

А.Д. Бакун, С.Л. Тимошенко, Д.Э. Кравцов, Н.Р. Романов,
П.Ю. Кадыков, И.В. Тронин, А.М. Грехов, А.А. Белогорлов,
А.А. Волков, Н.С. Воронова

ФИЗИКА ДЛЯ ИНЖЕНЕРА:

практикум по экспериментальной физике



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»**

А.Д. Бакун, С.Л. Тимошенко, Д.Э. Кравцов, Н.Р. Романов, П.Ю. Кадыков, Д.Н. Кузнецов, А.Д.
Суринович, П.Н. Некрасов, И.В. Тронин, А.М. Грехов, А.А. Белогорлов, А.А. Волков, Н.С.
Воронова

ФИЗИКА ДЛЯ ИНЖЕНЕРА: ПРАКТИКУМ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ

для учащихся 10-11 классов школ физико-математического и инженерного профиля

УДК 53.07:373.5

ББК 22.3я72

Б61

Физика для инженера: практикум по экспериментальной физике: Учебно-методическое пособие/ А.Д. Бакун, С.Л. Тимошенко, Д.Э. Кравцов, Н.Р. Романов, П.Ю. Кадыков, Д.Н. Кузнецов, А.Д. Суринович, П.Н. Некрасов, И.В. Тронин, А.М. Грехов, А.А. Белогорлов, А.А. Волков, Н.С. Воронова. Под общ. ред. А.Д. Бакуна. [Электронный ресурс]. – М.: НИЯУ МИФИ, 2025. – 253 с.

Пособие является основным методическим инструментом для проведения занятий по экспериментальной физике для учащихся 10-11 классов инженерного профиля. Приведены основы современных методов статистической обработки экспериментальных данных на базе нормального распределения, основы графического анализа и грамотного представления результатов измерений, показаны способы обработки данных с помощью специализированных программ и языка Python. Цель пособия — дать возможность школьникам с помощью относительно простых и понятных лабораторных работ погрузиться в мир современной инженерной деятельности, понять связь таких предметов как физика, технология и информатика. С помощью приведенных в пособии кейсовых заданий можно познакомиться с проектным методом работы, широко применяемым в научной и инженерной деятельности, а также подготовиться к практическим олимпиадам и конкурсам.

ISBN

©

small Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 2025

Оглавление

1	ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	5
1.1	Виды погрешностей	6
1.2	Доверительный интервал и доверительная вероятность	8
1.3	Вычисление погрешностей	9
1.4	Погрешности косвенных измерений	20
1.5	Точность задания погрешностей	24
1.6	Построение и обработка графиков	26
1.7	Обработка данных экспериментов с помощью электронных таблиц	40
1.7.1	Подготовка данных к обработке и расчет прямых измерений	40
1.7.2	Анализ данных: расчеты и функции LibreOffice Calc для обработки косвенных измерений	41
1.7.3	Работа с графиками и визуализацией данных	42
1.8	Обработка данных с помощью языка Python	42
1.8.1	Загрузка данных в Python	43
1.8.2	Обработка данных прямых измерений	46
1.8.3	Обработка данных косвенных измерений	47
1.8.4	Библиотека Matplotlib	48
1.9	Выводы	54
2	МЕХАНИКА ДЛЯ БУДУЩЕГО ИНЖЕНЕРА	57
2.1	Введение	58
2.2	Лабораторная работа №1 Измерения линейных размеров тел	62
2.3	Лабораторная работа №2 Изучение колебаний математического маятника в магнитном поле	69
2.4	Лабораторная работа №3 Изучение деформации материалов	74
2.5	Лабораторная работа №4 Определение периода вращения солнца. Основы астрономических наблюдений	80
2.6	Проектные и кейсовые задачи раздела	84
2.7	Кейс №1 Исследование технологических параметров FDM печати.	84
2.8	Темы проектно-исследовательских работ для самостоятельного изучения	89
3	МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА В НАУКЕ И ИНЖЕНЕРИИ	91
3.1	Введение	92

3.2	Лабораторная работа №5 Объемное расширение жидкостей	100
3.3	Лабораторная работа №6 Кипение воды при пониженном давлении	103
3.4	Лабораторная работа №7 Изотерма идеального газа	107
3.5	Лабораторная работа №8 Изучение газового термометра	110
3.6	Проектные и кейсовые задания	115
3.7	Кейс №2 Термодинамические характеристики двигателя Стирлинга	115
3.8	Темы проектно-исследовательских работ для самостоятельного изучения . . .	120
4	ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ	123
4.1	Введение	124
4.2	Лабораторная работа №9 Исследование резистивного делителя напряжения .	125
4.3	Лабораторная работа №10 Изучение температурной зависимости сопротив- ления проводника	130
4.4	Лабораторная работа №11 Определение сопротивления по схеме измери- тельного моста (Моста Уитстона)	136
4.5	Проектные и кейсовые задания	140
4.6	Кейс №3 Увеличение предела измерения электроизмерительных приборов. Шунтирование амперметра.	140
4.7	Темы проектно-исследовательских работ для самостоятельного изучения . . .	146
5	ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ В ЦИФРОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ UNITRAIN	149
5.1	Введение	150
5.2	Лабораторная работа №12 Изучение NTC и PTC терморезисторов	154
5.3	Лабораторная работа №13 Измерение характеристик фоторезистора	159
5.4	Лабораторная работа №14 Изучение явления резонанса в последовательном колебательном контуре	164
5.5	Лабораторная работа №15 Изучение выпрямляющих свойств полупроводни- ковых диодов	170
5.6	Лабораторная работа №16 Исследование переходных процессов в RC-цепи . .	178
5.7	Лабораторная работа №17 Изучение сглаживающих фильтров	183
5.8	Лабораторная работа №18 Включение транзистора в схеме с общей базой . .	190
5.9	Лабораторная работа №19 Включение транзистора в схеме с общим эмиттером	197
5.10	Проектные и кейсовые задания	203
5.11	Кейс 4. Усилитель с общим эмиттером	203
5.12	Темы проектно-исследовательских работ для самостоятельного изучения . . .	209
6	ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ	211
6.1	Введение	212
6.2	Лабораторная работа №20 Изучение оптических систем с помощью законов геометрической оптики	219
6.3	Лабораторная работа №21 Изучение дифракции света	227

6.4	Лабораторная работа №22 Изучение поляризации света и проверка закона Малюса	235
6.5	Лабораторная работа №23 Основы атомно-силовой сканирующей зондовой микроскопии	241
6.6	Лабораторная работа №24 Изучение спектров излучения светодиодов	258
6.7	Проектные и кейсовые задания	266
6.8	Кейс 5. Оптоволоконная передача информации	266
6.9	Темы проектно-исследовательских работ для самостоятельного изучения . . .	271

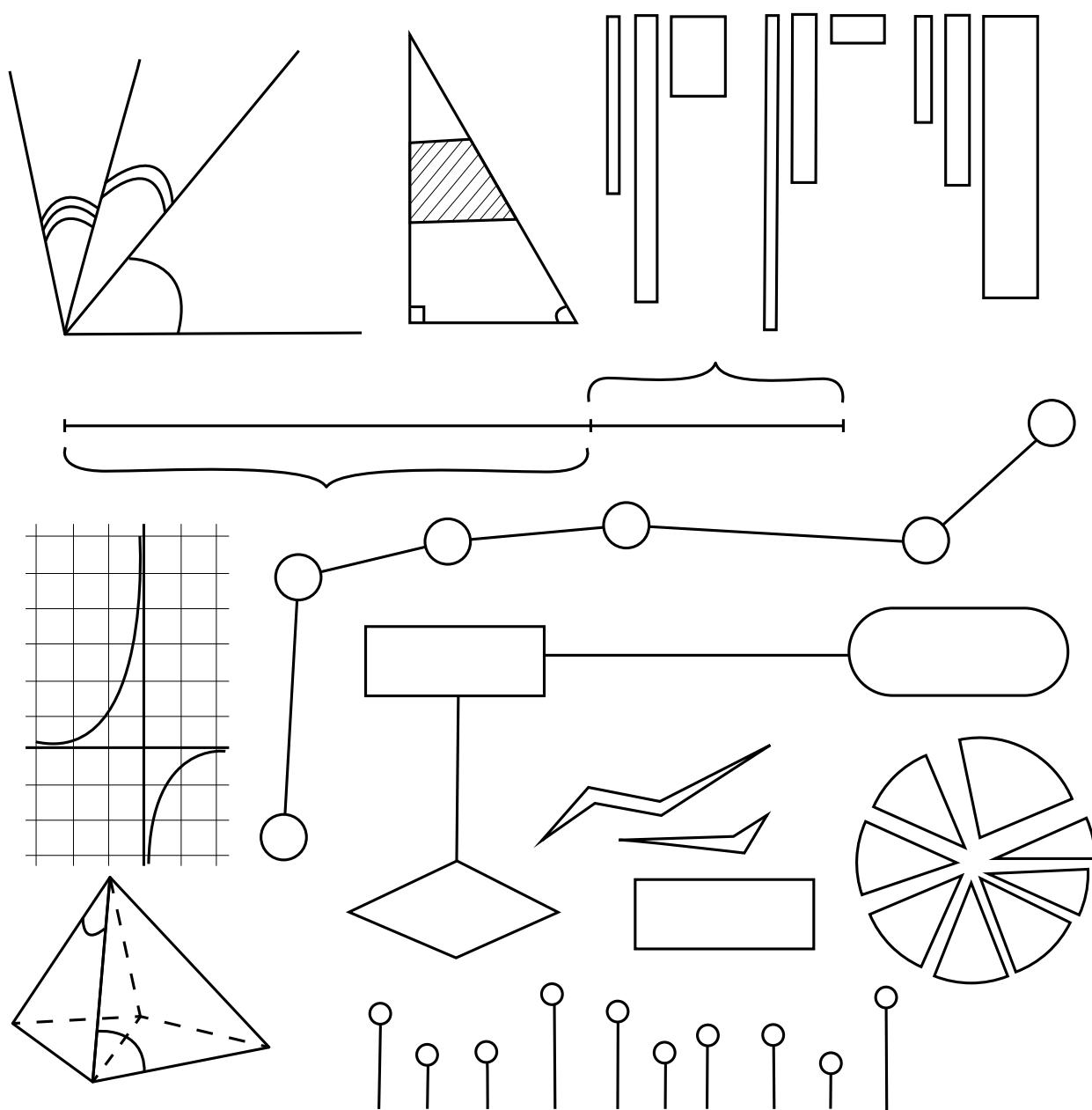
Предисловие

Экспериментальная физика занимает центральное место в развитии науки и техники. Именно через эксперимент человек познает законы природы, проверяет теоретические гипотезы и открывает новые явления. Для будущих инженеров-исследователей освоение методов экспериментальной физики является не только фундаментальной частью их профессиональной подготовки, но и ключом к успешной научной и инженерной деятельности. В современном мире, где высокие технологии стремительно развиваются, инженер сталкивается с задачами, требующими глубокого понимания физических процессов и навыков работы с современными экспериментальными установками. Знание принципов измерений, методов обработки данных и умение проектировать и проводить эксперименты открывает путь к созданию инноваций и решению сложнейших научных и прикладных проблем.

Настоящее учебное пособие разработано с учётом этих задач. Оно призвано не только познакомить школьников, интересующихся развитием инженерии, с основами экспериментальной физики, но и помочь им развить критическое мышление, способность анализировать результаты и работать с передовыми технологиями. Здесь особое внимание уделено практическим аспектам: от подготовки эксперимента до интерпретации его результатов. Мы уверены, что материалы данного пособия станут прочной основой для формирования у будущих инженеров-исследователей навыков и компетенций, которые позволят им внести свой вклад в развитие науки, технологий и общества в целом. Желаем всем читателям успехов в освоении экспериментов и новых открытий!

С уважением, коллектив авторов и педагогов НИЯУ МИФИ.

1 ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ



1.1 Виды погрешностей

Какой бы ни была постановка эксперимента, экспериментатор при измерениях получает не истинное значение физической величины Q , а результат измерения: обозначим его q . Его значение может, конечно, совпасть с истинным, но в общем случае — отличается. Если измерение производится N раз, то полученные результаты измерений $q_1, q_2, \dots, q_N$ не только не совпадают с Q , но чаще всего различны и между собой.

Абсолютной погрешностью измеряемой величины называется модуль разности результата измерения и истинного значения величины:

$$\Delta q = |Q - q|. \quad (1)$$

При этом “качество” результатов измерений принято характеризовать **относительной погрешностью**, которая вычисляется как частное абсолютной погрешности и модуля самой величины, выраженное в процентах:

$$\delta q = \frac{\Delta q}{|Q|} \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Умножение на 100 % позволяет выразить относительную погрешность в более привычном и удобном виде по сравнению с выражением в долях. Относительная погрешность, являясь безразмерной величиной, позволяет сравнивать между собой точность измерения разных величин.

Любопытно, что в записанных выше формулах ни истинное значение Q , ни его ошибка Δq экспериментатору неизвестны. Задача теории ошибок — найти наилучшее приближение для Q и оценить её погрешность.

Погрешности можно разделить на три вида (см. также рис. 1.1): случайные, систематические и промахи.

Случайные погрешности

Самая частая ситуация — наличие случайных обстоятельств, приводящих к разбросу результатов (отличию наблюдаемых значений $q_1, q_2, \dots, q_N$ между собой): это могут быть дуновения ветерка, изменения температуры или влажности, нестабильность показаний приборов, природные колебания измеряемой величины и даже перемены в настроении или внимательности экспериментатора в процессе эксперимента. Такие случайные воздействия могут как увеличить, так и уменьшить получаемый результат по сравнению с истинным значением (см. рис. 1.1Г). Тогда ошибка Δq , разная в каждом измерении, может быть как положительной, так и отрицательной. Погрешности, приводящие к появлению таких случайных отличий в результатах, называются **случайными**.

