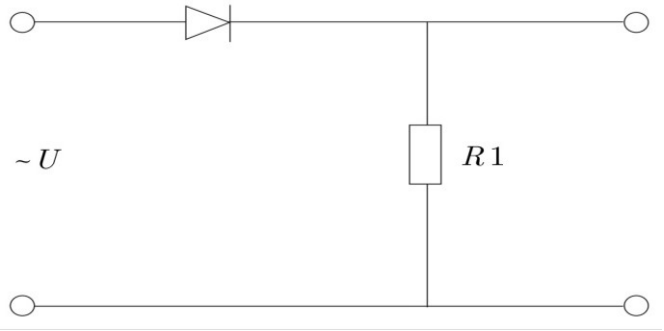


Рис. 15. Электрическая схема для изучения однополупериодного выпрямителя [3]

Наблюдение однополупериодного выпрямления с помощью осциллографа производится в режиме его внешней развёртки. При помощи соединительных проводов и использования соответствующих гнезд «1-3» подсоединяют осциллограф к схеме. Устанавливают на экране осциллографа изображение двух-трёх периодов сигнала и наблюдают осциллограмму выпрямленного напряжения.

3.2.2. Двухполупериодный мостовой выпрямитель

Изучение двухполупериодного мостового выпрямителя осуществляется при помощи электрической схемы, приведенной на рис. 16. Для наблюдения осциллограммы двухполупериодного выпрямления необходимо установить сменную плату в стенд.

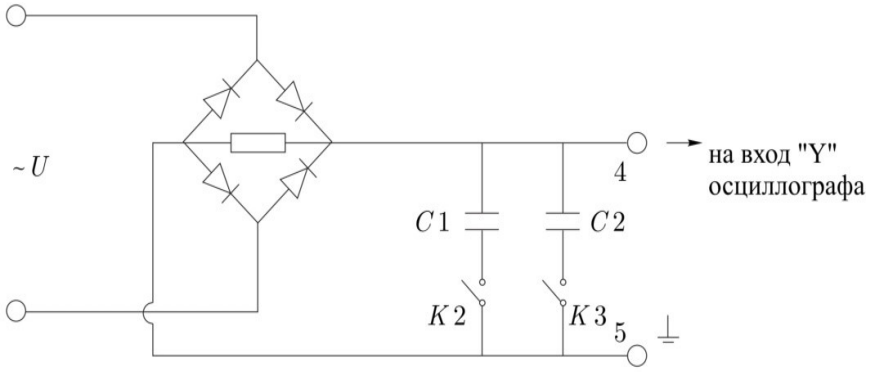


Рис. 16. Электросхема для изучения двухполупериодного мостового выпрямителя [3]

На сменной плате переключатель К1 установить в положение «$1'-2'$». При помощи соединительных проводов и использования специальных гнезд

«4», «5» подсоединяется осциллограф к схеме. На сменную плату подается переменное напряжение, а на осциллографе можно наблюдать осциллограмму выпрямленного напряжения.

3.3. Сглаживание выпрямленного напряжения

Изучение явления сглаживания выпрямленного напряжения осуществляется при помощи той же электрической схемы. В этом случае конденсаторы $C1$ и $C2$ подключаются к выходу выпрямителя с помощью тумблеров К2 и К3.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Упражнение 1. Получить на экране осциллографа изображение вольтамперной характеристики диода и зарисовать осциллограмму.

Упражнение 2. Получить на экране осциллографа изображение переменного напряжения. В последующих упражнениях чувствительность и напряжение не менять. Зарисовать осциллограмму.

Упражнение 3. Получить на экране осциллографа и зарисовать на миллиметровой бумаге наблюдаемую осциллограмму для однополупериодного выпрямителя, сопоставить ее с осциллограммой переменного напряжения.

Упражнение 4. Получить на экране осциллографа и зарисовать на миллиметровой бумаге наблюдаемую осциллограмму напряжения для двухполупериодного мостового выпрямителя, сопоставить её с осциллограммой для однополупериодного выпрямителя.

Упражнение 5. Получить на экране осциллографа и зарисовать осциллограммы напряжений при одном и двух конденсаторах, подключаемых к резистору $R2$ в двухполупериодный мостовой выпрямитель для сглаживания выпрямленного напряжения.

Запишите выводы по результатам выполненной лабораторной работы.

Вопросы для получения допуска к лабораторной работе:

1. Чем отличаются полупроводники от металлов и диэлектриков? Что такое полупроводники *n*-типа и *p*-типа? Объясните возникновение основных носителей заряда в этих полупроводниках.

2. Что происходит при контакте двух полупроводников с различным типом проводимости?

3. Что представляет собой полупроводниковый выпрямительный диод? Объясните принцип работы диода.

4. Что такое ВАХ? Как выглядит ВАХ диода? Что такое пробой *p-n* - перехода?

5. Представьте план получения ВАХ с помощью электронного осциллографа.

6. Объясните работу схемы однополупериодного выпрямителя переменного тока.

7. Объясните работу мостовой схемы двухполупериодного выпрямителя.

8. Что такое сглаживание пульсаций напряжения на нагрузке?

Вопросы к зачёту по лабораторной работе:

1. Как влияет ёмкость фильтрующего конденсатора на пульсации выходного напряжения выпрямителя?

2. В чём преимущество двухполупериодного выпрямителя по сравнению с однополупериодным?

ЛИТЕРАТУРА

1. Парселл, Э. Берклеевский курс физики. В 5 т. Т.2. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. ─ Москва: Наука, 1975. ─ 448 с.

2. Савельев, И. В., Курс физики. В 3 т. Т. 2. Электричество / И. В. Савельев. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 468 с.

3. Новожилов, В. П. Руководство к лабораторным работам по электричеству, часть 1 / В. П. Новожилов, С. Н. Костенков, Д. В. Сурнин, А. Н. Деев. – Ижевск : Ижевский полиграфический комбинат, 1991. – 180 с.

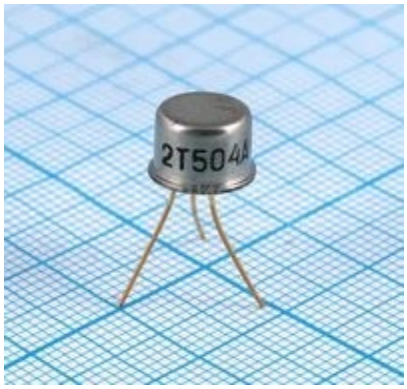
4. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – Москва : Мир, 1982. – 512 с.

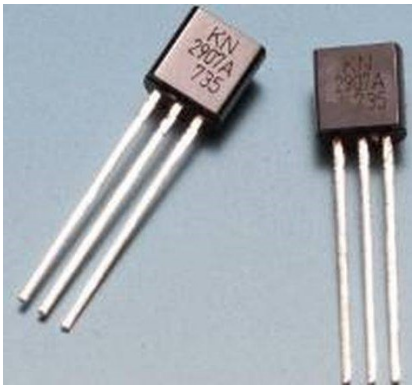
ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: снятие входных и выходных характеристик полевого транзистора.

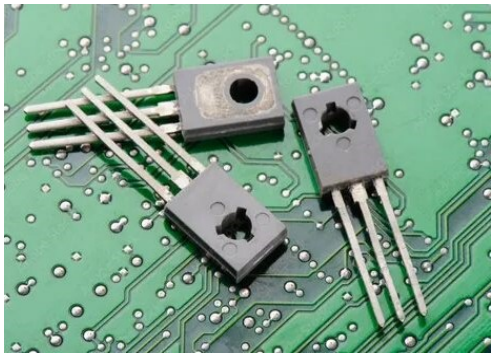
Приборы: универсальный вольтметр, специальный лабораторный стенд, сменная плата для изучения работы транзисторов.

Транзистор – это полупроводниковый прибор, позволяющий усиливать слабый электрический ток и напряжение. По принципу работы различают *биполярные* и *полевые* (униполярные) транзисторы. Биполярные транзисторы управляются электрическим током, а полевые – напряжением, под действием которого создаётся электрическое поле [1,2], причём без затрат мощности управляющего сигнала [3].





а)



б) *в*)

Рис. 1. Внешний вид полевых транзисторов: *а*) – малой мощности; *б*) – средней мощности; *в*) – большой мощности

Полевые транзисторы имеют три вывода (рис. 1): один управляющий, а два других присоединяют к управляемой цепи. Эти транзисторы находят широкое применение в современной электронике. При малом потреблении энергии они имеют высокое входное сопротивление и занимают на кристалле

интегральной схемы (ИС) значительно меньшую площадь, чем биполярные. Технологии производства ИС на полевых транзисторах требуют меньшего числа операций, чем технологии изготовления ИС на биполярных транзисторах. Для реализации сверхбольших интегральных схем (СБИС) созданы полевые микротранзисторы, которые изготавливаются с разрешением менее 100 нм. В современных микропроцессорах число транзисторов составляет от десятков миллионов до нескольких миллиардов. За счёт отмеченных выше преимуществ полевые транзисторы в ряде областей почти полностью вытеснили биполярные. Они успешно используются в производстве бытовых приборов (например, пультов управления для телевизоров или наручных часов), которые могут функционировать годами на небольших батарейках или аккумуляторах.

1. ТЕОРИЯ

Необходимые в дальнейшем сведения о полупроводниках описаны в лабораторной работе «Изучение полупроводникового диода и выпрямителей». Здесь, напомним, что в полупроводнике *n*-типа перенос заряда (ток) осуществляется как в металлах – электронами, а в полупроводнике *p*-типа – «дыркам. В полевых транзисторах для переноса заряда применятся только один тип носителей заряда – электроны или «дырки». По этой причине полевые транзисторы называют *униполярными*.

1.1. Принцип работы полевого транзистора

Устройство полевого (униполярного) транзистора с каналом *n*-типа, его условное обозначение и схема включения приведены на рис.2.

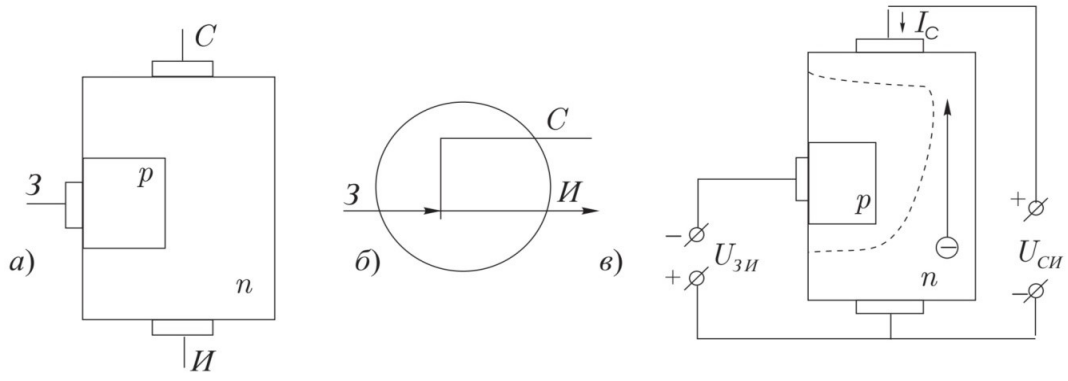


Рис. 2. Полевой транзистор: *а*) – с каналом *n*-типа; *б*) – условное обозначение; *в*) – схема включения [4]

Он представляет собой пластинку из полупроводника *n*-типа (рис. 2*а*), имеющего на противоположных концах металлические контакты с выводами – *исток* (*И*) и *сток* (*С*), подключающимися к выходной (управляемой) цепи.