Случайные ошибки есть всегда. Невозможно так поставить опыт или так обработать полученные в эксперименте результаты, чтобы случайный разброс значений измеряемой величины исчез. При их наличии наилучшая оценка измеряемой величины — это, чаще всего,

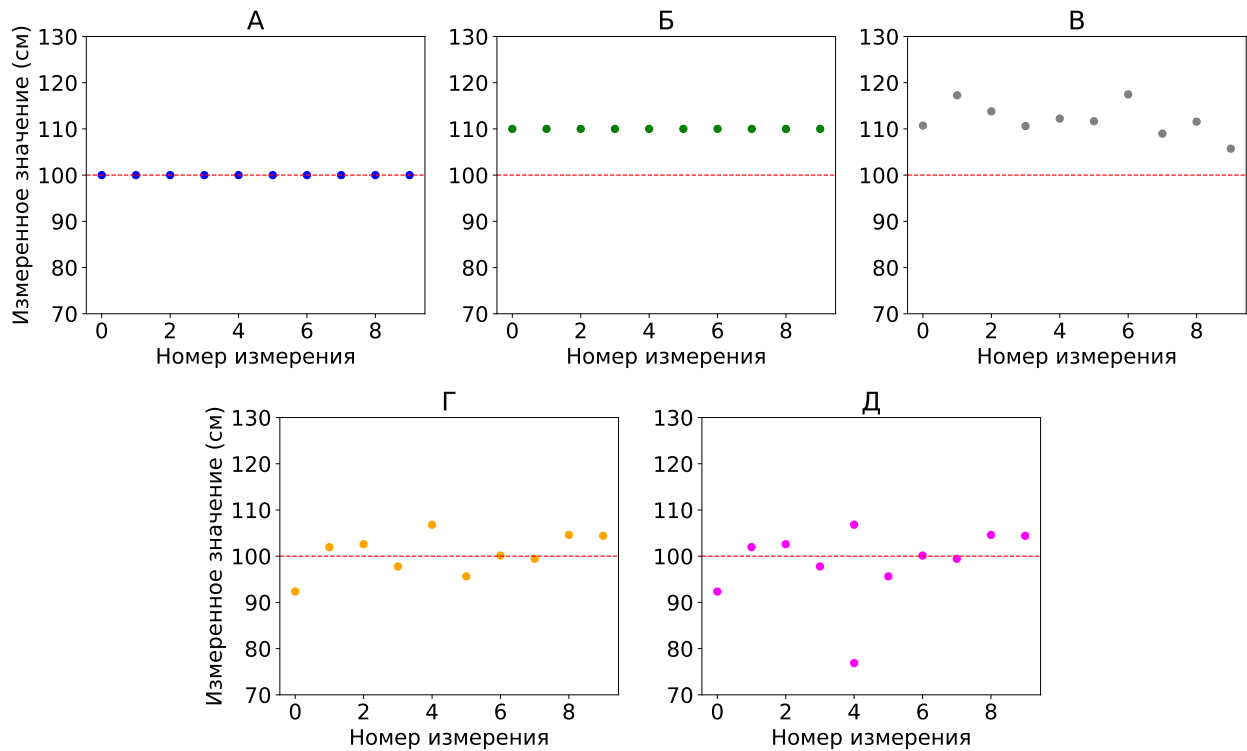


Рис 1.1: Распределение результатов измерений относительно истинного значения величины. **А:** для идеального случая, когда погрешностей нет (никогда не реализуется); **Б:** есть только систематическая погрешность (такой случай также не реализуется); **В:** присутствуют и систематическая, и случайная погрешности; **Г:** присутствует только случайная погрешность; **Д:** имеется случайный разброс результатов и один промах

среднее арифметическое всех полученных результатов:

$$q_{\text{наил}} = \bar{q} = \frac{q_1 + q_2 + \dots + q_N}{N}. \quad (3)$$

В этом случае, чем больше измерений проводится, тем ближе будет результат $\bar{q}$ к неизвестному истинному значению Q измеряемой величины.

Если провести всего одно измерение, по его результату определить величину случайной ошибки невозможно. Если же измерение одной и той же величины повторяется несколько раз (т.е. проводится серия измерений), случайный разброс в полученных значениях дает незаменимую для оценки погрешностей информацию.

Систематические погрешности

А что, если увеличение числа измерений не приводит к уменьшению погрешности? Ведь если измерять величину прибором с неверно нанесенной шкалой, то ошибка будет повторяться из раза в раз и не будет носить случайный характер. Тогда повторение измерения несколько раз не прибавит этому измерению точности. Такие погрешности называются **систематическими**. Систематические ошибки приводят к постоянному отклонению результатов измерений от истинного значения физической величины в одну и ту же сторону во всех измерениях, проводимых при одних и тех же условиях, одним и тем же методом с помощью одного и того же прибора. В отличие от случайных ошибок, систематические не могут быть ни

обнаружены, ни устранены при помощи повторения измерений, так как при наличии систематических ошибок результаты будут разбросаны не вокруг истинного, а вокруг смещенного значения (см. рис. 1.1В). Чтобы уменьшить влияние таких ошибок, нужно детально знать установку, на которой проводится эксперимент.

Возможные источники систематических погрешностей:

- неверная градуировка прибора, неисправности;
- принципиальное свойство механизма прибора или его элементов (например, люфт);
- постоянные неучтенные факторы, влияющие на исследуемое явление (например, присутствие магнита рядом с компасом);
- несовершенство методики, лежащей в основе опыта;
- отличие реального объекта от применяемой модели;
- ошибка или упрощение в методах вычисления (в случае косвенных измерений, см. ниже).

Промехи (грубые ошибки)

Третий вид погрешностей — **промахи**, или грубые ошибки. Они случаются из-за невнимательности экспериментатора (неверная запись числа в лабораторный журнал) или неожиданных сильных внешних воздействий (например, резкий порыв ветра). Промехи иногда можно выявить, проделав измерение на другом участке шкалы прибора либо повторив измерения спустя некоторое время, когда наблюдатель уже забыл полученные ранее числа. Проведение измерения другим экспериментатором почти всегда поможет выявить промах, если он имел место. Однако и этот метод не дает стопроцентной гарантии: если, например, ошибка произошла из-за нечетко написанной цифры на шкале (например, иногда путаются цифры 3 и 8), то второй наблюдатель может повторить ошибку первого.

1.2 Доверительный интервал и доверительная вероятность

После выполнения измерений и необходимых вычислений результат эксперимента записывается в виде наилучшей оценки измеряемой величины и интервала, в котором (предположительно) лежит ее истинное значение:

Измеренная величина = $(\bar{q} \pm \Delta q)$ единиц измерения.

Эту запись следует читать так: наибольшее ожидаемое значение измеренной величины равно $(\bar{q} + \Delta q)$, а наименьшее — $(\bar{q} - \Delta q)$. При этом утверждать абсолютно точно, что истинное значение Q лежит между $(\bar{q} - \Delta q)$ и $(\bar{q} + \Delta q)$, нельзя. Можно лишь утверждать, что Q находится в указанном интервале с некоторой вероятностью¹.

¹Вероятность — это отношение количества ожидаемых исходов измерений к полному числу измерений N , при стремлении N к бесконечности.

Интервал значений $\bar{q} \pm \Delta q$ называется **доверительным интервалом**, а вероятность того, что истинное значение Q попадает в этот интервал, — **доверительной вероятностью**:

$$P[\bar{q} - \Delta q < Q < \bar{q} + \Delta q] = \alpha. \quad (4)$$

То есть результаты повторения таких же серий измерений величины Q окажутся в пределах интервала $(\bar{q} - \Delta q; \bar{q} + \Delta q)$ с вероятностью, равной α .

Например, если $\alpha = 0,7$, то 70 % результатов $\bar{q}$ при повторениях такого же эксперимента (при таком же количестве измерений на той же установке) не выйдут за пределы выбранного доверительного интервала.

Чем шире задать доверительный интервал, тем выше будет вероятность того, что результаты аналогичных измерений в него попадут. Поэтому **запись погрешности без указания доверительной вероятности теряет смысл**, а сравнение и учет погрешностей различных источников возможно только когда **все погрешности соответствуют одной и той же α** .

1.3 Вычисление погрешностей

Различают два вида измерений: прямые и косвенные.

При прямых измерениях искомая физическая величина измеряется непосредственно при помощи измерительного прибора (длина — при помощи линейки, время — при помощи секундомера и т.д.). При косвенных измерениях физическая величина не измеряется напрямую, а вычисляется по результатам измерений других величин (например, скорость вычисляется по результатам измерения длины и времени). При косвенных измерениях также необходимо вычислять погрешность результата, зная погрешности каждой из прямо измеренных величин в отдельности.

Вычисление погрешностей прямых измерений

Погрешности одного измерения

Абсолютная погрешность $\Delta q_{(1)}$ каждого отдельного измерения величины может быть обусловлена двумя источниками:

1. **Приборная погрешность** $\Delta q_{\text{приб}}$ — внутренняя характеристика прибора, определяемая в ходе калибровки при сравнении показаний прибора с показанием эталонного (более точного) устройства. Она указывается либо на самом приборе или в паспорте прибора.
2. **Погрешность отсчета** $\Delta q_{\text{отсч}}$ (погрешность снятия показаний) — это субъективная ошибка экспериментатора при снятии показаний со шкалы прибора.

Для определения погрешности одного измерения в общем случае необходимо учитывать обе указанных погрешности.

Приборные погрешности

Для стрелочных приборов (стрелочный вольтметр, амперметр, секундомер и т.д.) неточность показаний может определяться конструкцией как механических, так и электромагнитных элементов. Абсолютная приборная погрешность таких приборов одна и та же для всех значений измеряемой величины. Отношение этой погрешности к пределу шкалы, выраженное в процентах, называется **классом точности** прибора. Доверительная вероятность, отвечающая приборной погрешности, должна быть также задана в паспорте прибора.

Если на приборе указан класс точности $\gamma = 1,0$, это значит, что относительная погрешность показаний прибора не выше 1,0 % от максимального значения на шкале.

Абсолютная приборная погрешность рассчитывается как

$$\Delta q_{\text{приб}} = \frac{\text{класс точности} \cdot q_{\text{max}}}{100}, \quad (5)$$

где q_{max} — предел шкалы прибора (максимальное значение, которое может быть им измерено). В случае, если нулевая отметка находится не на краю, а, скажем, посередине шкалы — как у гальванометра, — в качестве q_{max} следует взять арифметическую сумму частей шкалы справа и слева от нуля (без учета их знака).

Так как абсолютная приборная погрешность $\Delta q_{\text{приб}}$ определяется классом точности и потому фиксирована, относительная погрешность δq измерения стрелочным прибором будет тем меньше, чем больше (в делениях шкалы) измеряемое значение. Поэтому лучше выбирать такой диапазон измерений прибора, чтобы стрелка отклонялась на как можно большее от нуля число делений.

Погрешности линейек, микрометров, штангенциркулей иногда наносятся на самом приборе (на шкале). Так указывается наибольшая абсолютная погрешность, которая в этом случае считается постоянной вдоль всей шкалы прибора.

При работе с осциллографами считается, что приборная погрешность составляет 5 % от измеряемой величины, будь то амплитуды импульсов или периоды колебаний. В случае работы с высокоточными осциллографами приборная погрешность может быть меньше, тогда она указана в паспорте прибора.

При работе с цифровыми приборами, у которых измеряемая величина “оцифровывается”, погрешности для каждого диапазона измерений следует смотреть в паспорте прибора. В случае, если документы прибора недоступны, абсолютную приборную погрешность как правило принимают равной единице последнего (наинизшего) разряда.

Погрешности снятия показаний

Если считать, что правильность расположения стрелки по отношению к меткам шкалы прибора гарантируется², то **главная задача экспериментатора** — определить, где располага-

²В нашей стране такая гарантия реализуется системой поверочных измерений на основе соответствующих ГОСТов. Эта система состоит в поверке данного прибора по контрольному, который в свою очередь поверяется по еще более точным приборам и т.д.

ется определенная точка по отношению к меткам шкалы: при снятии показаний со стрелочного прибора стрелка не всегда попадает точно на метку. В таких случаях у экспериментатора возникает необходимость округления результатов или интерполяции³. Эти действия вносят влияние человеческого фактора на точность измерений. Погрешность отсчета, связанная с округлением или интерполяцией, зависит от множества обстоятельств – ширины делений, освещенности шкалы, остроты зрения экспериментатора.

Итак, чтобы провести измерение, нужно определить то место на шкале прибора, куда указывает стрелка (в случае линейки или штангенциркуля – где находится измеряемая отсечка). Если деления нанесены часто, пытаться оценивать доли деления на глаз нецелесообразно, и показание необходимо округлить. Экспериментатор сам решает, к какой из меток ближе лежит величина, но в любом случае стрелка находится между двумя соседними метками. Поэтому максимально возможная ошибка при таком округлении равна половине цены деления:

$$\Delta q_{\text{отсч}} = \frac{1}{2} \cdot \text{цена деления}. \quad (6)$$

Выбранная таким образом погрешность снятия показаний соответствует доверительной вероятности $\alpha = 0,997$. В этом случае $\Delta q_{\text{отсч}}$, отвечающая стандартной доверительной вероятности 0,68, будет в три раза меньше (о стандартном отклонении см. ниже).

Если метки шкалы прибора расположены редко, то чаще всего можно провести визуальную интерполяцию: оценить, в каком месте между метками расположена стрелка прибора. Иногда можно оценить положение стрелки с точностью вплоть до половины или четверти деления⁴. Стандартную погрешность отсчета при интерполяции считают равной

$$\Delta x_{\text{отсч}} = \frac{d}{3}, \quad (7)$$

где d – та доля деления, которую Вы решили оценить (например, половина, четверть от цены деления и т. д.). Доверительная вероятность, отвечающая этой погрешности, $\alpha = 0,68$.

В зависимости от того, с какой точностью сам экспериментатор решил оценивать доли делений, погрешность отсчета результата может быть различной.

Если стрелка прибора указывает точно на метку (т.е. с точки зрения экспериментатора округление или интерполяция показания не требуются), такое измерение также имеет погрешность отсчета: штрих на шкале имеет конечную ширину, а видимое положение стрелки относительно этого штриха зависит от угла зрения. Поэтому здесь рекомендуется брать такую же по величине $\Delta q_{\text{отсч}}$, как для всех остальных измерений, проводимых по данной шкале (для которых проводилось округление либо интерполяция).

При снятии показаний с цифрового прибора погрешности отсчета чаще всего отсутствуют (за исключением промахов из-за неверного прочтения цифр). Иногда встречаются ситуации, когда цифры на приборе быстро “скачут” около какого-то значения. В таком случае

³Интерполяция – это определение положения стрелки между метками шкалы. Округление – это оценка, к какой из нанесенных на шкалу меток стоит отнести результат.

⁴Оценивать десятые доли деления нет смысла, т.к. разные наблюдатели делают при подобных оценках различную систематическую ошибку, достигающую до 0,2 цены деления.

в качестве $\Delta q_{\text{отсч}}$ следует взять либо 1/2 от диапазона изменения показаний, либо единицу разряда, который остается неизменным.

Одновременный учет погрешностей прибора и отсчета

Так как при однократном измерении физической величины имеются одновременно и приборная погрешность, и погрешность отсчета, то чтобы учесть обе и правильно определить итоговую погрешность, необходимо **привести их к одной и той же доверительной вероятности**.

Это означает, что надо выразить отвечающие разным источникам погрешностей величины Δq в терминах так называемого стандартного отклонения σ (см. ниже) и привести различные Δq (в нашем случае $\Delta q_{\text{приб}}$ и $\Delta q_{\text{отсч}}$) к одинаковому количеству “сигм”, расширив или сузив соответствующие доверительные интервалы в зависимости от выбранной доверительной вероятности. После того, как ошибки приведены к одному значению α , определяется итоговая погрешность. Поскольку погрешность прибора и погрешность снятия показаний имеют различную природу, то они, естественно, являются независимыми. Тогда суммарная погрешность определяется как корень из суммы их квадратов:

$$\Delta q_{(1)} = \sqrt{\Delta q_{\text{приб}}^2 + \Delta q_{\text{отсч}}^2}. \quad (8)$$

В случае, если одна из вносящих вклад погрешностей в 10 или более раз превосходит другую, в качестве итоговой погрешности достаточно взять максимальную из них:

$$\Delta q_{(1)} = \max(\Delta q_{\text{приб}}, \Delta q_{\text{отсч}}). \quad (9)$$

Погрешности серии измерений

Допустим, что систематические погрешности в нашем эксперименте минимизированы (много меньше случайных). Тогда результат будет точнее, если сделать серию измерений: повторить измерения несколько раз. Каждый отдельный результат q_i будет, конечно, иметь погрешность единичного измерения. Однако чаще всего происходит так, что результаты в серии отличаются друг от друга сильнее, чем на $\Delta q_{(1)}$. В этом случае мы имеем дело с наиболее частой ситуацией, когда случайная ошибка играет существенную роль. Зададимся вопросом, как ее найти.

Среднеквадратичная погрешность измерения

Как уже упоминалось выше, для удобства сравнения и для приведения погрешностей к одинаковым доверительным вероятностям существует договоренность: в качестве единой меры измерения доверительных интервалов⁵ принято использовать так называемое стандартное отклонение. Стандартное отклонение, обозначаемое символом “ σ ”, — это такая величина доверительного интервала, которая отвечает доверительной вероятности $\alpha = 0,68$. То есть для различных погрешностей (например, обусловленных разными источниками) σ

⁵В случае нормального распределения случайных величин.

может быть различной по величине, однако если $\Delta q = \sigma$, то $\alpha = 0,68$. И наоборот: если известно, что для найденной нами абсолютной погрешности Δq доверительная вероятность равна $\alpha = 0,68$, то это означает, что данная $\Delta q = \sigma$. Доверительный интервал $(\bar{q} - \sigma, \bar{q} + \sigma)$ называется стандартным: считается, что если при записи результата с погрешностью доверительная вероятность не указана, то она равна 0,68 (и в этот интервал должно попадать 68 % результатов при повторении таких же серий измерений).

Допустим, выполнено N измерений, в которых получены результаты $q_1, q_2, \dots, q_N$. Если все измерения проделаны одним и тем же методом и одинаково тщательно, такие измерения называются **равноточными**. Как говорилось выше, чаще всего наилучшей оценкой истинного значения Q является среднее значение $\bar{q}$, вычисленное из всего набора результатов. Для определения величины случайной погрешности этого усредненного результата наиболее распространена оценка с помощью стандартной (среднеквадратичной) ошибки.

Очевидно, что чем сильнее каждое отдельное значение q_i отличается от среднего $\bar{q}$, которое мы считаем наиболее вероятным значением физической величины, тем хуже мы знаем результат. Поэтому в величину погрешности должны входить разности $(q_i - \bar{q})$, называемые отклонениями q_i от $\bar{q}$. Нельзя просто усреднить отклонение $(q_i - \bar{q})$: из-за случайного характера отклонения результата измерения от истинного значения (отклонения с равной вероятностью происходят и “в плюс”, и “в минус”) такое среднее стремится к нулю с ростом числа измерений. Чтобы обойти эту проблему, надо сделать так, чтобы все усредняемые отклонения были положительными. Этого можно добиться двумя способами: возведя $(q_i - \bar{q})$ в квадрат, либо взяв абсолютное значение $|q_i - \bar{q}|$.

Величина

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{(q_1 - \bar{q})^2 + (q_2 - \bar{q})^2 + \dots + (q_N - \bar{q})^2}{N - 1}} \quad (10)$$

называется среднеквадратичной ошибкой.

Среднеквадратичная ошибка σ_q — это, как и раньше, случайная ошибка каждого отдельного результата при проведении N измерений. Однако в отличие от описанных выше приборных погрешностей и погрешностей отсчета, ее невозможно определить по одному измерению: необходимо обрабатывать все N результатов серии. При этом σ_q характеризует случайный разброс результатов измерения $\{q_i\}$ вокруг наиболее вероятного значения $\bar{q}$. Если увеличивать число измерений, то величина σ_q будет становиться всё точнее (так как в нее будет входить все больше отклонений отдельных q_i), стремясь к некоторому постоянному значению σ . Именно предельное значение называется стандартным отклонением случайной величины q_i от $\bar{q}$ в случае нормального распределения, о котором речь пойдет ниже. В действительности, однако, мы всегда вычисляем не предельную величину σ , а ее приближенное значение σ_q , которое тем ближе к σ , чем больше количество измерений N . Среднеквадратичной ошибкой σ_q пользуются в большинстве случаев при вычислении погрешностей, особенно при небольшом количестве измерений. В первую очередь это делается потому, что так легче определять доверительные вероятности: как упоминалось выше, для любой величины доверительного интервала, выраженного в единицах σ , доверительная вероятность может быть рассчитана стандартным образом.

Если же оказалось, что все измеренные значения совпадают и отклонения $(q_i - \bar{q})$ равны нулю, то по формуле (10) получится $\sigma_q = 0$. Значит ли это, что результат является абсолютно точным? В реальности такая ситуация означает, что случайный разброс результатов изме-

ний много меньше погрешности единичного измерения (приборной ошибки или погрешности отсчета). Именно в такой ситуации может возникнуть естественный вопрос: сколько измерений нужно провести? Когда достаточно измерить величину однократно, а когда следует повторять измерение как можно больше раз? Ответ на этот вопрос можно сформулировать так:

Если случайный разброс результатов $(q_{\max} - q_{\min})/2$ оказывается меньше, чем погрешность индивидуального измерения $\Delta q_{(1)}$, то можно далее ограничиваться одним измерением, а в качестве погрешности взять приборную погрешность (или погрешность отсчета). Увеличение числа измерений в этом случае не приведет к уточнению результата. В случае же если $(q_{\max} - q_{\min})/2 > \Delta q_{(1)}$, необходимо проводить серию измерений и определять случайную погрешность. Погрешность единичного измерения при этом в расчетах более никак не участвует.

Нормальное распределение

Теперь мы знаем, что измеряемая величина скорее всего равна $\bar{q}$, а абсолютная погрешность этого значения оценивается как σ_q . Спрашивается, что конкретно означает величина стандартного отклонения?

Рассмотрим следующий пример:

q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	$\bar{q}$	σ_q
40.0	43.0	39.0	45.0	43.0	42.0	2.4

Видно, что, например, q_3 отстоит от среднего больше, чем на σ_q , а q_2 — меньше, чем на σ_q , но σ_q включает в себя информацию и о q_2 , и о q_3 . Как следует понимать запись $q = \bar{q} \pm \sigma_q$?

Чтобы объяснить эту запись, сначала зададимся вопросом: как именно распределены величины q_i относительно среднего значения $\bar{q}$? Мы предполагаем, что q_i могут принимать какие угодно значения от $-\infty$ до $+\infty$, и результат измерения тем чаще появляется в серии, чем ближе это значение к среднему $\bar{q}$. Другими словами, большие отклонения должны встречаться реже, чем маленькие. Если характер отклонений результатов измерения от истинного значения случаен, то для большого количества измерений физической величины результаты индивидуальных измерений распределены **нормально**, т. е. подчиняются **распределению Гаусса**:

$$f(q) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(q-\bar{q})^2}{2\sigma^2}}. \quad (11)$$

Параметрами в функции распределения случайной величины $f(q)$ в этой формуле являются те самые среднее значение $\bar{q}$ и стандартное отклонение σ , которые были введены выше. То, что в качестве наилучшей оценки истинного значения Q выбрана величина $\bar{q}$, а разброс q_i относительно $\bar{Q}$ при большом количестве измерений определяется величиной среднеквадратичной ошибки σ , есть следствие именно того, что нормальное распределение случайных величин имеет вид (11).

Функция $f(q)$ называется плотностью вероятности распределения величины. Вид кривых Гаусса представлен на рис. 1.2 для безразмерной измеряемой величины q и четырех

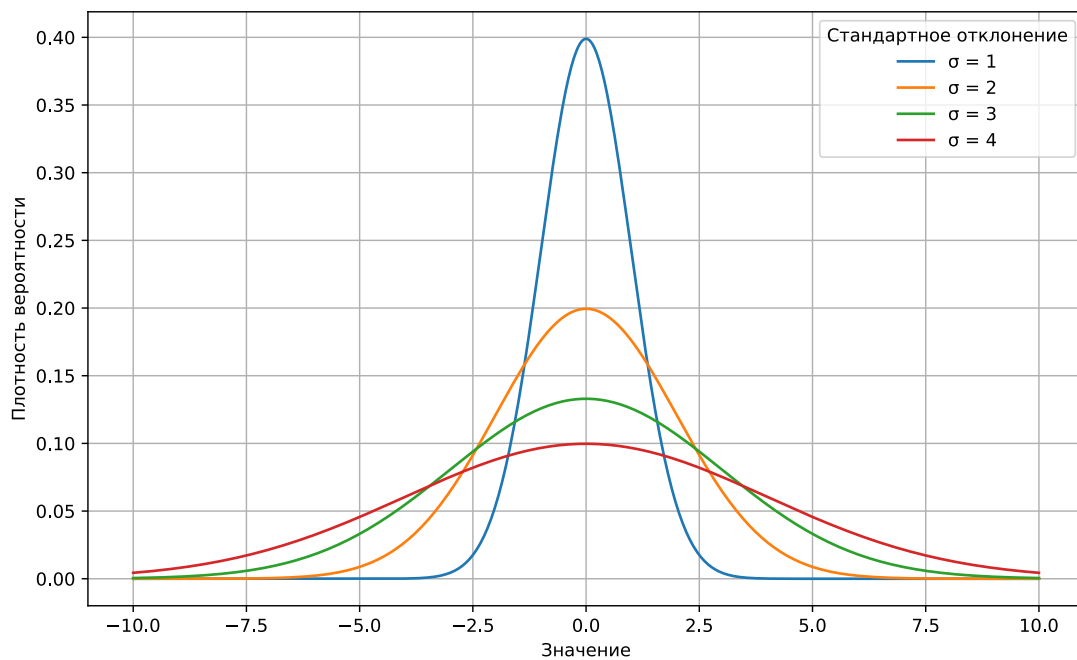


Рис 1.2: Кривые функции распределения Гаусса для $\bar{q} = 0$ и четырех разных значений σ

значений стандартного отклонения $\sigma = 1, 2, 3, 4$. Если измерения проводятся с высокой точностью (меньшие σ), то большинство результатов серии будут близки к истинному значению и график функции $f(q)$ будет иметь вид узкого острого пика. Если же точность измерений низкая (бóльшие σ), то результаты будут сильно отличаться друг от друга, и их распределение будет описываться широкой пологой кривой. Наиболее вероятное для нормального распределения значение $\bar{q}$, очевидно, встречается при измерениях чаще всего, и потому в точке $q = \bar{q}$ функция имеет максимум. Данный график позволяет установить, как часто должны появляться бóльшие или меньшие ошибки: каждая точка кривой $f(q)$ соответствует той доле измерений (среди большой серии повторений), результат которых попал в небольшой интервал значений вокруг выбранного q , а вероятность того, что значение величины лежит в промежутке между $q = a$ и $q = b$, равна площади под кривой $f(q)$, взятой между точками a и b . Это и позволяет вычислять доверительные вероятности стандартным образом, если доверительные интервалы задаются в терминах параметра σ , входящего в определение $f(q)$.