Управляющий вывод отведён от области с проводимостью *p*-типа. Вывод из *p*-области называется *затвором* (*3*). Между *стоком* и *истоком* подают положительное напряжение $U_{си}$. Вдоль транзистора в области *n*-типа проходит поток основных носителей заряда – электронов (рис.2в), при этом от стока к истоку течёт ток $I_с$. Между затвором и истоком подают напряжение $U_{зи}$ такой полярности, чтобы **единственный** *p-n*-переход оказался запертым. **Напряжение другой полярности не подают никогда**, так как *p-n*-переход окажется открытым и по нему потечёт сильный ток, что может привести к перегреву и разрушению транзистора. При запирающем *входном* напряжении $U_{зи}$ в области *p-n*-перехода образуется обеднённый основными носителями заряда слой (на рис.2*в* обозначен штрихами). При увеличении $U_{зи}$ площадь поперечного сечения области (или канала *n*-типа), через которую проходит поток основных носителей заряда (электронов), уменьшается. Управляя напряжением $U_{зи}$, можно менять ширину канала, тем самым регулируя количество проходящих электронов, а, значит, и ток стока $I_с$. При некотором значении напряжения $U_{зи0}$ граница обеднённого слоя может достигнуть правой границы канала. Канал исчезает, ток через транзистор прекращается (транзистор запирается). Напряжение $U_{зи0}$ называют **напряжением запирания транзистора.** Пренебрегая очень слабым током неосновных носителей заряда, можно считать, что ток в цепи *затвора* практически не течет:

$$I_з=0. \qquad (1)$$

Принцип работы полевого транзистора с каналом *p*-типа аналогичен работе рассмотренного выше полевого транзистора с каналом *n*-типа, только необходимо поменять ролями электроны и «дырки». Замена *n*-канального транзистора на *p*-канальный возможна, если поменять знак напряжения питания, а также соответственно изменить полярность включения используемых в схеме диодов и электролитических конденсаторов [3].

2. ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Поскольку принцип действия полевого транзистора основан на управлении ширины токопроводящего канала напряжением между затвором и истоком $U_{зи}$, то его *вольтамперные характеристики* (ВАХ) определяются в одном случае при изменении $U_{зи}$, а в другом случае при $U_{зи}$ = const. ***Входная характеристика*** полевого транзистора (показана на рис. 3) – это зависимость тока стока $I_с$ от напряжения между затвором и истоком $U_{зи}$ при постоянном напряжении между стоком и истоком $U_{си}$:

$$I_c = I_c(U_{зи}) \text{ , при } U_{си} = \text{const.} \quad (2)$$

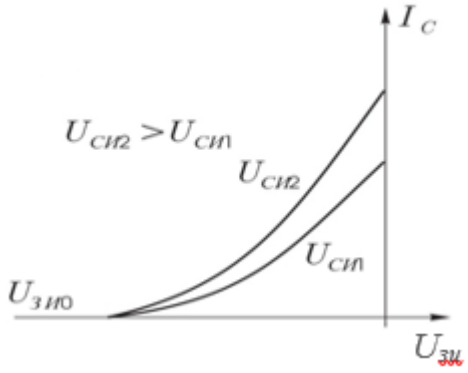


Рис. 3. Входная характеристика полевого транзистора с каналом *n*-типа [4]

При различных напряжениях $U_{си}$, входные характеристики мало отличаются друг от друга и практически совпадают. Это говорит о том, что выходная цепь не влияет на входную. Напряжение $U_{зи0}$ называют **напряжением запирания транзистора.**

Выходная характеристика (показана на рис. 4) – это зависимость тока стока I_c от напряжения между стоком и истоком $U_{си}$ при постоянном напряжении между затвором и истоком $U_{зи}$:

$$I_c = I_c(U_{си}) \text{ при } U_{зи} = \text{const.} \quad (3)$$

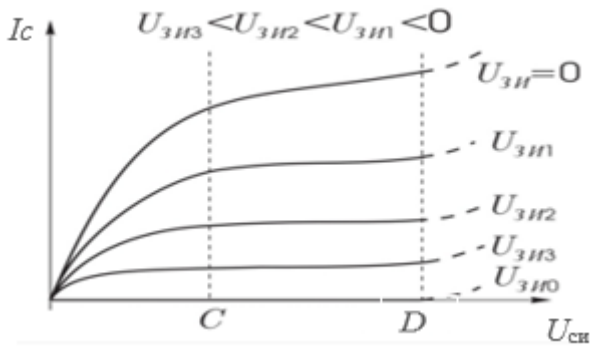


Рис. 4. Выходная характеристика полевого транзистора с каналом *n*-типа [4]

При увеличении напряжения между стоком и истоком $U_{си}$ (при $U_{зи}$ = const) ток стока I_c после точки *C* практически не изменяется до точки *D*. Пологий участок *CD* выходной характеристики существует по следующей причине. При увеличении $U_{си}$ (при $U_{зи}$ = const) увеличивается напряжение на *p-n*-переходе со стороны *стока*, это приводит к уменьшению толщины канала. Получается, что ток стока I_c растёт за счет увеличения $U_{си}$, но уменьшается за счёт уменьшения толщины канала. В результате после точки *C* ток I_c перестаёт зависеть от $U_{си}$ (рис.4). При дальнейшем увеличении напряжения $U_{си}$ после

точки D происходит резкое возрастание тока стока $I_с$, приводящее к пробою транзистора. Полевой транзистор может служить для усиления слабых напряжений. Для этого в управляемую цепь включают резистор R (рис. 5).

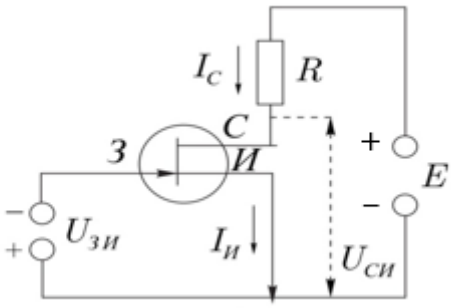


Рис. 5. Резистор R в управляемой цепи полевого транзистора с каналом n-типа [4]

В результате этого $U_{си}$ не остается постоянным, а зависит от $I_с$ по правилу Кирхгофа:

$$U_{си} = E - I_с R . \quad (4)$$

Режим работы полевого транзистора выбирают так, чтобы $I_с$ и $U_{си}$ попали в среднюю часть участка CD. Малое изменение $U_{зи}$ приводит к изменению $I_с$, которое в свою очередь изменяет $U_{си}$ согласно уравнению:

$$\Delta U_{си} = - \Delta I_с R \quad (5)$$

Уравнение (5) является следствием (4), если взять от (4) первый дифференциал. Разделив (5) на $\Delta U_{зи}$, получим K_U – *коэффициент усиления* по напряжению:

$$K_U = | \Delta U_{си}/\Delta U_{зи}| = SR, \quad (6)$$

где

$$S = \Delta I_с /\Delta U_{зи} . \quad (7)$$

Величина S называется *крутизной* и достигает порядка 3 мА/В. Если взять R = 10-100 кОм, то коэффициент усиления достигает значения:

$$K = 30\text{-}300. \quad (8)$$

3. ОПИСАНИЕ СМЕННОЙ ПЛАТЫ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

На рис. 6 приведена схема для изучения работы транзисторов (в том числе и биполярного транзистора; полевой транзистор обозначен как *T*2). На рис. 7 показан внешний вид сменной платы, на которой смонтирована данная схема.

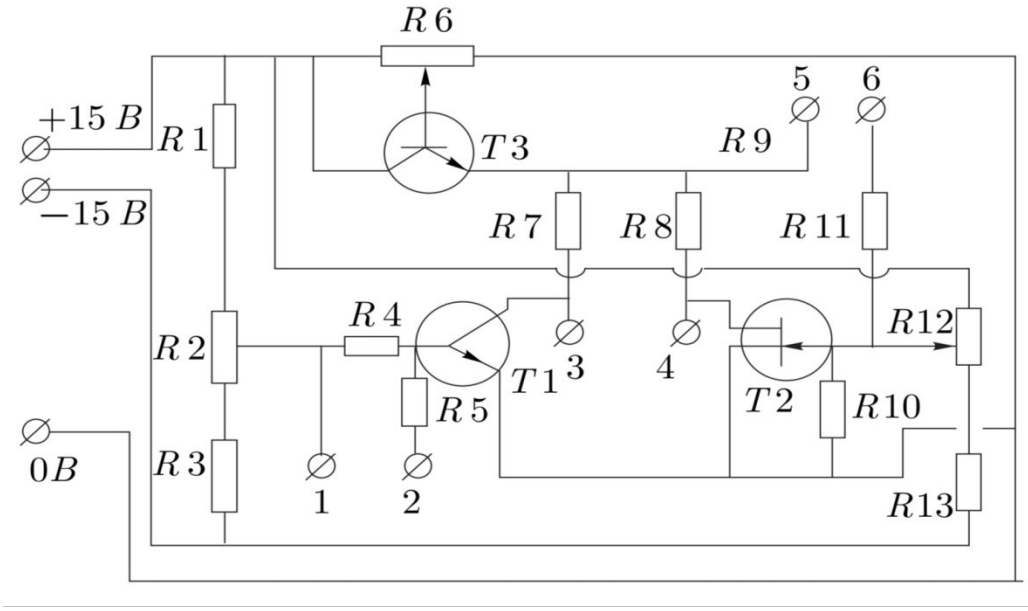


Рис. 6. Электрическая схема для изучения работы транзисторов (биполярного и полевого), *T*2 – полевой транзистор [4]

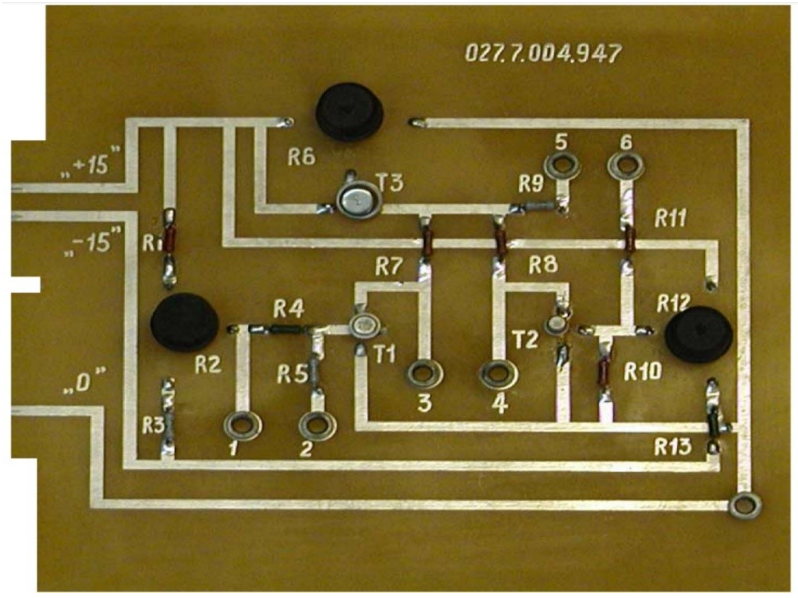


Рис. 7. Внешний вид сменной платы, на которой смонтирована электросхема по рис. 6 [4]

На транзисторе T3 и переменном сопротивлении R6 создан управляемый источник напряжения, который может регулироваться с помощью R6 и пода-