Таким образом, если случайная величина подчиняется распределению Гаусса, можно вычислить вероятность ее нахождения в доверительном интервале $(\bar{q} - \sigma; \bar{q} + \sigma)$, и тогда, согласно определению, получим доверительную вероятность, отвечающую погрешности $\Delta q = \sigma$. Если площадь под всей кривой от $-\infty$ до $+\infty$ равна единице, то площадь, закрашенная на рис. 1.3 вверху, равна приблизительно 0,68. То есть, если сделать очень много измерений, вычислить среднее значение и среднеквадратичную погрешность, то в интервал $(\bar{q} - \sigma, \bar{q} + \sigma)$ попадет примерно 68 % результатов измерений q_i . Так же можно вычислить и доверительные вероятности, отвечающие интервалам другой ширины. Напомним, что доверительная вероятность при обработке результатов измерений выбирается экспериментатором самостоятельно и часто принимается равной 0,95 или 0,997. Такие вероятности соответствуют доверительным интервалам, ширина которых составляет, соответственно, $\pm 2\sigma$ (рис. 1.3,

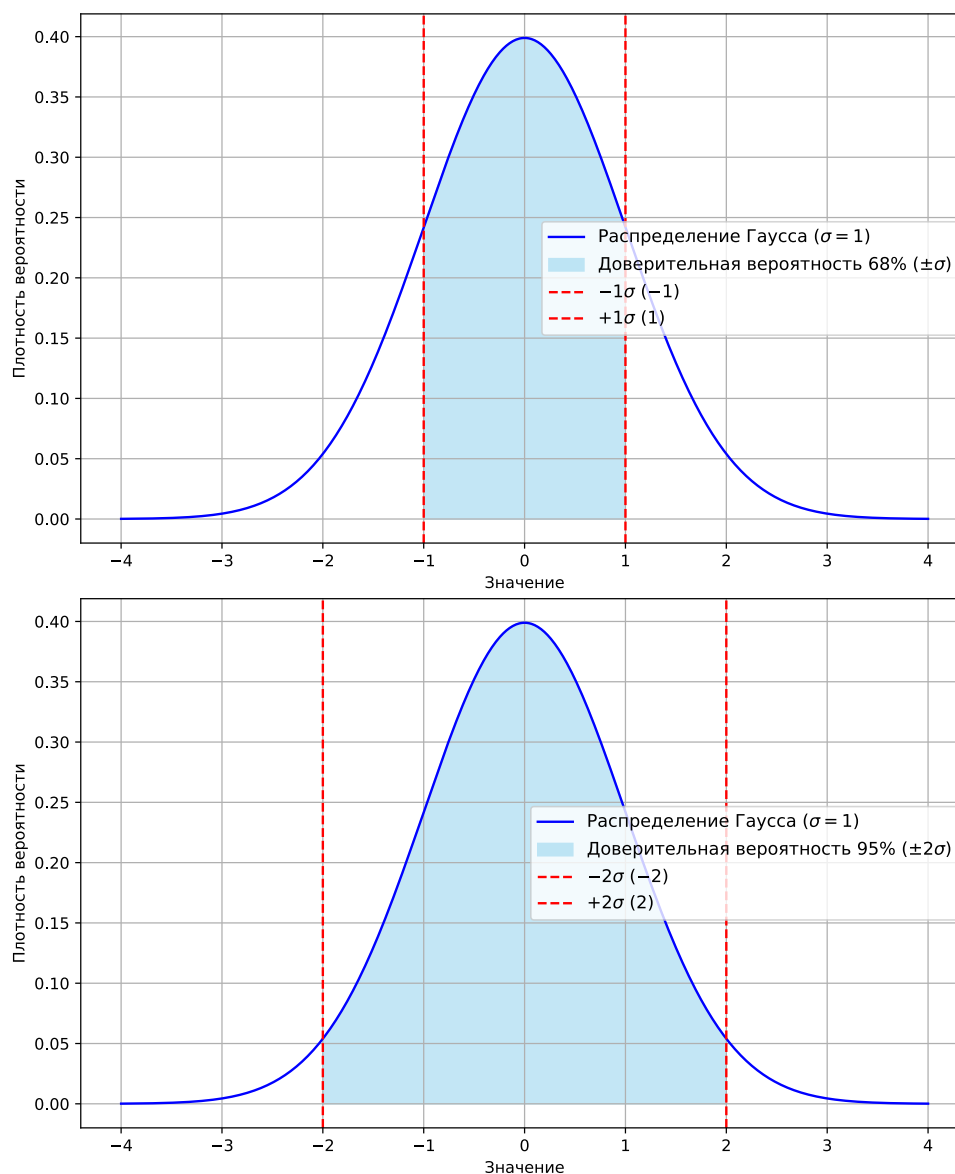


Рис 1.3: Гауссовское распределение с рис. 1.2 с шириной $\sigma = 1$, на котором указан доверительный интервал шириной в $\pm\sigma$, соответствующий доверительной вероятности 68 % (вверху) и шириной в $\pm 2\sigma$, соответствующий доверительной вероятности 95 % (внизу)

внизу) и $\pm 3\sigma$. На основе этого факта формулируется так называемое “правило трех сигм”: практически все значения нормально распределенной случайной величины лежат в интервале $(\bar{q} - 3\sigma, \bar{q} + 3\sigma)$.

Стандартное отклонение среднего

Описанная выше методика позволяет определять доверительные вероятности для результатов отдельных измерений q_i , т. е. вычислять вероятность того, что любое измерение, проведенное в таких же условиях на той же установке, не будет отклоняться от $\bar{q}$ более чем на величину Δq . Однако основным результатом всей серии измерений является всё же среднее значение $\bar{q}$: в нем усреднено множество индивидуальных величин q_i , и оно является более надежной оценкой измеряемой физической величины, чем каждое отдельное измерение. Поэтому при записи финального результата нам важнее знать не то, насколько каждое отдельное q_i отклоняется от среднего $\bar{q}$, а то, насколько $\bar{q}$ может отклоняться от истинного зна-

чения Q .

Если проделывать раз за разом одинаковые серии измерений (и выполнять одно и то же количество измерений N в каждой серии), в силу случайности мы будем получать всегда немного разные наборы результатов $\{q_1^{(1)}, q_2^{(1)}, \dots, q_N^{(1)}\}, \{q_1^{(2)}, q_2^{(2)}, \dots, q_N^{(2)}\}$ и т.д., и немного отличные друг от друга средние значения $\bar{q}^{(1)}, \bar{q}^{(2)}, \dots$. Характер разброса средних от каждой серии случаен, так же как и характер разброса значений q_i в пределах каждой серии. Поэтому распределение средних значений $\{\bar{q}^{(i)}\}$ также будет подчиняться нормальному закону и описываться гауссовской функцией $f(\bar{q})$.

Чем больше измерений делается в каждой отдельной серии, тем ближе каждое среднее $\bar{q}^{(i)}$ к истинному значению Q . Значит, чем больше N , тем ближе средние значения, полученные в разных сериях, друг к другу. Стандартное отклонение $\sigma_{\bar{q}}$ для кривой, описывающей распределение средних, и ширина гауссовского “колокола” $f(\bar{q})$ будет тем меньше, чем выше количество измерений N в отдельной серии. Величина

$$\sigma_{\bar{q}} = \frac{\sigma_q}{\sqrt{N}}, \quad (12)$$

называется среднеквадратичной погрешностью среднего или стандартным отклонением среднего. Она характеризует случайный разброс средних значений, полученных при повторениях одинаковых серии из N измерений (и таким образом определяет погрешность $\bar{q}$ как наилучшей оценки Q).

Подчеркнем, что стандартное отклонение σ_q и стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{q}}$ являются по своему смыслу совершенно разными. Их вычисляют по формулам (10) и (12), проделав лишь одну серию из N измерений, но в то время как среднеквадратичная ошибка σ_q описывает разброс отдельных значений q_i вокруг $\bar{q}$ и с ростом числа измерений N практически не меняется (а лишь уточняется), стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{q}}$, характеризующее разброс $\bar{q}$ в случае проведения нескольких одинаковых серий, уменьшается с ростом N как $1/\sqrt{N}$. Это позволяет увеличить точность результата эксперимента (т. е. уменьшить погрешность $\bar{q}$), повышая количество измерений в серии. Получается, что для увеличения точности наилучшей оценки измеряемой величины в k раз необходимо провести в k^2 раз больше измерений.

В связи с вышесказанным правильной записью результата серии измерений будет

$$\text{Измеренная величина} = (\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}) \text{ единиц измерения, } \alpha = 0,68$$

— такая запись будет характеризовать разброс средних $\bar{q}^{(i)}$ при повторных экспериментах, а доверительная вероятность 68 % будет вероятностью того, что при повторении серии измерений мы получим среднее арифметическое в данном интервале.

Распределение Стьюдента

Как сказано в предыдущем параграфе, использование распределения Гаусса предполагает, что проделано очень большое число измерений. В этом случае $\sigma_{\bar{q}}$ стремится к σ и мы можем определить доверительную вероятность для любого доверительного интервала. Однако чаще всего количество измерений N в учебных лабораториях не так уж велико, и потому если считать, что величина $\sigma_{\bar{q}}$ совпадает с σ , и пользоваться табличными данны-

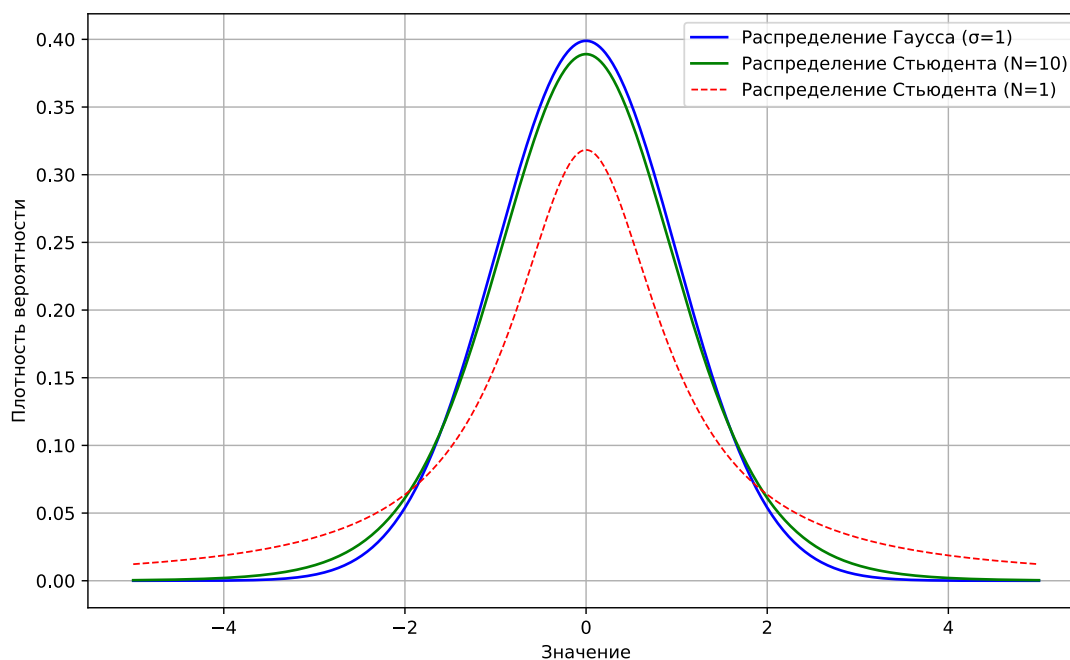


Рис 1.4: Распределения Гаусса $f(q)$ с $\sigma = 1$ (синяя сплошная линия) и Стюдента $f_t(q)$ для $N = 10$ (зеленая сплошная линия) и $N = 1$ (красная пунктирная линия) с центром в $\bar{q} = 0$

ми доверительной вероятности для гауссовского распределения, то полученные значения α окажутся завышенными. Надежность наших оценок погрешности будет страдать тем сильнее, чем меньше проводилось измерений.

В случае небольших N распределение результатов измерений выглядит иначе и называется **распределением Стюдента**. График этого распределения показан на рис. 1.4: он шире кривой распределения Гаусса, так как при недостаточно большом числе измерений имеется меньше информации об измеряемой величине и ее разброс относительно среднего значения больше. На практике это означает, что доверительный интервал, соответствующий какой-либо доверительной вероятности, будет в случае распределения Стюдента шире, чем в случае нормального распределения, и тем самым будет учтено отличие $\sigma_{\bar{q}}$ от σ .

Чтобы получить доверительный интервал в этом случае, необходимо домножить величину стандартного отклонения среднего на так называемый коэффициент Стюдента. Он отражает отличие в распределениях для конечного и бесконечного числа измерений и зависит от α и от N . При больших N стремится к величине, которая соответствует гауссовскому распределению (так, для $\alpha = 0,68$ при $N > 60$ коэффициент Стюдента $t_{\alpha,N}$ стремится к 1). Используя коэффициенты Стюдента, можно записать определение (4) в виде

$$P(\bar{q} - t_{\alpha,N} \cdot \sigma_{\bar{q}} < Q < \bar{q} + t_{\alpha,N} \cdot \sigma_{\bar{q}}) = \alpha. \quad (13)$$

Таким образом, алгоритм вычисления случайной погрешности при малом количестве измерений следующий:

1. Вычисляем стандартное отклонение среднего $\sigma_{\bar{q}}$.
2. Выбираем желаемую доверительную вероятность α .

3. Из таблицы коэффициентов Стьюдента берем $t_{\alpha,N}$, соответствующий выбранной доверительной вероятности α и количеству проведённых измерений N .

4. Умножаем $\sigma_{\bar{q}}$ на найденный коэффициент Стьюдента:

$$\Delta q = t_{\alpha,N} \cdot \sigma_{\bar{q}}.$$

5. Результат записываем в виде $q = \bar{q} \pm \Delta x$.

6. Указываем доверительную вероятность α и относительную погрешность $\delta q = \Delta q / \bar{q}$.

Таблица коэффициентов Стьюдента $t_{\alpha,N}$

N	α									
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	0,73	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	0,62	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	0,58	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	0,57	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
6	0,56	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	0,55	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	0,55	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	0,54	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	0,54	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	0,54	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	3,2	4,6
12	0,54	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,5
13	0,54	0,70	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1	4,3
14	0,54	0,69	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,0	4,2
15	0,54	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0	4,1
20	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9	3,9
25	0,53	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,8	3,7
30	0,53	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	2,8	3,7
40	0,53	0,68	0,85	1,1	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,6
60	0,53	0,68	0,85	1,0	1,3	1,7	2,0	2,4	2,7	3,5
∞	0,52	0,67	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3

Метод Корнфельда

Иногда для грубой оценки погрешности допустимо использовать так называемый **метод Корнфельда**. Согласно этому методу, доверительный интервал выбирается так, чтобы в него попали все результаты измерений, а наилучшей оценкой истинного значения физической величины считается среднее арифметическое между максимальным и минимальным результатами:

$$q_{\text{наил}} = \frac{q_{\text{max}} + q_{\text{min}}}{2}, \quad \Delta q = \frac{q_{\text{max}} - q_{\text{min}}}{2}. \quad (14)$$

Доверительная вероятность, которая будет соответствовать такому доверительному интервалу,

$$\alpha = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1}. \quad (15)$$

Существенный недостаток метода Корнфельда в том, что доверительная вероятность

(15) зависит от числа измерений N , а не выбирается самим экспериментатором. Это значительно усложняет использование погрешностей, оцененных методом Корнфельда, в дальнейших вычислениях (ведь все погрешности должны соответствовать одной α).

Метод Корнфельда используют только тогда, когда необходимо лишь грубо оценить погрешность результата (например, чтобы сравнить результат измерения с табличным значением).

1.4 Погрешности косвенных измерений

Довольно часто встречается ситуация, когда экспериментатор имеет дело с косвенными измерениями: искомая величина (обозначим её z , чтобы отличать от предыдущего случая) не измеряется напрямую, а вычисляется как функция других, непосредственно измеренных величин (далее везде будем считать, что измеренные величины – положительные):

$$z = z(x, y, \dots). \quad (16)$$

Предположим, что после измерения $x, y, \dots$ в эксперименте мы вычислили средние $\bar{x}, \bar{y}, \dots$ и нашли для них доверительные интервалы: $x = \bar{x} \pm \Delta x, y = \bar{y} \pm \Delta y$. В качестве наилучшего приближения для z логично взять⁶

$$z_{\text{наил}} = z(\bar{x}, \bar{y}, \dots).$$

Наш основной вопрос – как найти погрешность Δz .

Погрешность простой суммы

Пусть прямо измеренная величина x принимает значения в интервале $(\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x)$, а величина y – в интервале $(\bar{y} - \Delta y, \bar{y} + \Delta y)$, и они просто складываются:

$$z = x + y.$$

Тогда для z максимальное вероятное значение есть $z_{\text{max}} = x_{\text{max}} + y_{\text{max}} = (\bar{x} + \Delta x) + (\bar{y} + \Delta y) = (\bar{x} + \bar{y}) + (\Delta x + \Delta y)$, а минимальное – $z_{\text{min}} = x_{\text{min}} + y_{\text{min}} = (\bar{x} - \Delta x) + (\bar{y} - \Delta y) = (\bar{x} + \bar{y}) - (\Delta x + \Delta y)$.

Выходит, что погрешность величины z равна $\Delta z = \Delta x + \Delta y$. Очевидно, что в случае разности $z = x - y$ формула будет такой же. Подобные рассуждения можно провести и для нескольких складываемых или вычитаемых величин: $\Delta z = \Delta x + \Delta y + \dots$.

Мы получили, что при сложении или вычитании нескольких величин их абсолютные погрешности складываются. Однако часто подобная оценка погрешности является завышенной. Если погрешности $x, y, \dots$ случайны и независимы,⁷ то в силу случайности недооценка

⁶Применение этой формулы оправданно, если функция $z(x, y, \dots)$ может быть линеаризована относительно своих аргументов, т. е. погрешности измерения аргументов функции $(\Delta x, \Delta y, \dots)$ должны быть достаточно малыми.

⁷Два случайных события называются независимыми, если наступление одного из них не изменяет вероятность наступления другого.

x будет иногда сопровождаться переоценкой y , а иногда — наоборот. Ясно, что вероятность недооценки всех складываемых или вычитаемых величин на полные значения погрешностей $\Delta x, \Delta y, \dots$ довольно мала. Следовательно, значение $\Delta z = \Delta x + \Delta y + \dots$ переоценивает возможную ошибку.

Можно доказать, что если измерения всех величин выполняются независимо, а результаты измерений подчиняются нормальному распределению, то погрешность суммы $z = x + y + \dots$ равна

$$\Delta z = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + \dots} \quad (17)$$

Тогда говорят, что погрешности складываются квадратично. Погрешность, определенная квадратичным сложением, всегда меньше погрешности, определенной обычным сложением, так как для любых двух положительных чисел a, b верно $a^2 + b^2 < (a + b)^2$.

Также можно доказать, что независимо от того, являются ли ошибки независимыми, погрешность $z = x + y$ не больше их простой суммы. Т. е. в любом случае

$$\Delta z \leq \Delta x + \Delta y + \dots \quad (18)$$

Иногда выбор способа сложения погрешностей (обычно или квадратично) не сказывается на конечном результате. Но необходимо помнить, что **при любом методе сложения погрешностей они прежде всего должны отвечать одинаковым значениям доверительной вероятности**. В случае, если для всех погрешностей $\alpha = 0,68$, формулу (17) можно записать в виде

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \dots},$$

где σ — стандартное отклонение среднего.

Погрешность функции одной переменной

Рассмотрим другой простой случай: величина z является произвольной функцией только одной величины x :

$$z = z(x), \quad (19)$$

а величина x принимает значения в доверительном интервале $(\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x)$.

Предполагая, что погрешность Δx мала, можно считать, что поведение функции (19) не меняется резко в указанном интервале. Предположим также, что на этом интервале функция возрастает. Тогда наибольшее вероятное значение величины z есть $z_{\max} = z(x_{\max}) = z(\bar{x} + \Delta x)$, а наименьшее — $z_{\min} = z(x_{\min}) = z(\bar{x} - \Delta x)$.

Поскольку погрешность Δx мала, то интервал $(\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x)$ также мал, поэтому часть графика функции $z(x)$, используемая в данном рассуждении, приближенно представляет прямую линию. Тогда ясно, что $z_{\max}$ и $z_{\min}$ находятся на одном расстоянии от $z_{\text{наил}}$. По рис. 1.5 видно: $\Delta z = z_{\max} - z_{\text{наил}} = z(\bar{x} + \Delta x) - z(\bar{x})$. При малых Δx можно написать $z(\bar{x} + \Delta x) - z(\bar{x}) \simeq z'(x)\Delta x$, где производная $z'(x)$ берется в точке $x = \bar{x}$. Таким образом,

$$\Delta z = z'(x)\Delta x.$$

Если функция на заданном участке убывает, то производная будет отрицательной, и мы по-

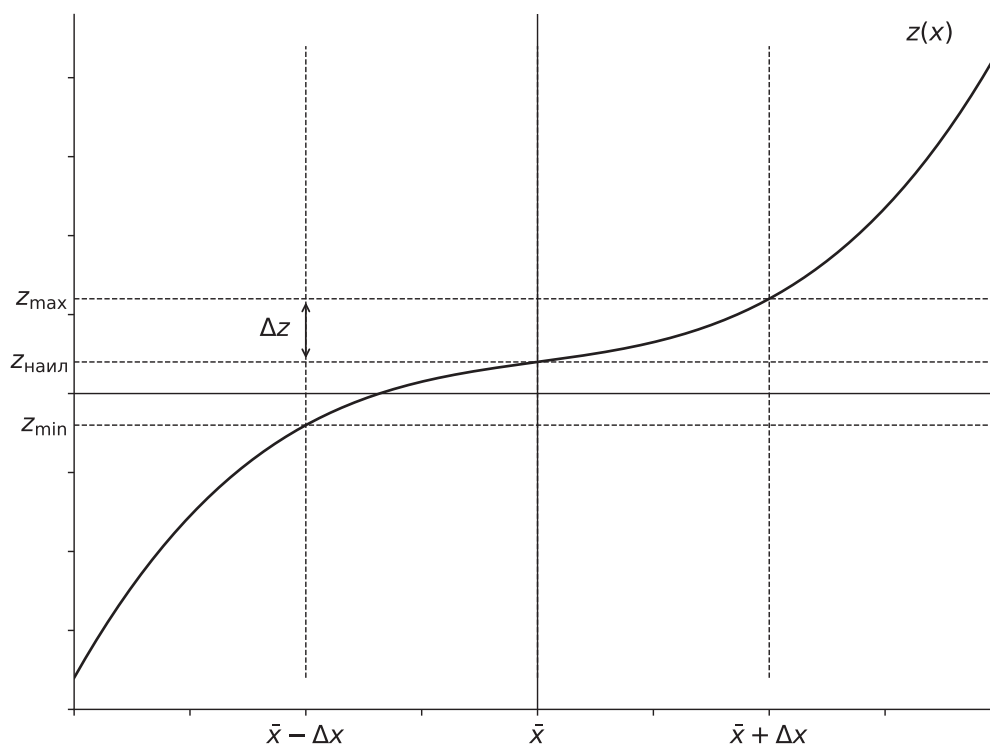


Рис. 1.5: Иллюстрация связи погрешности функции с погрешностью переменной на графике $z(x)$

лучим

$$\Delta z = -z'(x)\Delta x.$$

Случаи возрастания и убывания функции можно объединить, если записать

$$\Delta z = |z'(x)|_{x=\bar{x}} \Delta x. \quad (20)$$

Это и есть окончательная формула⁸ для расчета погрешности.

Относительная погрешность величины z

$$\delta z = \frac{\Delta z}{z_{\text{наил}}} = \frac{z'(x)|_{x=\bar{x}}}{z(\bar{x})} \Delta x. \quad (21)$$

Рассмотрим примеры.

Умножение измеренного значения на точное число

Пусть $z(x) = Ax$, где число A не содержит погрешности. Тогда

$$\Delta z = A \Delta x.$$

То есть в этом случае абсолютная погрешность рассчитываемой величины равна просто погрешности измеренной величины, умноженной на это число.

⁸Данная формула, однако, является некорректной вблизи экстремума (максимума или минимума) функции $z(x)$.

Степенная функция

Пусть $z(x) = x^n$, где n – любое число. Тогда погрешность

$$\Delta z = |nx^{n-1}| \Delta x.$$

Если разделить обе части этого равенства на $z = x^n$, получим

$$\frac{\Delta z}{z} = |n| \frac{\Delta x}{x} \quad \text{или} \quad \delta z = |n| \delta x.$$

Мы получили простое правило: относительная погрешность для степенной функции $z = x^n$ в $|n|$ раз больше, чем относительная погрешность x .

Логарифмическая функция

Пусть x – положительная величина, а $z(x) = \ln x$. Тогда погрешность

$$\Delta z = \frac{1}{x} \Delta x.$$

Формально получается, что абсолютная погрешность $\ln x$ равна относительной погрешности величины x , что часто вызывает путаницу. Важно помнить, что абсолютная погрешность величины $\ln x$ – безразмерна, так же как безразмерен и сам логарифм.

Тригонометрические функции

Предположим, что измерен угол $\theta = \bar{\theta} \pm \Delta\theta$ и нам требуется найти $\cos \theta$ с погрешностью.

Наилучшей оценкой для $\cos \theta$ является $\cos \bar{\theta}$. А погрешность мы вычисляем следующим образом:

$$\Delta(\cos \theta) = |(d \cos \theta)'| \Delta\theta = |\sin \theta| \Delta\theta.$$

При вычислениях здесь нужно градусы перевести в радианы.

Погрешность функции нескольких переменных

Для произвольной функции нескольких измеряемых величин $z(x, y, \dots)$, если погрешности измерений $x, y, \dots$ независимы и случайны (и отвечают одному значению доверительной вероятности), погрешность z равна

$$\Delta z = \sqrt{(z'_x \Delta x)^2 + (z'_y \Delta y)^2 + \dots}, \quad (22)$$

где z'_x, z'_y обозначают производные от функции $z(x, y, \dots)$ по x и по y , соответственно.⁹

Если погрешности не являются независимыми и случайными, то вместо квадратичного сложения используется обычное. Обычное сложение дает верхнюю границу (максимальное

⁹Такие производные называются частными.

значение) для погрешности величины z . Т.е. в любом случае погрешность может быть оценена как

$$\Delta z \simeq |z'_x| \Delta x + |z'_y| \Delta y + \dots \quad (23)$$

Для наглядности рассмотрим пример: пусть косвенно измеряемая величина представляет собой произведение двух положительных (независимых и случайных) величин x и y :

$$z(x, y) = xy.$$

Тогда $z'_x = (xy)'_x = y$, $z'_y = (xy)'_y = x$, и мы получим: $\Delta z = \sqrt{y^2 \Delta x^2 + x^2 \Delta y^2}$. Разделим это равенство на $z = xy$:

$$\frac{\Delta z}{z} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}.$$

Таким образом, при перемножении измеренных величин квадратично складываются их относительные погрешности:

$$\delta z = \sqrt{(\delta x)^2 + (\delta y)^2}.$$

Если величины не являются независимыми и случайными, то относительные погрешности складываются, обычно:

$$\delta z = \delta x + \delta y.$$

Можно легко проделать вывод, что для частного $z = x/y$ формулы получатся такие же. Если x и y могут принимать и отрицательные значения, в нужных местах добавляются модули. Полученный результат можно обобщить на произвольное число перемножаемых величин.

Сформулируем правило: если рассчитываемая величина выражается через измеренные величины как

$$z = \frac{x y \dots}{u v \dots}, \quad (24)$$

то относительная погрешность рассчитываемой величины — это квадратичная сумма относительных погрешностей измеренных величин (если измеренные величины независимы и случайны):

$$\delta z = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2 + \delta u^2 + \delta v^2 + \dots} \quad (25)$$

или

$$\delta z = \delta x + \delta y + \delta u + \delta v + \dots \quad (26)$$

(как верхняя оценка для погрешности).

1.5 Точность задания погрешностей

Погрешность определения погрешности

Как уже обсуждалось выше, если бы в эксперименте среднеквадратичная ошибка σ_q определялась из бесконечно большого числа измерений, то она бы равнялась стандартному отклонению σ . Чем меньше N , тем сильнее σ_q отличается от σ . Получается, что **погрешность сама по себе известна с некоторой погрешностью**. Например, при $N = 50$ погрешность определения σ составляет около 10 %, а при $N = 25$ — более 15 %. При меньшем же количестве

измерений можно говорить лишь об **оценке** погрешности с той или иной точностью.

Точность задания любого числа определяется количеством содержащихся в нем значащих цифр. Значащей называется любая цифра числа, начиная с первой слева ненулевой цифры. Это означает, что значащей называется любая цифра, отличная от нуля, а также нуль, если он не стоит до первой отличной от нуля цифры.

Например, в числе

$$0,0057040$$

значащими являются последние пять цифр. Первые три нуля не являются значащими: они определяют разряды: если переписать число в виде $5,7040 \cdot 10^{-3}$, то эти нули отсутствуют. Другие два нуля значащие: их наличие означает, что в этих разрядах числа содержится именно 0, а не 1, не 2 и т. д. В случае, если бы в данном числе последний нуль не являлся значащим, оно должно было быть записано в виде 0,005704.

При написании больших целых чисел, например числа 178000, нули справа могут служить как значащими цифрами, так и для определения разрядов остальных цифр. Чтобы избежать неопределенности, число следует записать в виде $1,78 \cdot 10^5$, если оно имеет три значащих цифры, или же $1,7800 \cdot 10^5$ — если оно имеет пять значащих цифр.

Округление погрешности

Так как погрешность задана приближенно, не следует оставлять большого количества значащих цифр. Невероятно, например, чтобы погрешность измерения была известна с точностью до пяти значащих цифр. Т. е. запись вида

$$\text{Результат измерения} = (7,051 \pm 0,38103) \text{ единиц измерения}$$

является **абсурдной**. Если в результате расчета погрешность оказалась равна 0,38103, это значение надо округлить.