вать в управляемую цепь изучаемого транзистора Т2 напряжение в пределах от -15В до +15В. Переменное сопротивление R12 и сопротивление R13, подключенные к источнику питания ±15В, образуют делитель напряжения, который подаёт в цепь затвора полевого транзистора Т2 напряжение $U_{зи}$; оно может регулироваться с помощью R12 и меняться от отрицательных до положительных значений. В данной работе используется лишь вольтметр, поэтому для измерения тока в управляемой цепи транзистора Т2 включено сопротивление R8. Измеряя разность потенциалов на концах R8 (гнёзда Г4 и Г5), можно найти ток стока $I_с$ транзистора Т2.

$$I_с = U8/R8. \quad (9)$$

Между гнездами Г4 и Г5 кроме сопротивления R8 включено также сопротивление R9, но через него ток не течёт, поэтому на нём нет падения напряжения. Роль R9 состоит в том, что он защищает транзистор Т3 от неправильного включения вольтметра, одна из клемм которого соединена с корпусом (0 В). Для измерения напряжения между стоком и истоком $U_{си}$ транзистора Т2 необходимо подключить вольтметр к гнезду Г4. Сопротивление R11 играет роль защиты (ту же, что и R9). **Общий провод вольтметра подключается к гнезду, расположенному на дорожке платы 0 В (корпус) и не отключается в процессе измерений!** Поэтому *потенциалы* остальных гнёзд измеряются относительно корпуса. Например, чтобы найти напряжение $U8$ на R8, необходимо подключить другую клемму вольтметра к Г4, снять значение потенциала U4 гнезда, а лишь потом подключить к гнезду Г5 и снять значение его потенциала U5. Тогда разность потенциалов на концах R8 равна U5-U4.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Упражнение 1. Снятие входной характеристики полевого транзистора ($I_с(U_{зи})$ при $U_{си}$=const)

1) Установить минимальное напряжение $U_{зи}$ (помните, что $U_{зи}<0$) с помощью сопротивления R12 (Г6).

2) С помощью R6 установить $U_{си}$ = 5В (Г4).

3) Найти разность потенциалов φ_5-φ_4 на R8 (Г5, Г4). Зная R8, вычислить $I_с$: $I_с=(\varphi_5-\varphi_4)/R8$.

4) Проделать ряд измерений с различными значениями $U_{зи}$ (в том числе и положительными), поддерживая постоянным значение $U_{си}$ = 5В, применяя метод последовательных приближений.

5) Найти $U_{зио}$ следующим способом: установить $U_{зи}$ минимально возможное (Г6), при этом поддерживать $U_{си}$ = 5В (Г4); увеличивать с помощью

R12 $U_{зи}$ до тех пор, пока $U_{зи}$ (Г4) не начнёт меняться (это означает, что транзистор отпирается; через него начинает течь ток); теперь можно измерить $U_{зио}$ (Г6).

6) Результаты представить в виде таблицы и графика.

7) Найти крутизну S по формуле (7) или как тангенс угла наклона входной характеристики.

8) Найти *коэффициент усиления* по напряжению K_U при R= 150кОм.

Упражнение 2. Снятие выходных характеристик полевого транзистора ($I_с(U_{си})$ при $U_{зи}$=const).

1) Установить с помощью R12 напряжение $U_{зи}$=0 (Г6). В дальнейшем $U_{зи}$ корректировать необязательно, так как выходная цепь практически не влияет на входную.

2) Установить $U_{си}$ = 0 с помощью R6 (Г4).

3) Найти разность потенциалов φ_5-φ_4 на R8 (Г5 и Г4). Зная R8, найти ток стока $I_с$=(φ_5-φ_4)/R8.

4) Увеличивая $U_{си}$, снять зависимость $I_с$ от $U_{си}$.

5) Проделать те же измерения при положительных и отрицательных значениях $U_{зи}$.

6) Представить таблицы и графики (графики – на миллиметровой бумаге).

Запишите выводы по результатам выполненной лабораторной работы.

Вопросы для получения допуска к лабораторной работе:

1. Что такое полупроводники *n*-типа и *p*-типа? Объясните возникновение основных носителей заряда в этих полупроводниках.

2. Что такое канал *n*-типа или канал *p*-типа? Какой полярности должно быть напряжение между затвором и истоком $U_{зи}$ полевого транзистора: а) с каналом *n*-типа? и б) с каналом *p*-типа?

3. Что такое входная характеристика полевого транзистора?

4. Что такое выходная характеристика полевого транзистора?

5. Представьте план получения ВАХ полевого транзистора.

Вопросы к зачёту по лабораторной работе:

1. Где применяются полевые транзисторы? Почему их называют униполярными?

2. Ток через сопротивление R8 определяется по измеренной разности потенциалов между точками 4 и 5 (гнёзда Г4 и Г5), между которыми включено два сопротивления R8 и R9. Почему в формуле (9) сопротивление R9 не учитывается?

3. Что означает выражение «полевой транзистор заперт»? Что называют напряжением запирания полевого транзистора с каналом *n*-типа $U_{зи0}$ и как его измерить?

4. О чём говорит тангенс угла наклона входной характеристики?

Как определяется коэффициент усиления по напряжению полевого транзистора?

5. Объясните возникновение пологого участка на выходной характеристике полевого транзистора при $U_{зи}$=const. Какова протяжённость этого участка?

ЛИТЕРАТУРА

1. Парселл, Э. Берклеевский курс физики. В 5 т. Т. 2. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. ─ Москва : Наука, 1975. – 448 с.

2. Савельев, И. В., Курс физики. В 3 т. Т. 2. Электричество / И. В. Савельев. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 468 с.

3. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – Москва : Мир, 1982. – 512 с.

4. Новожилов, В. П. Руководство к лабораторным работам по электричеству. Часть 1 / В. П. Новожилов, С. Н. Костенков, Д. В. Сурнин, А. Н. Деев. – Ижевск : Ижевский полиграфический комбинат, 1991. – 180 с.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: снятие входных и выходных характеристик биполярного транзистора.

Приборы: универсальный вольтметр, специальный лабораторный стенд, сменная плата для изучения работы транзисторов.

Транзистор – это полупроводниковый прибор, позволяющий усиливать слабый электрический ток и напряжение. По принципу работы различают *биполярные* и *полевые* (униполярные) транзисторы. Биполярные транзисторы управляются электрическим током, а полевые – напряжением, под действием которого создаётся электрическое поле [1, 2]. Биполярные транзисторы (как и полевые) имеют три вывода (рис. 1).

Рис. 1. Внешний вид биполярных транзисторов различной мощности

Биполярные транзисторы (по сравнению с полевыми) обладают малой чувствительностью к статическому электричеству. Поэтому они чаще находят применение в бытовых устройствах – в системах управления двигателем автомобиля, электронике салона, системах безопасности, а также для усиления и передачи радиосигналов в радиопередатчиках, в усилителях звука для усиления сигнала с микрофона до уровня, необходимого для подачи на динамики или наушники и других. В современных электронных устройствах применяются как полевые, так и биполярные транзисторы.

1. ТЕОРИЯ

Необходимые в дальнейшем сведения о полупроводниках описаны в лабораторной работе «Изучение полупроводникового диода и выпрямителей». Здесь, напомним, что в полупроводнике *n*-типа перенос заряда (ток) осуществляется как в металлах – электронами, а в полупроводнике *p*-типа – «дыркам. «Биполярный» в названии транзистора означает, что в них электрический процесс происходит за счёт движения зарядов обоих знаков внутри полупроводника – электронов и дырок.

1.1. Принцип работы биполярного транзистора

Устройство биполярного транзистора типа *n-p-n* показано на рис. 1*а*.

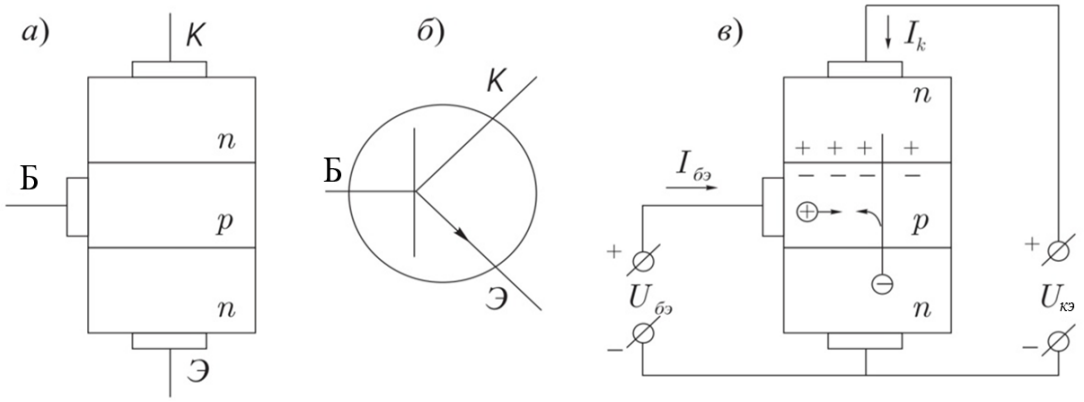


Рис.2. Биполярный транзистор: *а*) – *n-p-n*-типа; *б*) – его условное обозначение; *в*) – схема включения [3]

Он представляет собой пластинку полупроводника, в котором имеются три области с различными типами проводимости. Транзистор *n-p-n*-типа имеет среднюю область с дырочной проводимостью (*p*-типа), а две крайние – с электронной проводимостью (*n*-типа) (транзистор *p-n-p*-типа соответственно наоборот). От каждой области делают металлический отвод. Среднюю область называют ***базой (Б)***, а две крайние ***– коллектором (К)*** и ***эмиттером (Э).*** Так же называют и отводы от соответствующих областей. Обозначение транзистора типа *n-p-n* в различных электронных схемах приведено на рис.1*б* (в обозначении транзистора *p-n-p*-типа стрелка смотрит в другую сторону). Схема включения транзистора *n-p-n*-типа показана на рис.1*в*. Между базой и эмиттером подается напряжение $U_{БЭ}$ таким образом, чтобы *эмиттерный p-n*-переход (нижний на рисунке 1*в*) был открыт. Между коллектором и эмиттером подается напряжение $U_{КЭ}$ ($U_{КЭ}>U_{БЭ}$) таким образом, чтобы *коллекторный n-p*-переход (верхний на рисунке 1*в*) был заперт.

Физические процессы, протекающие внутри транзистора, выглядят следующим образом. Через эмиттер идет поток основных носителей заряда – электронов. Они создают ток эмиттера $I_Э$. Электроны инжектируются (впускаются) из эмиттера в базу (для них эмиттерный переход открыт). Так как в базе основными носителями заряда являются «дырки», то инжектированные электроны рекомбинируют с «дырками». Но из-за того, что *толщина базы очень мала*, то и количество «дырок» в ней мало, и лишь небольшая часть электронов рекомбинирует с «дырками» базы. Большинство инжектированных электронов достигает коллекторного перехода. Если бы база имела значительную толщину, то большая часть электронов эмиттерного тока, диффундируя через базу, рекомбинировала бы с «дырками» и не дошла бы до коллекторного перехода. Так как коллекторный переход работает при обратном напряжении в закрытом состоянии, то в этом переходе возникают объёмные заряды, показанные на рисунке 1*в* значками (+) и (–). Они появляются из-за обеднения области коллекторного *p*-*n*-перехода основными носителями заряда – электронами со стороны *n*- области и «дырками» со стороны *p*-области. Между объёмными зарядами возникает электрическое поле. Оно способствует движению инжектированных электронов через коллекторный переход (втягивает их в коллектор). Эти электроны создают коллекторный ток I_K. Чтобы число «дырок» в базе оставалось прежним, а не уменьшалось за счет рекомбинации, в базе образуются новые «дырки» за счет уходящих во внешнюю цепь электронов, которые и создают ток базы $I_Б$.