В учебных экспериментах количество измерений мало и не обеспечивает высокой точности в определении ошибок, а лишь позволяет провести их оценку. Поэтому все погрешности обычно округляют до одной значащей цифры, кроме случая, когда первая значащая цифра в погрешности Δq равна 1. Например, если погрешность получилась равна 0,14, отбрасывание четверки изменит ошибку на 40 %. Поэтому в таких случаях при округлении следует сохранить две значащие цифры.

Округление результата измерения

После расчета и округления погрешности необходимо проанализировать значащие цифры в результате измерения. Так, в нашем примере после округления $0,38103 \approx 0,4$, и мы получили бы

$$\text{Результат измерения} = (7,051 \pm 0,4) \text{ единиц измерения},$$

но такая запись также **лишена смысла**, ведь погрешность 0,4 означает, что в сотых и тысячных долях результата могло бы стоять, например не 51, а 29 или 00. Ясно, что значащие цифры 5 и 1 являются в такой записи лишними и должны быть округлены. Верная запись данного результата:

$$\text{Результат измерения} = (7,1 \pm 0,4) \text{ единиц измерения.}$$

Правило округления результата измерений:

Последняя значащая цифра результата должна стоять в той же десятичной позиции (том же разряде), как и последняя значащая цифра указываемой погрешности.

Замечание. Точность обработки любых чисел должна быть согласована с точностью определения погрешности. Слишком грубое округление чисел на промежуточных этапах расчетов может искусственно ухудшить точность результата. С другой стороны, вычисления с большим количеством значащих цифр, чем это обосновано, повышают трудозатраты и при этом создают ложное впечатление повышения точности. Поэтому, как только во время расчетов становится понятным предположительный порядок величины погрешности, все числа можно промежуточно округлить, оставив на один знак больше, чем количество предполагаемых цифр в результате. Округление погрешности до одной значащей цифры и соответствующее округление результата эксперимента проводится после выполнения всех вычислений.

1.6 Построение и обработка графиков

Основное преимущество графического метода представления результатов эксперимента – это его наглядность. Графики позволяют легко обнаружить наличие важных свойств, полученных в эксперименте данных.

Проиллюстрируем наглядность графического метода на примере исследования зависимости скорости течения воды v по трубе от перепада давлений на единицу длины трубы Δp . В зависимости от разности давлений на концах трубы течение может быть ламинарным или турбулентным. Известно, что пока поток остается ламинарным, скорость течения прямо пропорциональна перепаду давления. Поэтому, исследуя данную зависимость, мы можем определить, при каком давлении течение жидкости перестает быть ламинарным и становится турбулентным. В таблице содержатся результаты измерений, но по цифрам, приведенным в таблице сложно определить, где пропорциональность начинает нарушаться. При нанесении же этих данных на график (рис. 1.6) точка, в которой нарушается прямая пропорциональность, т. е. течение жидкости перестает быть ламинарным, сразу же легко определяется. Точ-

Δp , Па	7,8	15,6	23,4	31,3	39,0	46,9	54,7	62,6	78,3	86,0
$\bar{v}$, мм/с	35	65	78	126	142	171	194	226	245	258

Δp , Па	87,6	93,9	101,6	109,6	118,0
$\bar{v}$, мм/с	258	271	277	284	290

ность полученного значения разности давлений при этом зависит от разных факторов: как от погрешностей отдельных точек, так и от общей “плотности” точек на графике.

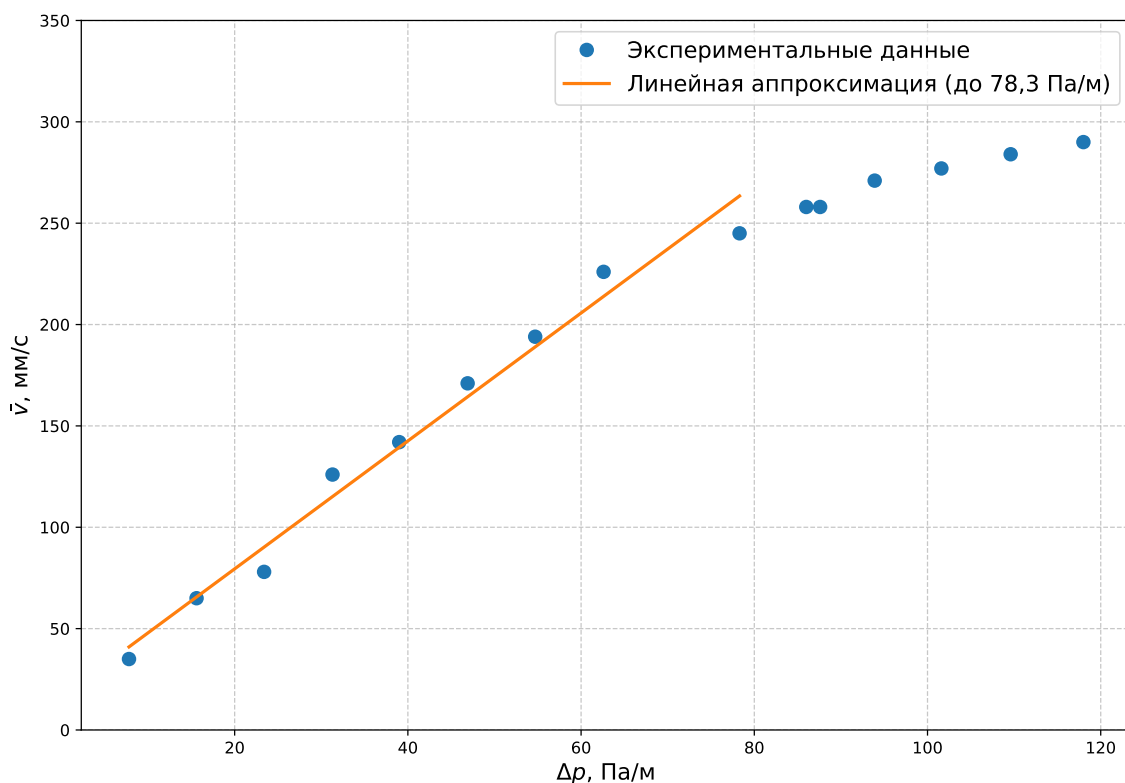


Рис. 1.6: Зависимость средней скорости течения воды от перепада давления между концами трубы

Таким образом, графическое представление результатов измерений позволило нам оценить, вблизи каких значений меняется характер зависимости между исследуемыми величинами и сделать вывод о характере физических процессов в разных областях их изменения. Графики также позволяют проводить наглядное сравнение экспериментальных и теоретических данных или устанавливать вид зависимости между изучаемыми величинами, т. е. находить вид функции $f(x)$ и определять ее параметры. Чаще всего это либо наклон прямой, изображающей зависимость между двумя величинами, либо длины отрезков, отсекаемых прямой на координатных осях. Также при помощи графика могут быть определены точки максимума и минимума функции, точки перегиба, период функции и ее асимптотическое значение.

Рассмотрим в первую очередь основные правила построения графиков, а затем методы построения прямой, наилучшим образом согласующейся с экспериментальными данными, работу с различными видами графиков и способы оценки параметров кривых, построенных по экспериментальным точкам.

Основные правила построения графиков

График начинается с координатных осей. По оси абсцисс принято откладывать независимую переменную, т. е. величину, значения которой задаёт сам экспериментатор, а по оси ординат — ту величину, которую он при этом измеряет. **Координатные оси проводятся карандашом по линейке.**

На оси наносятся масштабные деления: равноотстоящие “круглые” числа, которые легко считывать и в промежутке между которыми легко проводить интерполяцию промежуточных значений. Например: 1; 2; 3; ... или 2; 4; 6; ... или 2,20; 2,25; 2,30; 2,35; Не следует расставлять метки слишком часто — в большинстве случаев достаточно нанести от четырех до десяти меток. **При выборе масштаба следует руководствоваться следующими правилами:**

1. Точки на графике не должны сливаться друг с другом.
2. Масштаб должен быть простым, т. е. лучше всего выбирать масштаб, при котором единица измеряемой величины (без учета порядка) соответствует 1, 2 или 5 см.

Кстати, точка пересечения осей вовсе необязательно должна соответствовать нулю по одной или обеим осям. **Около концов осей указываются обозначения откладываемых величин и единицы их измерения**, а также для удобства в конец оси обычно выносятся **порядок масштаба**, т. е. $10^{\pm k}$ (он должен быть указан перед единицей измерения физической величины). Если порядок имеет общепринятое обозначение (10^3 – кило, 10^{-3} – милли и т. д.), то его вносят в размерность: кг, мм и т. д.

После оформления осей на график наносятся экспериментальные точки — можно обозначить данные кружками, ромбами, треугольниками и т. п. Если в одних координатных осях строится несколько графиков, то для обозначения экспериментальных точек, относящихся к разным кривым, обычно используются различные цвета или различные символы. Затем **для каждой точки откладывают погрешности** обеих физических величин (и задаваемой, и измеряемой) в виде горизонтальных и вертикальных отрезков, отложенных вправо-влево и вверх-вниз от самой экспериментальной точки. Длины этих отрезков — доверительные интервалы обеих величин в масштабе графика. Если одна из величин не имеет погрешности, либо эта погрешность настолько мала, что укладывается в пределах точки, соответствующие отрезки не откладываются. Если погрешность величин, откладываемых по обеим осям, на графике не видна, это, скорее всего, означает, что масштаб выбран неверно¹⁰ и для графического анализа данных такой график не подходит.

Когда все экспериментальные точки и их погрешности нанесены на бумагу, в случае необходимости¹¹ карандашом строится график — **проводится плавная кривая, проходящая через области погрешностей всех точек**, по возможности как можно ближе к самим точкам. Большинство физических зависимостей отвечают гладким функциям, поэтому не следует соединять точки ломаной линией. Если теория предсказывает, что исследуемая зависимость линейна, то через области погрешностей экспериментальных точек по линейке проводится прямая линия, визуально наилучшим образом аппроксимирующая экспериментальные результаты.

После построения графика в верхней или нижней части листа пишется заголовок, содержащий краткое описание изображенной зависимости.

¹⁰Исключением являются градуировочные графики.

¹¹Экспериментальную кривую можно не проводить в случае, если в тех же осях строится теоретическая кривая, или если количество экспериментальных точек велико, и вид полученной зависимости очевиден. Однако, если предполагается определение по графику каких-либо величин, проведение экспериментальной кривой обязательно.

Аппроксимация прямой

Для сравнения экспериментальных результатов с предсказанием теории чаще всего по осям графика откладывают те величины, которые связаны между собой линейно: из-за особенностей нашего восприятия различить две близкие по форме кривые линии может быть довольно сложно, а прямую линию всегда легко отличить от других зависимостей.

Например, при исследовании свободного падения тела в поле тяжести Земли время падения t и высота h связаны соотношением $t = \sqrt{2h/g}$. Чтобы получить прямую линию, следует строить график, где по осям откладываются величины t^2 и h (либо t и $\sqrt{h}$). В этом случае будет легко установить соответствие между найденной в эксперименте и теоретической зависимостями, и, кроме того, угол наклона прямой позволит определить ускорение свободного падения g .

Итак, довольно часто при обработке результатов эксперимента возникает задача построения прямолинейной зависимости

$$y = kx + b,$$

наилучшим образом согласующейся с экспериментальными данными, и определения углового коэффициента k и коэффициента наклона наилучшей прямой b . Параметр b равен длине отрезка между началом координат и точкой пересечения прямой и вертикальной оси.

Проведение наилучшей прямой “на глаз”

Наиболее простым, хотя и неточным методом определения параметров является проведение наилучшей прямой “на глаз” (прикладывая линейку так, чтобы по обе стороны от нее оказалось примерно одинаковое количество экспериментальных точек, и отклонения точек от проведенной линии были по возможности минимальны). Желательно, чтобы линия проходила через все области погрешностей, указанные на графике (рис. 1.7).

Коэффициент b может быть определен непосредственно из графика продлением прямой до пересечения с осью y , тогда он равняется длине отрезка между точкой пересечения и нулевой отметкой (см. рис. 1.7). Определенная таким образом величина b может быть как положительной, так и отрицательной. Для определения коэффициента наклона k на проведенной прямой выбирают произвольно две точки, далеко отстоящие друг от друга (см. рис. 1.7), находят проецированием на оси их координаты — (x_1, y_1) и (x_2, y_2) — и вычисляют k по формуле

$$k \simeq \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \quad (27)$$

Погрешность углового коэффициента оценивается как

$$\Delta k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \sqrt{\left(\frac{\Delta x_{\max}}{x_2 - x_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y_{\max}}{y_2 - y_1}\right)^2}, \quad (28)$$

где $\Delta x_{\max}$ и $\Delta y_{\max}$ — наибольшие из отклонений точек от проведенной прямой в горизонтальном и вертикальном направлениях с учетом их погрешностей (см. рис. 1.7).

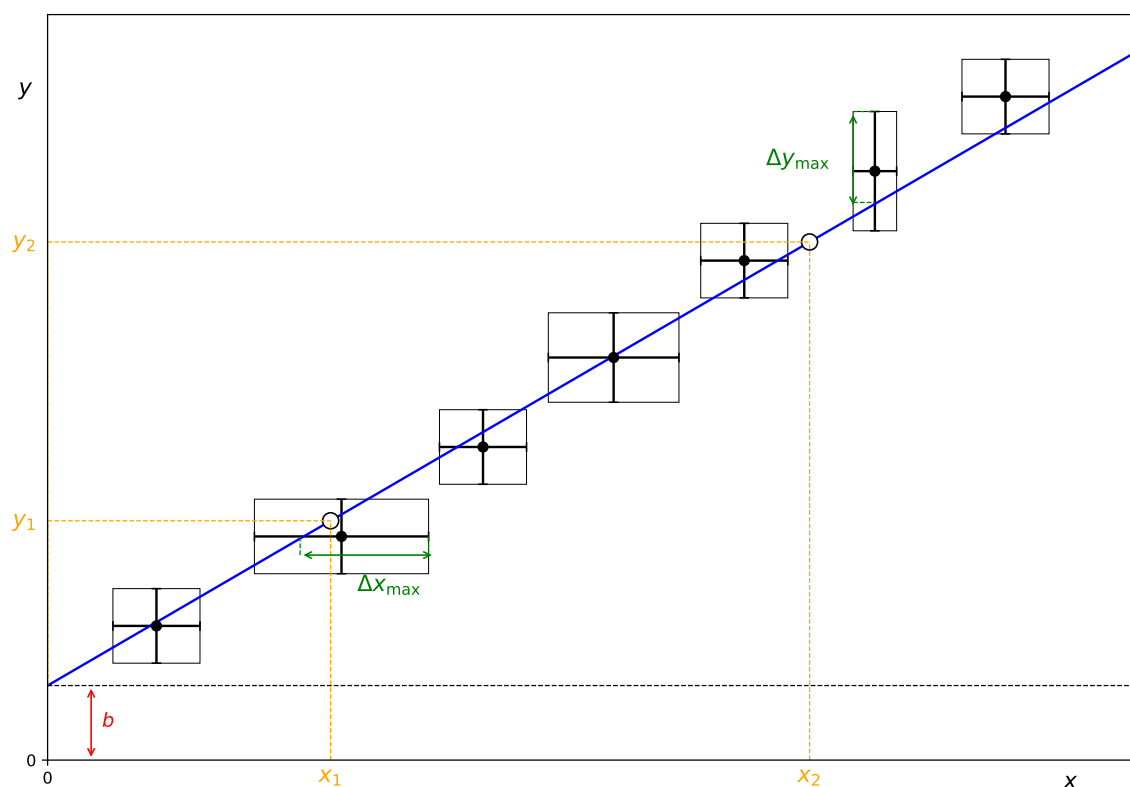


Рис 1.7: Проведение наилучшей прямой и приближенное определение коэффициентов k и b по графику. Областью погрешности считается прямоугольник со сторонами, равными погрешностям в масштабе графика, с центром в экспериментальной точке. В случае, если погрешности отложены только по одной оси, областью погрешности считается сам отрезок, обозначающий погрешность; $\Delta x_{\max}$ и $\Delta y_{\max}$ — максимально возможные отклонения результатов измерений от наилучшей прямой в горизонтальном и вертикальном направлениях с учетом доверительных интервалов точек

Описанный метод проведения прямой “на глаз” может применяться только для грубых оценок. Для более точного определения параметров наилучшей прямой по координатам экспериментальных точек обычно используют метод наименьших квадратов.

Метод наименьших квадратов

Метод наименьших квадратов применяется для аппроксимации экспериментальных данных как линейной функцией, так и многочленами более высоких степеней. Суть метода заключается в том, что если вид функциональной зависимости $y = f(x)$ известен с точностью до значений некоторых параметров, то эти параметры подбираются так, чтобы среднеквадратичное отклонение координат экспериментальных точек от расчетной кривой (графика используемой для аппроксимации функции) было наименьшим.

Для аппроксимации набора точек с координатами

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$$

прямолинейной функцией $y(x) = kx + b$ необходимо найти такие значения параметров k и b , при которых сумма квадратов отклонений каждого y_i от отвечающего ему выражения $kx_i + b$

была бы минимальной:

$$S = (y_1 - y(x_1))^2 + (y_i - y(x_i))^2 + \dots + (y_N - y(x_N))^2 = \\ = (y_1 - (kx_1 + b))^2 + (y_2 - (kx_2 + b))^2 + \dots + (y_N - (kx_N + b))^2 = \min.$$

Из системы уравнений, которая должна удовлетворяться для выполнения этого условия, находятся требуемые нам параметры:

$$k_{\text{наил}} = \frac{\bar{y} \cdot \bar{x} - \overline{x \cdot y}}{(\bar{x})^2 - \overline{x^2}} \quad \text{и} \quad b_{\text{наил}} = \bar{y} - k_{\text{наил}} \bar{x}, \quad (29)$$

где все средние – арифметические: $\overline{x \cdot y} = (x_1 y_1 + \dots + x_N y_N)/N$, $\overline{x^2} = (x_1^2 + \dots + x_N^2)/N$ и т.д. Эти параметры позволяют построить прямую, наилучшим образом согласующуюся с экспериментальными данными.

Законы математической статистики позволяют оценить и среднеквадратичные погрешности параметров k и b :

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{N [(y_1 - kx_1 - b)^2 + \dots + (y_N - kx_N - b)^2]}{(N - 2) [N(x_1^2 + \dots + x_N^2) - (x_1 + \dots + x_N)^2]}}, \quad (30)$$

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{(x_1^2 + \dots + x_N^2) [(y_1 - kx_1 - b)^2 + \dots + (y_N - kx_N - b)^2]}{(N - 2) [N(x_1^2 + \dots + x_N^2) - (x_1 + \dots + x_N)^2]}}. \quad (31)$$

Если же согласно теоретической модели ожидаемая прямая проходит через начало координат ($y = kx$, $b = 0$), то значение углового коэффициента наилучшей прямой и его среднеквадратичная погрешность определяются соотношениями

$$k_{\text{наил}} = \frac{x_1 y_1 + \dots + x_N y_N}{x_1^2 + \dots + x_N^2}, \quad (32)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{(y_1 - kx_1)^2 + \dots + (y_N - kx_N)^2}{(N - 1)(x_1^2 + \dots + x_N^2)}}. \quad (33)$$

В этом случае масштаб выбирайте так, чтобы начало координат было отображено на графике. После расчета параметров k и b методом наименьших квадратов на график наносятся две точки с координатами $(0, b_{\text{наил}})$ и $(x_0, k_{\text{наил}}x_0 + b_{\text{наил}})$, где x_0 – произвольное значение переменной x . Затем через эти точки по линейке проводится прямая.

Логарифмические масштабы осей

При исследовании функциональных зависимостей, отличных от линейных, а также в случае, когда откладываемые по осям величины меняются в очень широком диапазоне, охватывающем несколько порядков (например, рис. 1.8), часто используют логарифмические масштабные шкалы.

Логарифмическая шкала – это неравномерная разметка, при которой на оси отложены отрезки, пропорциональные десятичному логарифму откладываемой величины. При

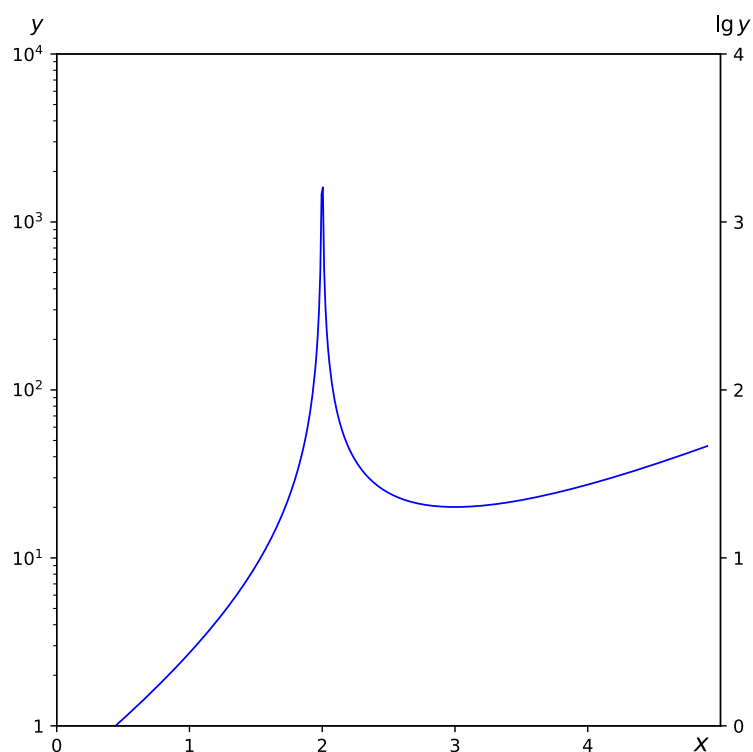


Рис 1.8: График зависимости $y(x) = e^x / |x-2|$ в полулогарифмическом масштабе. Величина y меняется в диапазоне, охватывающем несколько порядков. Слева (на оси ординат) показана неравномерная шкала значений y , справа – равномерная шкала значений $\lg y$

этом числа, проставляемые у масштабных делений, соответствуют значению самой величины (а не ее логарифма). При такой разметке на оси равномерно расставлены порядки: 1, 10, 100 и т. д. Очевидно, если проставить вдоль той же оси деления, соответствующие логарифму величины, то они расположатся равномерно. Поэтому если вместо использования неравномерной шкалы для величины откладывать значения ее логарифма по обычной равномерной шкале, на графике получится тот же результат. Для иллюстрации этого факта на рис. 1.8 слева показана ось значений y с логарифмической шкалой, а справа для сравнения показана отвечающая ей шкала $\lg y$ с равномерными делениями:

$$y = 1 \text{ отвечает } \lg y = 0, y = 10 \rightarrow \lg y = 1, y = 100 \rightarrow \lg y = 2, \dots$$

Если логарифмическая шкала нанесена на одной из координатных осей (как на рис. 1.8), масштаб графика называется **полулогарифмическим**. Если обе оси имеют логарифмическую разметку, то говорят, что график имеет **логарифмический** (или дважды логарифмический) масштаб.

Для экспоненциальных или других показательных зависимостей используют полулогарифмический масштаб: на оси ординат вместо отрезков, пропорциональных y , откладываются отрезки, пропорциональные $\lg y$, и получаемая зависимость примет вид прямой, что позволит легко определить угловой коэффициент графика, т. е. коэффициент, фигурирующий в показателе экспоненты.

Для примера рассмотрим зависимость $y(x) = e^x$, изображенную в обычном масштабе на рис. 1.9, а. Если откладывать величину y по оси ординат, а по делениям, пропорциональ-

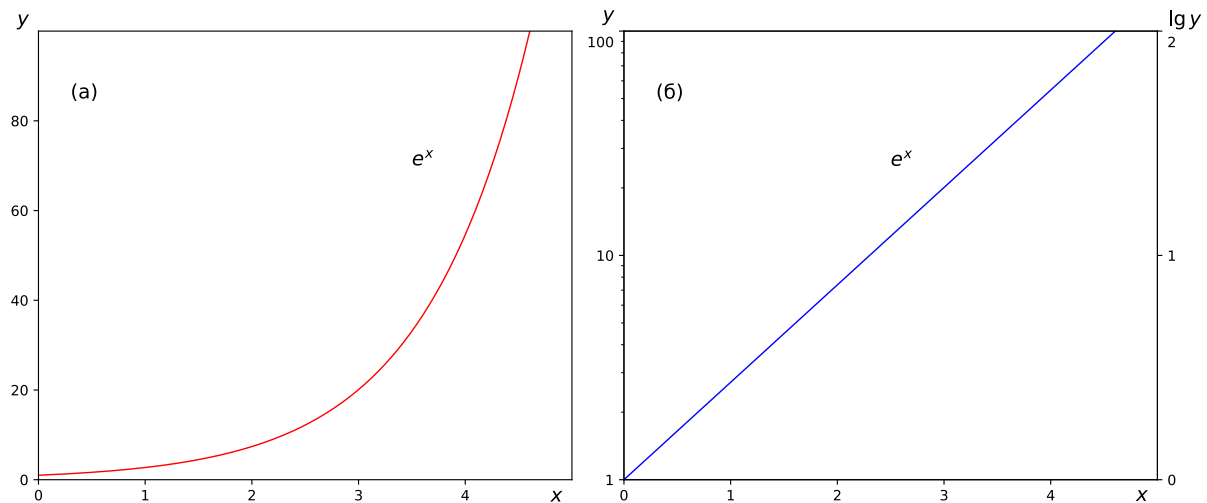


Рис 1.9: График зависимости $y = e^x$: (а) в обычном масштабе, (б) в полулогарифмическом масштабе

ным $\lg y$, на графике будет получаться прямая линия (см. рис. 1.9, б): $\lg y = \lg(e^x) = \frac{\ln(e^x)}{\ln 10} \simeq 0,4343 x$. Коэффициент наклона этой прямой к оси равен коэффициенту перед x . В данном примере он равен $1/\ln 10 \simeq 0,4343$. Для удобства допускается откладывать по оси ординат не десятичный, а натуральный логарифм величины y , в этом случае мы бы получили коэффициент наклона, равный 1.

В общем случае, если функциональная зависимость имеет вид

$$y(x) = ae^{kx},$$

откладывая по оси ординат натуральный логарифм y , мы получим следующую прямую:

$$\ln y = \ln a + kx. \quad (34)$$

Как видно, коэффициенты a и k исследуемой функции легко определяются по графику как параметры прямой.

Если исследуемая зависимость имеет степенной вид

$$y(x) = \alpha x^n,$$

то для сведения криволинейного графика к прямолинейному используют логарифмический (дважды логарифмический) масштаб. В этом случае по оси откладывается десятичный логарифм измеряемой величины, например $\lg y$, а по оси абсцисс — логарифм аргумента, т. е. $\lg x$ (логарифмы могут быть натуральными).

Вычислив логарифм исследуемой зависимости

$$\lg y = \lg(\alpha x^n) = \lg \alpha + \lg x^n = \lg \alpha + n \lg x, \quad (35)$$

легко увидеть, что полученный график должен быть прямолинейным (рис. 1.10), угловой коэффициент полученной прямой будет равен показателю степени n , а отрезок, отсекаемый прямой от оси ординат, будет определять коэффициент α (точнее, $\lg \alpha$).