Примечание 1. На рисунке 2*в* направления токов противоположны направлениям движения электронов и совпадают с направлениями движения «дырок». Это связано с положительностью заряда «дырки» и отрицательностью электрона. Между рассмотренными токами, согласно правилу Кирхгофа, выполняется соотношение:

$$I_Э = I_K + I_Б . \qquad (1)$$

Как было замечено ранее, из-за малости числа «дырок» в базе по сравнению с числом инжектированных электронов:

$$I_Э >> I_Б . \qquad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует:

$$I_Э \approx I_K . \qquad (3)$$

Работу биполярного транзистора можно наглядно представить с помощью потенциальной диаграммы (рис. 3).

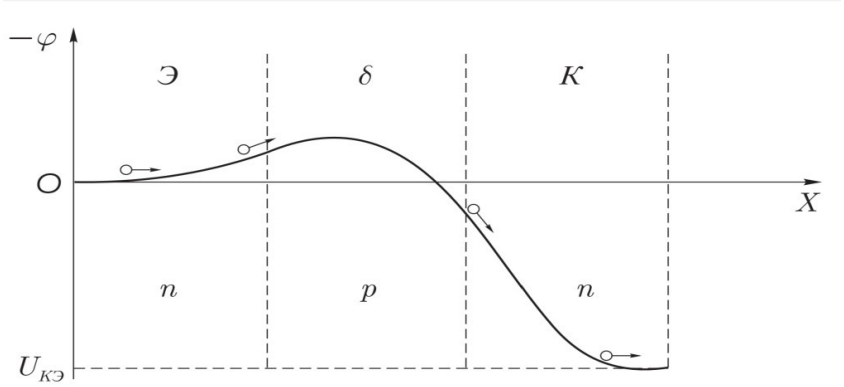


Рис. 3. Распределение потенциала между эмиттером и коллектором биполярного транзистора[3]

Здесь приведено распределение потенциала между эмиттером и коллектором. Потенциал эмиттера принят за нулевой. В эмиттерном переходе для электронов имеется небольшой потенциальный барьер. Высотой этого барьера можно управлять. При увеличении напряжения $U_{БЭ}$ барьер уменьшается. На коллекторном переходе имеется значительная разность потенциалов за счёт сильного электрического поля в области объёмных зарядов (рис. 2*в*). Электроны, двигаясь из эмиттера в базу, поднимаются на «горку», а затем ускоренно с неё спускаются через коллекторный переход. Чем выше «горка», тем меньшее количество электронов способно подняться на неё (лишь самые быстрые) и наоборот.

Примечание 2. Мы рассмотрели физические явления в транзисторе типа *n-p-n*. Подобные же процессы происходят и в транзисторе *p-n-p*-типа, но в нем меняются ролями электроны и «дырки», а также изменяются полярности напряжений и направления токов.

2. ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Зависимости между токами и напряжениями имеют очень сложный характер. Закон Ома при этом не выполняется. Все зависимости существенно нелинейны. Наиболее часто рассматриваются входные и выходные характеристики биполярного транзистора. ***Входная характеристика*** или характеристика управляющей цепи – это зависимость тока базы $I_Б$ от напряжения между базой и эмиттером $U_{БЭ}$ при постоянном напряжении между коллектором и эмиттером $U_{КЭ}$:

$$I_Б\,(U_{БЭ}),\ \text{при}\ U_{БЭ} = \text{const}\ . \qquad (4)$$

Выходная характеристика или характеристика управляемой цепи (правая цепь на рисунке 1*в*) – это зависимость:

$$I_К(U_{КЭ})\ \ \text{при}\ I_Б = \text{const}. \qquad (5)$$

Обе зависимости приведены на рис. 4.

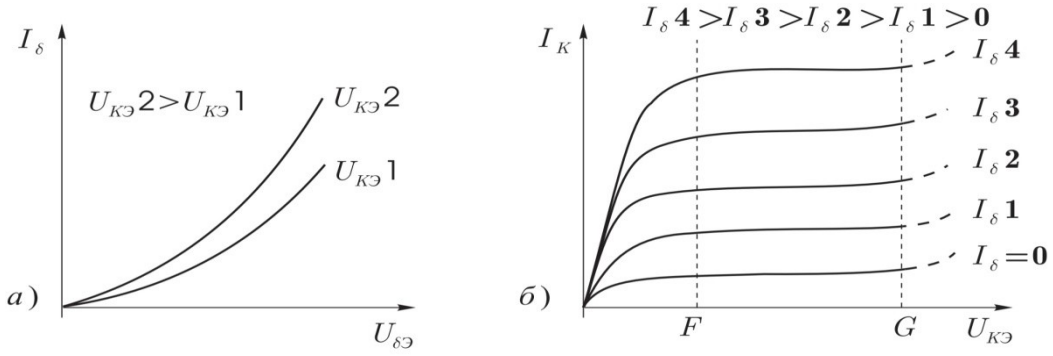


Рис. 4. Вольтамперные характеристики биполярного транзистора:
а) – входная; *б*) – выходная [3]

Входные характеристики относятся к эмиттерному переходу. Он открыт, и поэтому зависимость $I_Б(U_{БЭ})$ похожа на вольтамперную характеристику диода, работающего при прямом включении. *Выходные характеристики* относятся к коллекторному переходу, находящемуся в закрытом состоянии, поэтому зависимость $I_К(U_{КЭ})$ при $I_Б$ =0 подобна характеристике диода при обратном включении. Если $I_Б$>0, то выходная характеристика расположена выше, чем при $I_Б$=0. Увеличение тока базы означает, что увеличилось напряжение $U_{БЭ}$ (рис. 3*а*). Это увеличение приводит к уменьшению высоты барьера для электронов в области базы (рис. 3). Но тогда большее количество электронов за счёт своих тепловых скоростей сможет перевалить через барьер. Вследствие этого увеличивается ток коллектора $I_К$. Благодаря линейной зависимости $I_К$ и $I_Б$ (формула 3) пологие участки соседних выходных характеристик расположены приблизительно на одинаковых расстояниях друг от друга, если $I_Б$ пропорционально возрастает (рис. 4*б*). Существование пологого участка на выходной характеристике (*FG* на рис. 4*б*), где ток коллектора не зависит от $U_{КЭ}$ при $I_Б$ = const, объясняется просто. Хотя при увеличении $U_{КЭ}$ падение напряжения в области коллекторного перехода возрастает (высота правого склона на рис.3 растёт), и электроны быстрее скатываются с горки, но через базу их может пройти лишь фиксированное количество, определяемое высотой барье-

ра в области базы (а она остается постоянной из-за того, что $I_Б$ = const). Так как $I_К$ определяется количеством электронов, скатившихся с горки, то $I_К$ не изменяется при повышении $U_{КЭ}$. При очень большом значении $U_{КЭ}$ наступает пробой коллекторного перехода и транзистор утрачивает свои свойства.

Передаточная характеристика или *характеристика управления* биполярного транзистора – это зависимость тока коллектора $I_К$ от тока базы $I_Б$ при постоянном напряжении между коллектором и эмиттером $U_{КЭ}$ (рис. 5):

$$I_К(I_Б) \text{ при } U_{КЭ} = \text{const} . \quad (6)$$

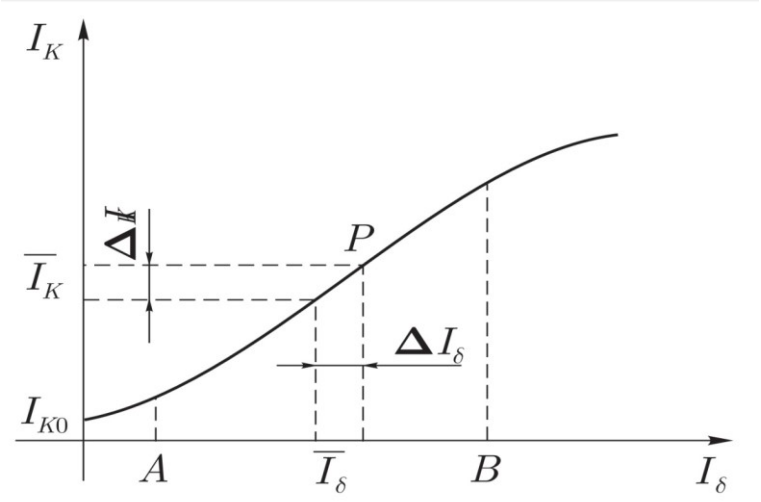


Рис. 5. Характеристика управления (передаточная характеристика) биполярного транзистора [3]

Эта характеристика снята для напряжения $U_{КЭ}$, изменяющегося в области *FG* (рис. 4*б*). Кривые, снятые при других значениях $U_{КЭ}$, совпадают с приведенной кривой, в связи с независимостью коллекторного тока $I_К$ от $U_{КЭ}$ в области *FG*. Режим работы транзистора выбирают таким, чтобы точка $P(I_б, I_к)$ находилась на середине участка *AB*, который можно считать прямолинейным. Изменение тока базы на $\Delta I_б$ (несколько микроампер) вблизи точки *P* приводит к существенному изменению тока коллектора на $\Delta I_б$ (десятки и сотни микроампер):

$$\Delta I_к >> \Delta I_б . \quad (7)$$

Величина:

$$\beta = \Delta I_к / \Delta I_б \text{ при } U_{кэ} = \text{const} \quad (8)$$

называется ***статическим коэффициентом усиления по току.***

Обычно β = 10 – 300, то есть возможно усилить слабый переменный ток при помощи транзистора в 10 – 300 раз. На базу подают дополнительное переменное напряжение, которое вызывает изменение тока базы, а на коллекторе получают во много раз усиленный переменный ток.

3.ОПИСАНИЕ СМЕННОЙ ПЛАТЫ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

На рис. 6 приведена схема для изучения работы транзисторов. На рис. 7 показан внешний вид сменной платы, на которой смонтирована данная схема.

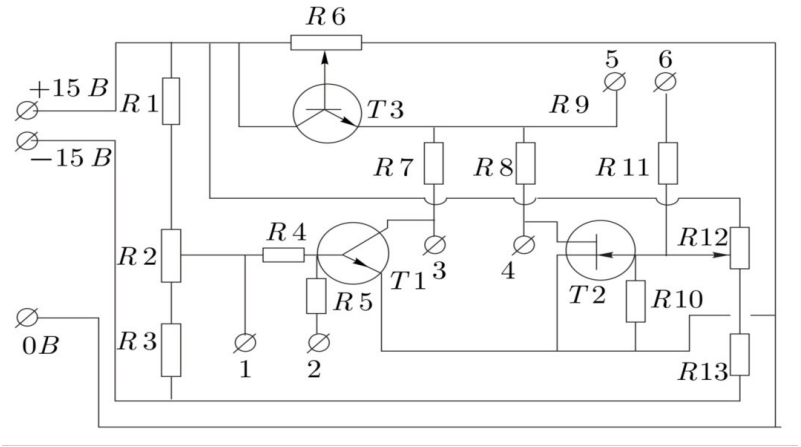


Рис. 6. Электрическая схема для изучения работы транзисторов (биполярного и полевого), *T*1– биполярный транзистор [3]

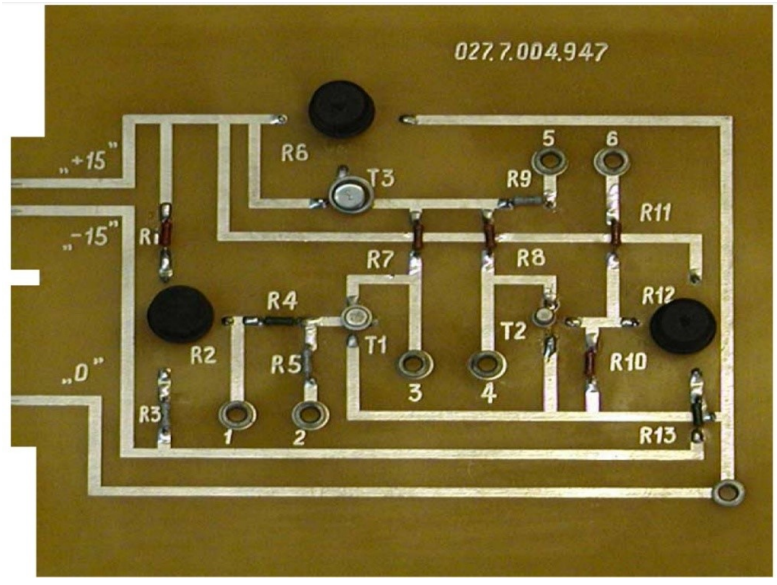


Рис. 7. Внешний вид сменной платы, на которой смонтирована электросхема по рис.6 [3]

На транзисторе Т3 и переменном сопротивлении R6 создан управляемый источник напряжения, который может регулироваться с помощью R6 и подавать в управляемые цепи изучаемых транзисторов Т1 и Т2 напряжение в пре-

делах 0-15 В. Переменное сопротивление R2, подключенное последовательно с сопротивлением R1 и R3 к источнику питания ±15В, представляет собой делитель напряжения, позволяющий регулировать с помощью R2 напряжение, которое подается в управляющую цепь биполярного транзистора Т1, что позволяет изменять ток базы $I_б$. Значения сопротивлений подобраны так, что напряжение $U_{бэ}$ может быть как положительным, так и отрицательным. Аналогично, переменное сопротивление R12 и сопротивление R13, подключенные к тому же источнику питания, образуют делитель напряжения, который подает в цепь затвора полевого транзистора Т2 напряжение $U_{зи}$; оно может регулироваться с помощью R12 и меняться от отрицательных до положительных значений. В данной работе используется лишь вольтметр, поэтому для измерения токов в управляемых цепях транзисторов Т1 и Т2 включены сопротивления R7 и R8 соответственно. Измеряя разность потенциалов U7 на концах сопротивления R7 (гнезда Г3, Г5) и зная величину сопротивления R7, можно по закону Ома найти коллекторный ток:

$$I_к = U7/R7 \qquad (9)$$

Между гнездами Г3 и Г5 кроме сопротивления R7 включено также сопротивление R9, но через него никакие токи не текут, поэтому на нет падения напряжения. Роль R9 состоит в том, что он защищает транзистор Т3 от неправильного включения вольтметра, одна из клемм которого соединена с корпусом (0 В).

Аналогично, измеряя разность потенциалов на концах R8 (Г4, Г5), можно найти ток стока $I_с$ транзистора Т2. Напряжение $U_{бэ}$ (на Т1) можно измерить, подключая вольтметр к гнезду Г2; а напряжение $U_{зи}$ (на Т2) – к гнезду Г6. Сопротивление R5 и R11 играют роль защиты (ту же, что и R9). Для измерения $U_{кэ}$ (на Т1) необходимо подключить вольтметр к Г3, а для измерения $U_{си}$ (на Т2) – к Г4. Для нахождения тока базы $I_б$ (Т1) необходимо измерить разность потенциалов на концах сопротивления R4, включенного в цепь базы, (гнезда Г1, Г3). Сопротивление R5, аналогично, играет роль защиты.

Примечание 3. **Общий провод вольтметра подключается к Г7 (0 В, корпус) и не отключается в процессе измерений!** Поэтому мы измеряем потенциалы остальных гнезд относительно корпуса. Например, чтобы найти напряжение на R4, необходимо подключить другую клемму вольтметра к Г1, снять значение потенциала U1 гнезда, а лишь потом подключить к гнезду Г2 и снять значение его потенциала U2. Тогда разность потенциалов на концах R4 равна U1-U2.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Упражнение 1. Снятие входной ВАХ биполярного транзистора $I_б$ ($U_{бэ}$) при $U_{кэ}$ = const).

Присоединить общий провод вольтметра к гнезду Г7 и не отсоединять его в процессе измерений.

1) С помощью переменного сопротивления R6 установить $U_{кэ}$=5В (контролируется вольтметром, подключенным к гнезду Г3).

2) Установить $U_{бэ}$ = 0 В с помощью R2 (Г2). Проверить $U_{кэ}$ и, если нужно, устранить расхождение с прежним значением, затем проверить $U_{бэ}$ и т. д. Всю эту процедуру назовем *методом последовательных приближений*. Эта процедура необходима, т. к., изменение одного параметра приводит к изменению другого.

3) Снять потенциалы φ_1 и φ_2 на концах сопротивления R4 (Г1 и Г). По разности этих потенциалов U4 определить ток, протекающий через R4. Это и будет ток базы $I_б$.

4) Изменить $U_{бэ}$, корректируя $U_{кэ}$ на требуемом уровне. Найти новое значение $I_{бэ}$ и т.д. Снять зависимость $I_б$ ($U_{бэ}$) при $U_{кэ}$ как больших, так и меньших нуля, поддерживая $U_{кэ}$ = const.

5) Результаты представить в виде таблицы 1.

Таблица 1.

$U_{бэ}$	φ_1	φ_2	U4	$I_б$	
					I=U4/R4 R4=… $U_{кэ}$=…

6) Снять зависимость $I_б$ ($U_{бэ}$) при $U_{кэ}$ = 10 В.

7) По результатам измерений построить график на миллиметровой бумаге.

Упражнение 2. Снятие выходной ВАХ биполярного транзистора $I_к$ ($U_{кэ}$) при $I_б$ = const). Ток базы $I_б$ определяется практически величиной R4, поскольку R4 значительно превышает сопротивление эмиттерного перехода. При этом $U_{кэ}$ будет слабо влиять на $I_б$, в связи с этим корректировка тока базы (при увеличении $U_{кэ}$) не понадобится.

1) Установить с помощью R6 $U_{кэ} = 0$ (Г3).

2) Установить с помощью R2 $I_б = 0$ (измеряя разность потенциалов на R4 (Г1 и Г2).

3) Снять разность потенциалов φ_3, φ_5 на R7 (Г3 и Г5).

4) Зная R7, найти $I_к = (\varphi_5-\varphi_3)/R7$.

5) Повторить измерения, изменяя $U_{кэ}$.

6) Результаты привести в виде таблицы, аналогично таблице 1.

7) Снять выходные характеристики при $I_б = 25$ мкА и $I_б = 50$ мкА.

8) Графики кривых всех трёх зависимостей нанести на миллиметровую бумагу.

Упражнение 3. Снятие характеристики управления биполярного транзистора $I_к(I_б)$ при $U_{кэ} = \text{const}$.

1) По результатам упражнения 2 выбрать значение $U_{кэ}$ на пологом участке выходной характеристики.

2) Установить с помощью R6 требуемое значение $U_{кэ}$(Г3) и с помощью R2 некоторую разность потенциалов на R4 (Г1 и Г2) методом последовательных приближений.

3) Измерить разности потенциалов $\varphi_1-\varphi_2$ на R4 (Г1 и Г2) и $\varphi_3-\varphi_5$ – на R7 (Г3, Г5). По ним найти $I_б$ и $I_к$.

4) Повторить измерение п.2,3 несколько раз, меняя разность потенциалов на R4 и корректируя $U_{кэ}$.

5) Результаты представить в виде таблицы и графика.

6) Найти статический коэффициент усиления по току.

Запишите выводы по результатам выполненной лабораторной работы.

Вопросы для получения допуска к лабораторной работе:

1. Что такое полупроводники *n*-типа и *p*-типа? Объясните возникновение основных носителей заряда в этих полупроводниках.

2. Какой полярности должно быть напряжение между базой и эмиттером $U_{БЭ}$ биполярного транзистора: *а*) типа *n-p-n*? и *б*) типа *p-n-p*?

3. Что такое входная характеристика биполярного транзистора?

4. Что такое выходная характеристика биполярного транзистора?

5. Что такое характеристика управления биполярного транзистора?

6. Представьте план получения ВАХ биполярного транзистора.

Вопросы к зачёту по лабораторной работе:

1. Где применяются биполярные транзисторы? Почему их называют биполярными?

2. Ток через сопротивление R7 определяется по измеренной разности потенциалов между точками 3 и 5 (гнёзда Г3 и Г5), между которыми включено два сопротивления R7 и R9. Почему в формуле (9) сопротивление R9 не учитывается?

3. Как определяется статический коэффициент усиления по току биполярного транзистора?

4. Когда наступает пробой коллекторного перехода?

ЛИТЕРАТУРА

1. Парселл, Э. Берклеевский курс физики. В 5 т. Т. 2. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. – Москва : Наука, 1975. – 448 с.

2. Савельев, И. В., Курс физики. В 3 т. Т. 2. Электричество / И. В. Савельев. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 468 с.

3. Новожилов, В. П. Руководство к лабораторным работам по электричеству. Часть 1 / В. П. Новожилов, С. Н. Костенков, Д. В. Сурнин, А. Н. Деев. – Ижевск : Ижевский полиграфический комбинат, 1991. – 180 с.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: изучение зависимости коэффициента передачи трансформатора от частоты переменного тока.

Приборы и материалы: Осциллограф, звуковой генератор, омметр, универсальный лабораторный стенд, сменная плата.

1. ТЕОРИЯ

Трансформатор – это устройство для повышения или понижения напряжения **переменного тока**, принцип действия которого основан на явлении взаимной индукции. *Напряжение постоянного тока трансформатор не преобразует.* Устройство трансформатора схематически изображено на рис. 1.

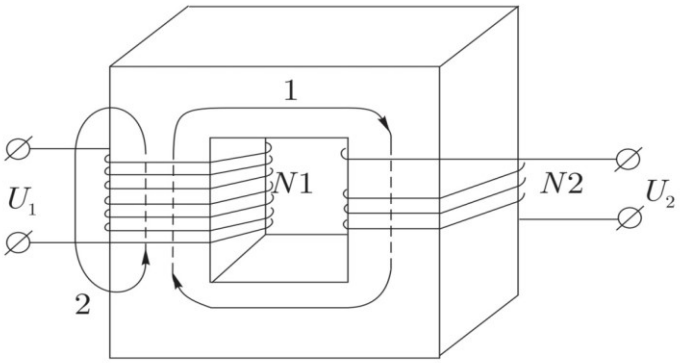


Рис. 1. Схема устройства трансформатора [3]

Трансформатор имеет первичную обмотку (катушку) с числом витков N_1 и вторичную обмотку с числом витков N_2 (рис. 1). Внутри витков находится сердечник 1, изготовленный из магнитомягкого ферромагнетика с большим значением относительной магнитной проницаемости. Концы катушки первичной обмотки соединяются с источником переменного тока, ЭДС которого имеет вид

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \cos(\omega t + \varphi) \tag{1}$$

Под действием переменной ЭДС ε_1 по первичной обмотке протекает переменный ток $I_1=I_1(t)$, создающий переменный магнитный поток $\Phi_1(t)$, который почти полностью сосредоточен в сердечнике. При этом поток $\Phi_1(t)$, пронизывающий N_1 витков первичной обмотки, выражается через поток $\Phi_0(t)$, пронизывающий один виток катушки:

$$\Phi_1(t), = N_1\Phi_0(t), \tag{2}$$

а поток $\Phi_2(t)$, пронизывающий N_2 витков вторичной обмотки также выражается через $\Phi_0(t)$:

$$\Phi_2(t) = N_2\Phi_0(t). \tag{3}$$

Обмотки трансформатора охватывают одинаковую площадь сечения сердечника, а длина одного витка каждой обмотки практически равна периметру этого сечения. Поэтому поток $\Phi_0(t)$, пронизывающий один виток катушки, *одинаковый* для одного витка любой катушки, намотанной на общий сердечник постоянного сечения. Поток $\Phi_1(t)$ создает в первичной обмотке ЭДС самоиндукции ε_s, а поток $\Phi_2(t)$ создает во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции ε_2. ЭДС самоиндукции ε_s в первичной обмотке определяется по закону Фарадея для электромагнитной индукции:

$$\varepsilon_s = -\frac{d(\Phi_0 n_1)}{dt} \quad . \tag{4}$$

ЭДС взаимной индукции ε_2 во вторичной обмотке определяется также по закону Фарадея:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d(\Phi_0 n_2)}{dt} \tag{5}$$

Для расчета трансформатора можно применить первый и второй законы Кирхгофа (если длина электромагнитной волны, которая соответствует частоте колебаний напряжения первичной обмотки, много больше размеров трансформатора). При этом предполагается, что магнитная проницаемость сердечника не зависит от величины магнитного поля. Из второго закона Кирхгофа для замкнутого контура первичной обмотки $I_1R_1=\varepsilon_1 + \varepsilon_s$ и формулы (4) получаем:

$$I_1R_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_s = \varepsilon_1 - \frac{d(\Phi_0 n_1)}{dt}\,. \tag{6}$$

Будем считать, что падение напряжения I_1R_1 мало по сравнению с ε_1 и ε_s:

$$\varepsilon_1 \approx \frac{d(\Phi_0 n_1)}{dt}\,. \tag{7}$$

Из (5) и (7) выразим $\frac{d\Phi_0}{dt}$:

$$\frac{d\Phi_0}{dt} = \frac{\varepsilon_1}{n_1} = -\frac{\varepsilon_2}{n_2}\,, \tag{8}$$

тогда

$$\varepsilon_2 = -\varepsilon_1 \frac{n_2}{n_1} \quad , \tag{9}$$

где знак минус показывает, что ЭДС в первичной и вторичной обмотках противоположны по фазе. Отношение $\frac{N_2}{N_1}$ называется **коэффициентом трансформации.** Если $\frac{N_2}{N_1}>1$, то трансформатор называется повышающим, если $\frac{N_2}{N_1}<1$ – трансформатор понижающий.

При подключении активного сопротивления $R_Н$ (нагрузки) к вторичной обмотке падение напряжения на нём $U_2 = I_2 R_Н$ будет меньше ЭДС ε_2, так как происходит падение напряжения $U_{L2}=L_2(dI_2/dt)$ ещё и на индуктивности L_2 вторичной обмотки. **Коэффициентом передачи** трансформатора $K(f)$ называется отношение напряжения на вторичной обмотке U_2 к напряжению на первичной обмотке U_1 и зависит от частоты переменного тока f:

$$K(f) = U_2/U_1. \tag{10}$$

Граничная частота $f_н$, **ниже** которой становится существенным понижение коэффициента передачи, называется *нижней граничной частотой*, а граничная частота $f_в$, **выше** которой также существенно снижается коэффициент передачи, называется *верхней граничной частотой.* Разность этих частот $\Delta f = f_в - f_н$ определяет *полосу пропускания* трансформатора. При этом в области средних частот $f_{ср}$ ($f_{ср}=(f_в+f_н)/2$) коэффициент передачи K от частоты f практически не зависит: $K(f_н<f_{ср}<f_в)$=const. Это позволяет определить коэффициент трансформации измерив K на холостом ходу (когда $R_Н \to \infty$) в области средних частот. При этом напряжение вторичной обмотки U_2 имеет вид:

$$U_2 \cong U_1 \frac{N_2}{N_1}$$

Граничные частоты $f_н$ и $f_в$, а также соответствующая им *полоса пропускания* Δf являются важными характеристиками трансформатора, поскольку на частоте вне полосы пропускания существенно снижается эффективность передачи электроэнергии с первичной обмотки на вторичную.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки показана на рис. 2. Первичная обмотка, имеющая N_1 витков, подключена между точками A и D. Между ними сделаны отводы B и C. При этом между точками C и D число витков равно $N_1/4$, а между точками B и D – $N_1/2$. Вторичная обмотка имеет N_2 витков.

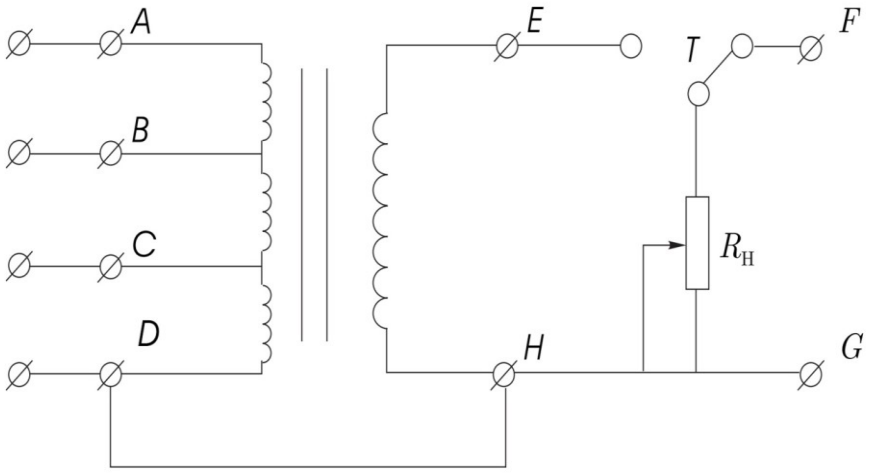


Рис. 2. Принципиальная схема для изучения работы трансформатора [3]

На сменной плате смонтированы трансформатор, переменное сопротивление нагрузки $R_н$ и тумблер *T*, с помощью которого сопротивление нагрузки $R_н$ подключается к вторичной обмотке. Измерить значение сопротивления нагрузки $R_н$ можно с помощью омметра, подключив его между точками *F* и *G*, когда тумблер *T* подключён к точке *F*.

Для снятия частотной зависимости коэффициента передачи *K*(*f*) например, между точкой *D* и отводом *A* первичной обмотки (режим «*A*») подключается звуковой генератор при помощи первого кабеля. При этом общий провод первого кабеля (его экранирующая оплётка – обычно выводится проводом чёрного цвета) подключается к точке *D*.

Для измерения напряжения U_2 на вторичной обмотке служит один из каналов осциллографа, который подключается в точке *E* при помощи второго кабеля так, что его общий провод подключается к точке *H*.

Для измерения напряжения U_1 на первичной обмотке служит другой канал осциллографа, который подключается параллельно звуковому генератору при помощи третьего кабеля. После измерения напряжений U_1 и U_2 на одной частоте следует перейти к следующей частоте генератора из рекомендуемого ряда частот (см. ниже упражнение 1).

3. ЗАДАНИЕ

Упражнение 1. Контролируя величину сопротивления нагрузки омметром, установите его равным ¼ от его максимального значения. Подключите общий провод осциллографа к точке *G*, а общий провод генератора к точке *D* сменной платы. Подайте выходное напряжение с генератора в точку *A* (что соответствует режиму *«A»*). При изменении частоты генератора поддерживать постоянной амплитуду колебаний напряжения на первичной обмотке (контролируя по осциллографу, подключённому в точке *A*). Измерьте напряжение на

вторичной обмотке трансформатора в зависимости от частоты *f* (рекомендуемые частоты *f*: 20, 40, 60, 80, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 2000… 10^6Гц). Постройте график зависимости коэффициента передачи *K* от десятичного логарифма частоты *f*. Определите по графику значения нижней и верхней граничных частот по уровню коэффициента передачи $0{,}7(\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0{,}7)$ своего максимального значения (рис.3).

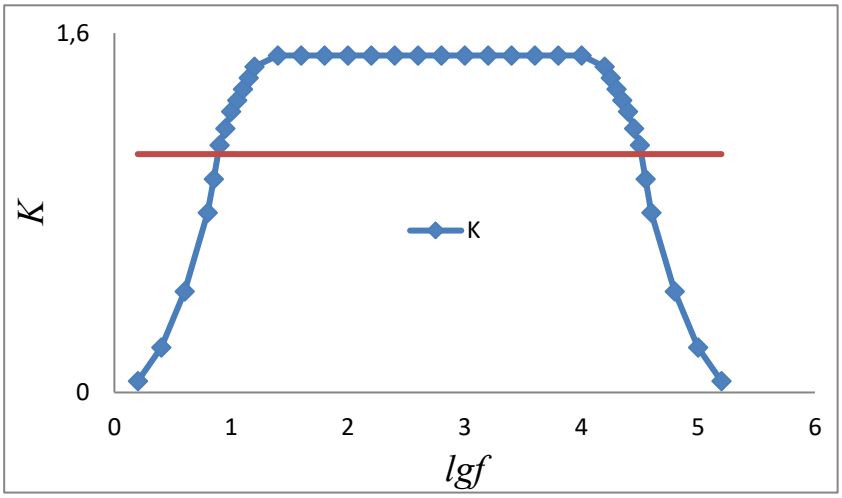


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи *K* от десятичного логарифма частоты *f*

Проделать аналогичные измерения для других значений числа витков первичной обмотки, подавая переменное напряжение в точки *B* и *C* (что соответствует режимам *«B»* и *«C»*). Построить графики частотных зависимостей коэффициентов передачи в режимах «*A», «B»* и *«C»*. Определить граничные частоты. Объяснить полученные результаты.

Упражнение 2. Переключить тумблер *T* к точке *F* и построить график зависимости коэффициента передачи *K* от десятичного логарифма частоты *f* **на холостом ходу** в режиме, заданном преподавателем. Объяснить полученные результаты.

Запишите выводы по результатам выполненной лабораторной работы.

Вопросы для получения допуска к лабораторной работе:

1. Сформулируйте закон электромагнитной индукции Фарадея. Почему напряжение постоянного тока трансформатор не преобразует?

2. Объясните возникновение ЭДС самоиндукции в первичной обмотке и возникновение ЭДС взаимной индукции во вторичной обмотке трансформатора.

3. Что такое коэффициент передачи трансформатора и в чём его отличие от коэффициента трансформации?

4. Представьте план измерения коэффициент передачи трансформатора K в зависимости от десятичного логарифма частоты f в режимах «*A», «B»* и *«C»*.

Вопросы к зачёту по лабораторной работе:

1. Почему граничные частоты $f_н$ и $f_в$, а также соответствующая им *полоса пропускания* Δf являются важными характеристиками трансформатора?

2. Что означают выражения «холостой ход (ХХ)», «короткое замыкание (КЗ)» и «режим нагрузки» для трансформатора?

3. Предложите способ определения числа витков в обмотке трансформатора, не разбирая его.

4. К первичной обмотке трансформатора подключена «пальчиковая» батарея (имеется в свободной продаже) с ЭДС, равной 1,5 В. Чему равна ЭДС вторичной обмотки ε_2, если первичная обмотка трансформатора состоит из N_1=100 витков, а вторичная обмотка из N_2=1000 витков?

ЛИТЕРАТУРА

1. Парселл, Э. Берклеевский курс физики. В 5 т. Т. 2. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. – Москва : Наука, 1975. – 448 с.

2. Савельев, И. В. Курс физики. В 3 т. Т. 2. Электричество / И. В. Савельев. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 468 с.

3. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – Москва : Мир, 1982. – 512 с.

4. Новожилов, В. П. Руководство к лабораторным работам по электричеству. Часть 1 / В. П. Новожилов, С. Н. Костенков, Д. В. Сурнин, А. Н. Деев. – Ижевск : Ижевский полиграфический комбинат, 1991. – 180 с.

ЗАКОН БИО-САВАРА-ЛАПЛАСА. ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КАТУШКИ С ТОКОМ

Цель работы: Исследование магнитного поля вдоль оси катушек с различными параметрами на основе закона Био-Савара-Лапласа и теоремы о циркуляции вектора магнитной индукции $\vec{B}$.

Оборудование.

Индукционная катушка, 300 витков, *d*=41 мм, *l*=165 мм.

Индукционная катушка, 300 витков, *d*=33 мм, *l*=165 мм.

Индукционная катушка, 300 витков, *d*=26 мм, *l*=165 мм.

Индукционная катушка, 200 витков, *d*=41 мм, *l*=110 мм.

Индукционная катушка, 100 витков, *d*=41 мм, *l*=55 мм.

Индукционная катушка, 150 витков, *d*=26 мм, *l*=165 мм.

Индукционная катушка, 75 витков, *d*=26 мм, *l*=165 мм.

Датчик Холла, аксиальный

Тесламетр

Источник питания, универсальный

Линейка демонстрационная,*l*=1000 мм.

Цилиндрическая опора –PASS,

Струбцина, 2 шт.

Подставка под катушки.

Соединительный шнур, *l* = 500 мм, синий.

Соединительный шнур, *l* = 500 мм, красный, 2 шт.

Темы для изучения.

Магнитное поле, его характеристики: вектор магнитной индукции $\vec{B}$, напряженность магнитного поля $\vec{H}$, закон Био-Савара-Лапласа, теорема о циркуляции векторов $\vec{B}$ и $\vec{H}$ для случая постоянного тока, магнитное поле кругового тока и катушки с током, эффект Холла [1-4].

1. ТЕОРИЯ

В пространстве окружающем проводник с током *I* существует магнитное поле, характеризуемое вектором магнитной индукции $\vec{B}$. Пусть постоянный ток I течёт по криволинейному проводнику *l*, находящемуся в вакууме. Ори-

ентацию в пространстве малого участка кривой *dl* зададим вектором $\vec{dl}$, направленным вдоль тока *I* по касательной к кривой (рис.1).

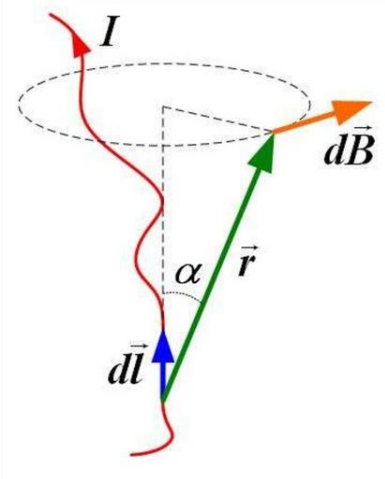


Рис. 1. Магнитное поле $\vec{dB}$, создаваемое элементом тока *Idl* в заданной радиус- вектором $\vec{r}$ точке пространства

Малое магнитное поле $\vec{dB}$, в заданной радиус- вектором $\vec{r}$ точке пространства, определяется законом Био-Савара-Лапласа:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi}\mu\frac{I\vec{dl}}{r^3}\times\vec{r}, \qquad (1)$$

где μ_0=4π·10^{-7} Гн/м — магнитная постоянная, μ — магнитная проницаемость вещества, окружающего проводник с током (в вакууме μ =1). Величина (модуль) вектора $d\vec{B}$ в системе СИ имеет вид

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

где α – угол между векторами $\vec{dl}$ и $\vec{r}$.

Закон Био – Савара – Лапласа в магнитостатике аналогичен закону Кулона в электростатике. Он широко используется для расчёта магнитного поля по заданному распределению токов. Для магнитного поля, как и для электрического поля, выполняется **принцип суперпозиции: магнитное поле, создаваемое несколькими токами равно векторной сумме магнитных полей, создаваемых каждым током в отдельности**. По принципу суперпозиции магнитная индукция $\vec{B}$ в произвольной точке магнитного поля проводника с током будет суммой большого (в пределе бесконечно большого) числа малых (бесконечно малых) слагаемых, то есть интегралом:

$$\vec{B} = \int_l \vec{dB}\ , \qquad (3)$$

где интегрирование проводится по всей длине проводника *l*.

Применяя принцип суперпозиции, можно найти, например, величину (модуль) вектора магнитной индукции в точке x на оси круглого витка радиусом R, по которому течёт ток I (рис. 2). Вектор магнитной индукции $d\vec{B}$ в точке A имеет показанное на рис. 2 направление и величину

$$dB = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2}, \tag{4}$$

поскольку угол между векторами $\vec{dl}$ и $\vec{r}$ равен 90°.

Вектор $d\vec{B}$ можно разложить на составляющие $\overrightarrow{dB}_{\parallel}$ и $\overrightarrow{dB}_{\perp}$, соответственно параллельную и перпендикулярную оси витка (рис. 2)

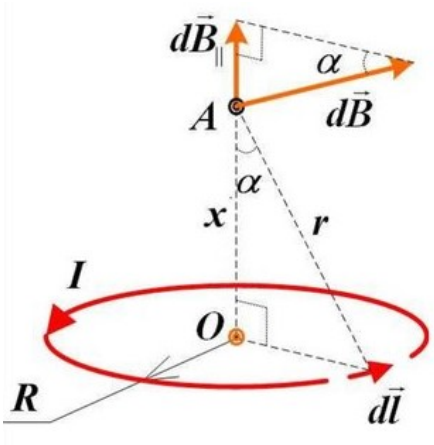


Рис. 2. К определению магнитного поля на оси кругового тока
(здесь α – угол между OA и гипотенузой r)

При суммировании по всем элементам тока перпендикулярные составляющие $\overrightarrow{dB}_{\perp}$ (на рис. 2 не показаны) взаимно сократятся. Поэтому вектор $\vec{B}$ будет направлен вдоль оси, а его величина определяется интегрированием в соответствии с принципом суперпозиции:

$$B(x) = \int_l dB_{\parallel} = \int_l dB \sin\alpha = \int_l dB \frac{R}{r} = \int_l \frac{R}{(x^2+R^2)^{1/2}} dB,$$

где x – расстояние от точки A до центра витка и $r^2=x^2+R^2$. Подставим сюда dB из (4) и после интегрирования вдоль витка длиной $2\pi R$

$$B(x) = \frac{\mu_0 IR}{4\pi(x^2+R^2)^{3/2}} \int_l dl = \frac{\mu_0 I 2\pi R^2}{4\pi(x^2+R^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 IR^2}{2(x^2+R^2)^{3/2}}$$

получим зависимость $B(x)$ в среде с магнитной проницаемостью μ

$$B(x) = \frac{\mu_0 \mu IR^2}{2(x^2+R^2)^{3/2}} \tag{5}$$

Величина магнитной индукции $B(x)$ на оси катушки длиной l, радиусом R и количеством витков на единицу длины n определяется по формуле:

$$B(x)=\frac{\mu_0\mu In}{2}\left(\frac{a}{\sqrt{R^2+a^2}}+\frac{b}{\sqrt{R^2+b^2}}\right), \qquad (6)$$

где $a=l/2-x$ и $b=l/2+x$. Максимальное значение $B(x)$, выраженное как

$$B_{\max}(x=0)=\mu_0\mu In\frac{l}{\sqrt{4R^2+l^2}} \qquad (7)$$

будет в центре катушки, который удобно принять за начало отсчёта x.

Запишем теорему о циркуляции вектора магнитной индукции по замкнутому контуру или закон полного тока для магнитного поля в вакууме:

Циркуляция вектора магнитной индукции *B* по замкнутому контуру *l* равна магнитной постоянной μ_0, умноженной на *алгебраическую* сумму токов внутри этого замкнутого контура:

$$\oint_l \vec{B}\,d\vec{l}=\mu_0\sum_{i=1}^{N} I_i \qquad (8)$$

Знак тока в сумме положительный, если со стрелки направления тока обход контура кажется происходящим против часовой стрелки (правило правого винта).

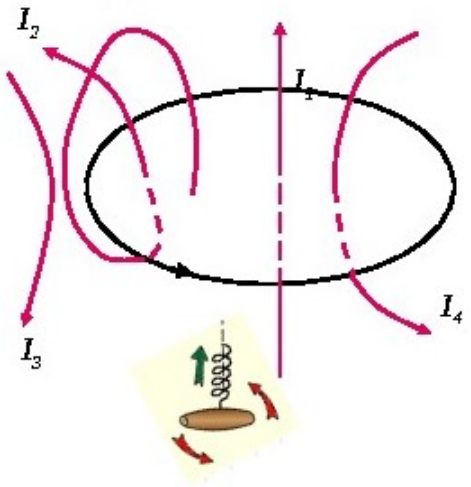


Рис. 3. К теореме о циркуляции магнитной индукции по замкнутому контуру. Замкнутый контур охватывает токи I_1, I_2 и I_4 (ток I_3 вне замкнутого контура)

На рис. 3 замкнутый контур охватывает токи I_1, I_2 и I_4 (ток I_3 вне замкнутого контура), тогда сумма в (8) будет иметь вид: $I_1 + 2I_2 - I_4$.

Для соленоида – длинной катушки, когда $l >> R$. Магнитное поле внутри соленоида можно получить на основе теоремы о циркуляции (8), если пренебречь магнитным полем вне катушки, а поле внутри катушки считать постоянным:

$$B(x)=\mu_0\cdot\mu\cdot n\cdot I=const\,. \qquad (9)$$

2. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Соберите установку, как показано на рис. 4.

Уточнение. Источник питания работает в режиме постоянного тока, если над регулятором тока горит красный светодиод. **Внимание.** Не меняйте значение силы тока во время эксперимента, но перед тем как разомкнуть цепь в конце опыта обязательно уменьшите напряжение до нуля!

Рис. 4. Экспериментальная установка для измерения магнитного поля

Задание 1. Исследование магнитной индукции вдоль оси катушки с током, проверка закона Био-Савара-Лапласа (проводится с катушкой в 300 витков, d=26 мм).

1. Перед включением тесламетра, убедитесь, что переключатель пределов измерений установлен в положение 20 мТл, и прибор включен на измерение постоянных магнитных полей (тумблер переключения режима измерений, расположенный в центральной части лицевой панели прибора, находится в положении «Direct Field»).

2. Включив тесламетр, дайте ему прогреться в течение 5 минут, после чего произведите установку прибора на «0» с помощью соответствующей рукоятки, расположенной в правой части лицевой панели прибора. В дальнейшем, перед каждой новой серией измерений проверяйте установку прибора на «0».

3. Перед включением источника питания убедитесь, что рукоятки регулировки напряжения («V») и силы тока («A») выведены в крайнее левое положение. Включите источник питания и установите силу тока в катушке равной 1А. Для этого рукоятку «V» вращайте вправо до тех пор, пока не загорится красный светодиод над рукояткой «A», после чего еще немного доверните её вправо. Теперь рукояткой регулировки силы тока «A» можно установить требуе-

мое значение силы тока в катушке. Поместите датчик Холла в катушку так, чтобы он измерял магнитную индукцию на оси катушки в её центре. При этом используйте соответствующую (белую) нанесенную на датчик вспомогательную метку. Запишите показания тесламетра.

4. Проведите измерения магнитной индукции, смещая датчик влево вдоль оси катушки с шагом 10мм до тех пор, пока измерительная головка датчика не окажется вне катушки. Выведите рукоятки «V» и «A» в крайнее левое положение, тем самым подготовив прибор к проведению новой серии измерений.

5. По результатам измерений заполните таблицу. Таблица должна также включать вычисленные по формуле (6) значения магнитной индукции в соответствующих точках.

6. Представьте результаты в виде графика зависимости $B(x)$, расположив начало отсчёта x в центре катушки. График должен включать как экспериментальную, так и расчётную кривые.

7. Оцените значение магнитной постоянной μ_0 по формулам (7) и (9) при $\mu=1$.

Задание 2. Исследование зависимости величины магнитной индукции вдоль оси катушки с током от числа витков и длины катушки.

Задание 2а. Зависимость магнитной индукции от числа витков при фиксированных длине и диаметре катушек. Используются катушки диаметром 26мм, длиной 165 мм, с числом витков 300, 150, 75.

1. В этой и всех последующих сериях измерений сила тока в катушках устанавливается равной 1А. Измерения проводятся подобно тому, как это описано в Задании 1.

2. Результаты представьте в виде таблиц и графика, аналогичного графику, представленному на рис.5.

Задание 2б. Зависимость магнитной индукции от длины катушки.

С катушками d=41 мм и числом витков 300, 200, 100 изучите зависимость величины магнитной индукции при одинаковых диаметрах, но разной длине катушек и числе витков, однако, при одинаковом числе витков на единицу длины. Результаты представьте в виде таблиц и графика. Пример одного из получающихся графиков представлен на рис. 5.

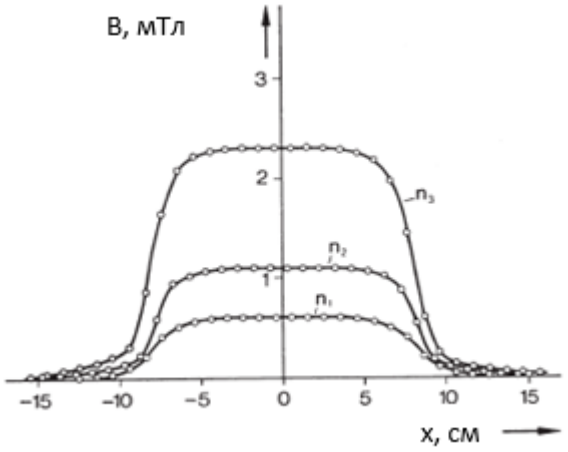


Рис. 5. Зависимость величины магнитной индукции вдоль оси катушек при различном количестве витков, но одинаковых диаметрах и длинах катушек.

Запишите выводы по результатам выполненной лабораторной работы.

Вопросы для получения допуска к лабораторной работе:

1. В каком случае в пространстве окружающем проводник существует магнитное поле? Какой величиной характеризуется магнитное поле?

2. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа. Как определить направление вектора магнитной индукции, создаваемого элементом тока в данной точке?

3. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора $\vec{B}$ системе СИ.

4. Изобразите силовые линии магнитного поля катушки с током. Какую катушку называют соленоидом?

5. По какой формуле следует ожидать более точный результат оценки магнитной постоянной μ_0?

6. Представьте план получения зависимости величины магнитной индукции вдоль оси катушки с током от числа витков и длины катушки.

Вопросы к зачёту по лабораторной работе:

1. Сформулируйте принцип суперпозиции для магнитного поля. Исходя из формулы (2) для величины (модуля) вектора $d\vec{B}$ в системе СИ получите величину магнитного поля в центре кругового тока.

2. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора $\vec{B}$. Считая магнитное поле постоянным внутри катушки и малым вне катушки, получите формулу 9 для соленоида.

3. В чём состоит эффекта Холла? Какую величину измеряют датчики Холла?

4. Поясните полученные графики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парселл, Э. Берклеевский курс физики. В 5 т. Т. 2. Электричество и магнетизм / Э. Парселл. – Москва : Наука, 1975. – 448 с.

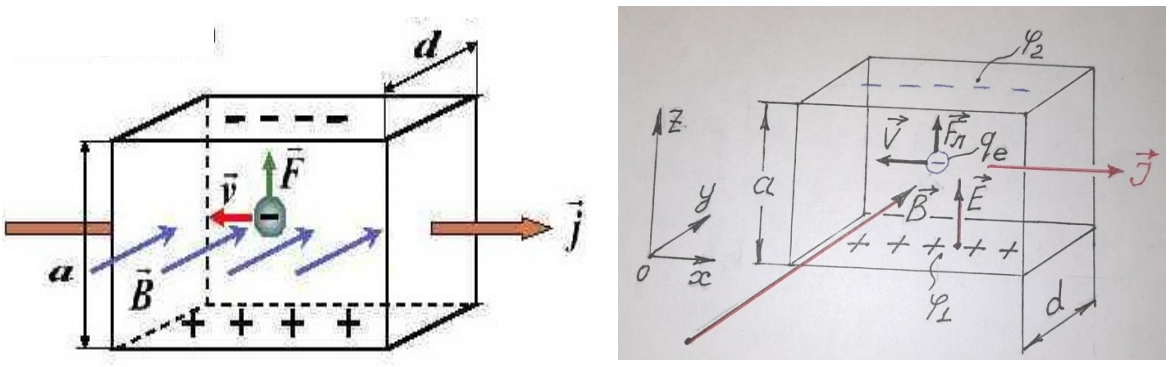
2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 3. Электричество/ Д. В. Сивухин. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 656 с.

3. Савельев, И. В. Курс физики. В 3 т. Т. 2. Электричество / И. В. Савельев. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 468 с.

4. Джанколи, Д. Физика. В 2 т. Т.2 / Д. Джанколи. – Москва : Мир, 1989. – 668 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Эффект Холла



а) *б*)

Рис. 1П. К пояснению эффекта Холла; *а*) – на электрон в магнитном поле действует сила Лоренца $\vec{F}$; *б*) – трёхмерность эффекта Холла: векторы $\vec{B}$, $\vec{J}$ и $\vec{E}$ взаимно перпендикулярны

На этом эффекте работают датчика Холла, широко применяемые в современной электронике. Поместим проводящую пластину с током *I* плотностью $\vec{J}$ (очевидно, ток $I = JS = Jad$) в магнитное поле $\vec{B} \perp \vec{J}$ (рис. 1П) При этом электроны будут двигаться против вектора $\vec{J}$. На электрон действует сила Лоренца, направление которой определяется по правилу левой руки, но для положительного заряда. Так как электрон отрицательно заряженная частица, то сила Лоренца будет направлена так, как показано на рис.1П. Поэтому верхний торец пластины будет заряжаться отрицательно, а нижний торец – положительно. Электрическое поле $\vec{E}$ будет направлено от положительных зарядов (так же, как в плоском конденсаторе). Таким образом, сила Лоренца, действуя на электроны, создаёт положительные и отрицательные заряды на расстоянии *a*. Но разноимённые заряды притягиваются кулоновской силой $\overrightarrow{F_K} = q_e\vec{E}$. Стационарное распределение положительных и отрицательных зарядов в *поперечном* направлении установится тогда, когда сила Кулона и сила Лоренца станут равными по величине, (но противоположно направленными): $\overrightarrow{F_K} = -\overrightarrow{F_Л}$. Приравняем модули этих сил:

$$q_e E = q_e VB \qquad \text{или} \qquad E = VB\,. \tag{1П}$$

Величина напряжённости электрического поля *E* определяется разностью потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ на расстоянии *a* (рис. 1Пб) также как в плоском конденсаторе:

$$E = \frac{\Delta\varphi}{a} = VB\,. \qquad (2П)$$

Явление возникновения поперечной разности потенциалов *Δφ* в проводнике с постоянным током *I* в магнитном поле *B* называется эффектом Холла (открыт Э. Холлом в 1879 году в тонких пластинках золота), а

$$\Delta\varphi = aVB \qquad (3П)$$

называют *холловской разностью потенциалов*.

Из рис. 1Пб видно, что эффект Холла проявляется в трёхмерном пространстве: плотность тока $\vec{J}$ направлена вдоль оси *x*, вектор магнитной индукции $\vec{B}$ – вдоль оси *y*, а холловская разность потенциалов *Δφ* – вдоль оси *z*. В формуле (3П) модуль скорости движения электронов *V* является их средней скоростью, через которую выражается модуль плотности тока *J* как

$$J = q_e n V\,, \qquad (4П)$$

где q_e – заряд электрона, *n* –концентрация электронов. Поскольку $I = JS = Jad = q_e n V a d$, то скорость *V* выражается через ток *I* :

$$V = \frac{I}{q_e n a d} \quad . \qquad (5П)$$

Тогда холловская разность потенциалов (3П) будет иметь вид

$$\Delta\varphi = \frac{IBa}{q_e n a d} = \frac{1}{q_e n} \cdot \frac{IB}{d} = R\frac{IB}{d} \quad ,$$

или

$$\Delta\varphi = R\frac{IB}{d} \quad , \qquad (6П)$$

где $R = \frac{1}{q_e n}$ — постоянная Холла (разумеется, постоянная Холла *R* это **не сопротивление**, хотя обозначение такое же). Измеряя *R можно определить*:

1) концентрацию носителей тока в проводнике (полупроводнике);

2) знак носителей тока.

Если *R* – отрицательная величина, то носителями тока являются электроны; если *R* положительная величина, то носителями являются положительные заряды (дырки в полупроводниках). Для определения *R* по формуле (6П) надо

измерить разность потенциалов $\Delta\varphi$ (в металлах микровольты) при помощи вольтметра, ток I при помощи амперметра, индукцию магнитного поля B при помощи тесламетра и толщину пластины d при помощи штангенциркуля (или микрометра). Концентрация носителей заряда в полупроводниках мала по сравнению с металлами, поэтому постоянная Холла металлов, намного меньше, чем полупроводников. В связи с этим, для создания заметной холловской разности потенциалов в металлах необходима значительная сила тока, чем в полупроводниках.

ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ИЗДАНИЯ:

Интерфейс электронного издания (в формате pdf) можно условно разделить на 2 части.

Левая навигационная часть (закладки) включает в себя содержание книги с возможностью перехода к тексту соответствующей главы по левому щелчку компьютерной мыши.

Центральная часть отображает содержание текущего раздела. В тексте могут использоваться ссылки, позволяющие более подробно раскрыть содержание некоторых понятий.

МИНИМАЛЬНЫЕ СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ:

Celeron 1600 Mhz; 128 Мб RAM; Windows XP/7/8 и выше; 8x DVD-ROM; разрешение экрана 1024×768 или выше; программа для просмотра pdf.

СВЕДЕНИЯ О ЛИЦАХ, ОСУЩЕСТВЛЯВШИХ ТЕХНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ И ПОДГОТОВКУ МАТЕРИАЛОВ:

Оформление электронного издания : Издательский центр «Удмуртский университет».

Компьютерная верстка: В. В. Данилова

Авторская редакция

Подписано к использованию 31.08.2026
Объем электронного издания 5,2 Мб
Издательский центр «Удмуртский университет»
426034, г. Ижевск, ул. Ломоносова, д. 4Б, каб. 021
Тел. : +7(3412)263-751 E-mail: editorial@udsu.ru