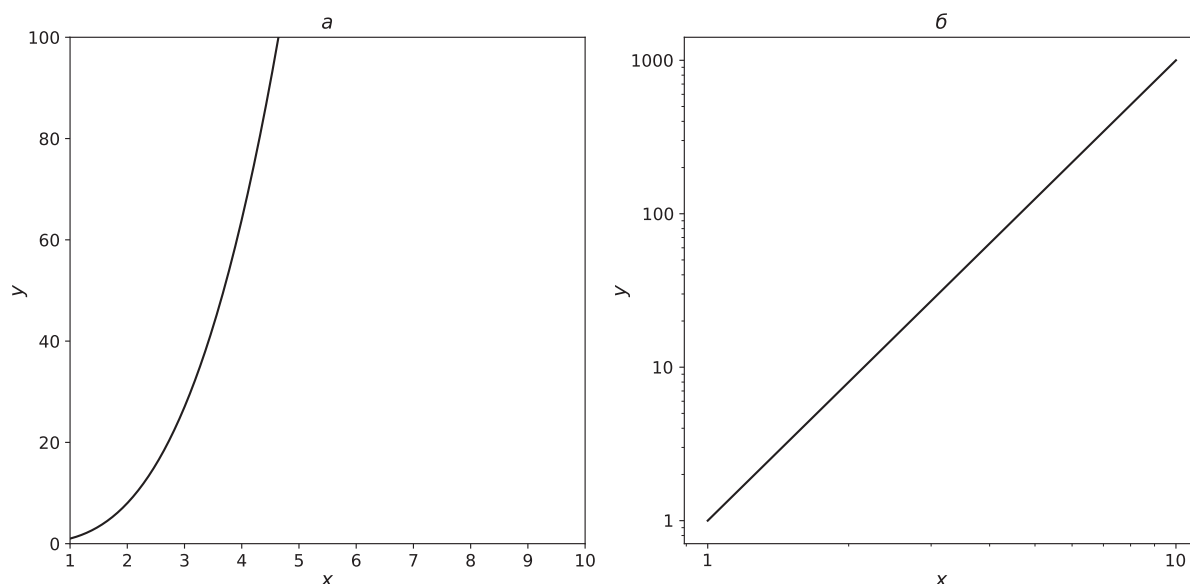


Рис 1.10: График зависимости $y = x^3$: а – в обычном масштабе, б – в логарифмическом масштабе. При логарифмическом масштабе расстояния между делениями на обеих осях пропорциональны логарифмам величин ($\lg x$ и $\lg y$), а числа, стоящие у делений, отвечают непосредственно значениям x и y

Замечание. Строго говоря, большинство физических величин обладают размерностью, а логарифмы можно вычислять только от безразмерных чисел. Поэтому при построении графика в полулогарифмическом или логарифмическом масштабах предполагается, что вычисляются логарифмы не самих измеренных величин, а их отношения к единице измерения, общей для всех экспериментальных точек.¹² Полученное значение логарифма будет зависеть от выбранной единицы измерения.

Например, если измеренное значение вязкости воздуха составляет $\eta = 16,9 \cdot 10^{-6}$ Па·с, то при вычислении натурального логарифма получим $\ln \eta = \ln(16,9 \cdot 10^{-6}) = -10,988$. Если же в качестве единицы измерения использовать мкПа·с, то вычисление логарифма вязкости приводит к следующему результату: $\ln \eta = \ln(16,9) = 2,827$. Учет порядка измеряемой величины в данном случае приведет к тому, что весь график целиком сместится на константу, равную логарифму этого порядка, – на значение $\ln(10^{-6}) = -13,815$. Смещение графика как целого не изменит ни вида зависимости, ни коэффициента наклона графика.

Поскольку в большинстве экспериментов величина, приводимая в качестве окончательного результата, вычисляется именно при помощи углового коэффициента, использование разных единиц измерения, сдвигающее график, не влияет на конечный результат эксперимента.

Для удобства построения графика в логарифмическом масштабе иногда вычисляется отношение измеренной величины не к единице измерения, а к какому-то параметру нужной размерности, который выбирается самим экспериментатором так, чтобы числа, получаемые при расчете логарифма, были наиболее удобны для восприятия. В этом случае важно проследить, чтобы каждое из значений (для всех экспериментальных и теоретических точек) было

¹²То же замечание относится и к построению обычных графиков, если строятся функциональные зависимости типа $\log x$, $\exp x$, $\sin x$ и т. д. Все эти функции предполагают “обезразмеривание” аргумента.

разделено на одну и ту же величину, иначе сравнение результатов опыта с теорией будет затруднено.

Градуировочные графики

Градуировочным называется график, определяющий измеряемую величину как функцию показаний прибора. По такому графику устанавливается соответствие между шкалой прибора и показаниями эталонного (более точного, контрольного) прибора, либо несколькими известными заранее значениями измеряемой величины.

При построении градуировочных графиков чаще всего используется линейная интерполяция (не путать с интерполяцией при помощи наилучшей прямой): после определения значений функции y_i для каждого из выбранных значений аргумента x_i полагают, что на промежутках между соседними точками зависимость $y(x)$ линейна. Полученные экспериментальные точки соединяются отрезками прямых. График, полученный линейной интерполяцией, имеет вид ломаной линии, проходящей через экспериментальные точки.

Этот принцип построения градуировочного графика связан с тем, что при градуировке прибора требуют, чтобы контрольный прибор обладал очень большой точностью. Обычно используется контрольный прибор с классом точности в три раза меньшим, чем класс точности градуируемого прибора. В этом случае погрешность значений y_i настолько мала, что попадает в пределы точек, а измеренное значение считается равным истинному значению измеряемой величины.

В случае, если техническое оснащение лаборатории не позволяет использовать контрольные приборы высокой точности, и погрешности определенных значений y_i с учетом оптимального масштаба становятся вполне заметными на графике отрезками, строить градуировочный график в виде ломаной линии некорректно. В этой ситуации следует отметить на градуировочном графике погрешности всех измеренных значений и провести гладкую кривую (или наилучшую прямую) через области погрешностей экспериментальных точек.

Определение величин по графику

Графическая обработка экспериментальных данных проста, наглядна, чаще всего не требует длительных вычислений и, в то же время, дает хорошие оценочные результаты. Рассмотрим несколько примеров определения физических величин и их погрешностей с помощью графической обработки результатов.

Графическая интерполяция

Кривую, построенную по экспериментально полученным точкам (x_i, y_i) в некоторой области изменения аргумента, можно использовать для нахождения значений y в любой промежуточной точке x этой области. Эта операция называется графической интерполяцией. Потребность в графической интерполяции возникает в случаях, когда целью эксперимента является поиск особой точки функциональной зависимости между физическими величинами (точки максимума, минимума, перегиба, точки выхода на насыщение и т. п.).

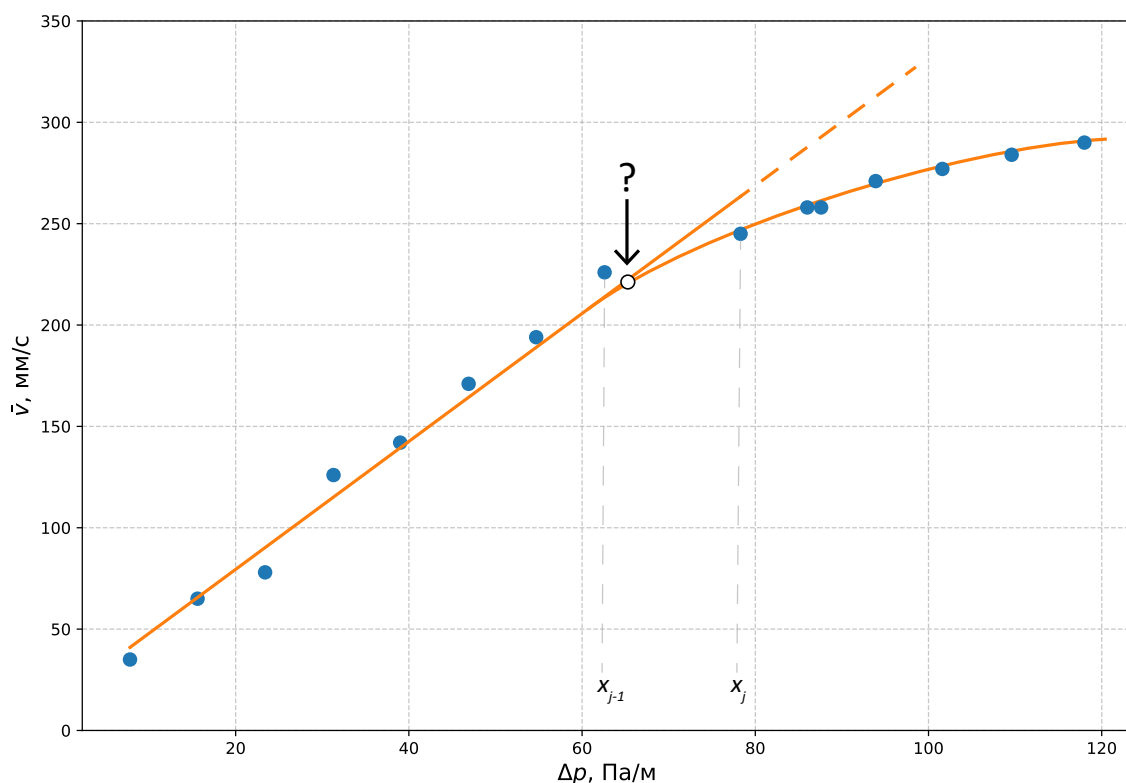


Рис. 1.11: Зависимость средней скорости течения воды от перепада давления между концами трубы. Знаком вопроса помечена предполагаемая точка, в которой нарушается прямая пропорциональность между v и Δp . Её координаты находятся методом графической интерполяции

Вернемся к примеру на рис. 1.6, где изображена зависимость скорости течения жидкости от перепада давления на концах трубы. Та точка кривой, в которой нарушается прямая пропорциональность между v и Δp , соответствует тем значениям величин, при которых течение жидкости становится турбулентным. Эта точка, однако, не совпадает ни с одним из значений, полученных экспериментально и нанесенных на график (см. рис. 1.11), и потому определение её координат требует графической интерполяции.

Обозначим координаты искомой точки (x_0, y_0) . Поскольку эта точка определяется экспериментатором самостоятельно по виду проведенной им же кривой (глядя на полученные в эксперименте точки, точку x_0 можно поставить, вообще говоря, в любое место между 60 и 80 Па), т. е. является результатом субъективных оценок, единственным объективным критерием является нахождение точки (x_0, y_0) между двумя ближайшими к ней экспериментальными точками (рис. 1.11). Другими словами, достоверно известно только то, что x_0 лежит в интервале (x_{j-1}, x_j) . Поэтому **погрешность определения координаты x_0** можно приближенно оценить как

$$\Delta x \approx \frac{x_j - x_{j-1}}{2}.$$

После выбора x_0 искомое значение y_0 определяется по графику проецированием найденной точки на ось ординат.

Погрешность функции при графической интерполяции определяется двумя источниками ошибок: погрешностью проведения кривой и погрешностью определения координаты x_0 искомой точки. Метод оценки итоговой погрешности Δy показан для произвольной кривой на рис. 1.12. По обе стороны от основной кривой проводятся две дополнительные

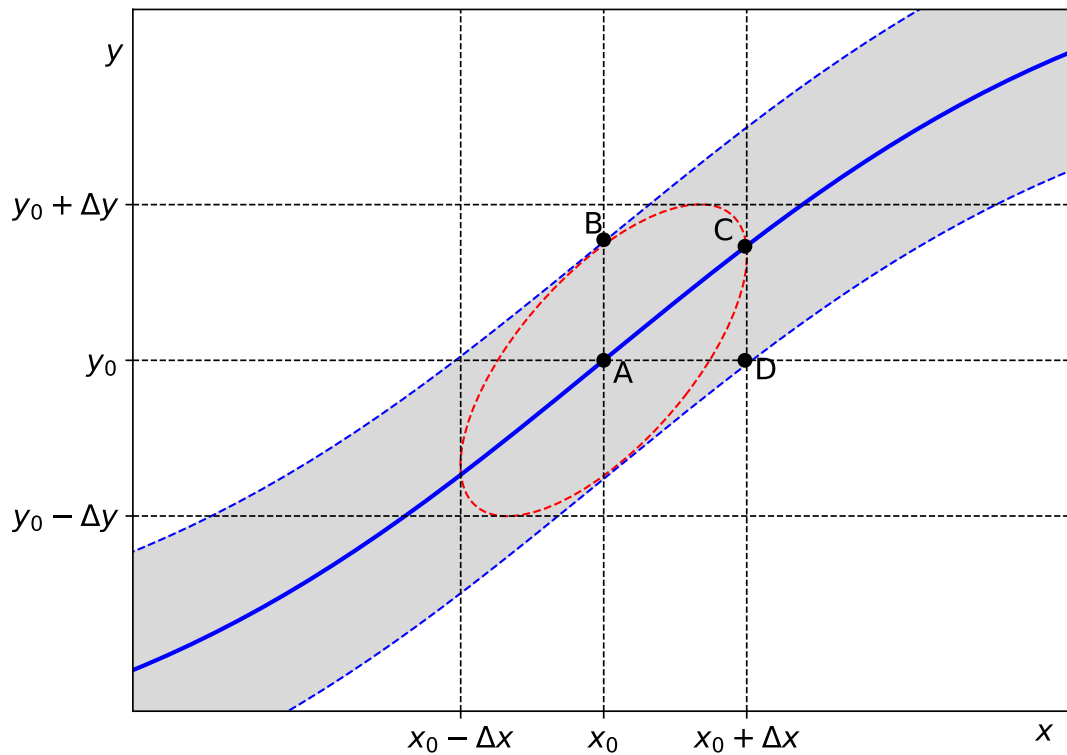


Рис. 1.12: Определение погрешности при графической интерполяции

кривые, максимально отстоящие от основной кривой в пределах погрешностей экспериментальных точек (коридор погрешностей). Затем проводятся прямые $x = x_0$ и $x = x_0 \pm \Delta x$, где x_0 — абсцисса, для которой требуется определить значение функции, а Δx — её погрешность. Погрешность значения функции, связанная с неточностью построения кривой, будет отвечать длине отрезка AB , а погрешность, возникающая за счет неточности задания координаты x_0 , — длине проекции отрезка AC на ось y , т. е. длине отрезка CD . Согласно правилу сложения погрешностей, суммарная погрешность будет равна квадратному корню суммы их квадратов:

$$\Delta y = \sqrt{(AB)^2 + (CD)^2}.$$

Если построить эллипс, вписанный в коридор погрешностей с ограничением прямыми $x = x_0 \pm \Delta x$, так, чтобы эллипс касался сторон такого “параллелограмма” в точках пересечения экспериментальной кривой с прямыми, заданными как $x = x_0 \pm \Delta x$, и пересечения прямой $x = x_0$ с границами коридора погрешностей (см. рис. 1.12), то вертикальная “протяженность” этого эллипса будет равна удвоенной погрешности $2\Delta y$.

Тот же принцип лежит в основе определения **погрешности аргумента, при котором функция принимает экстремальное значение**. Предположим, что необходимо определить координату x максимума наилучшей кривой, проведенной по экспериментальным точкам. Точность определения этой координаты по графику определяется погрешностью проведения кривой и погрешностью выбора точки на кривой.

На рис. 1.13 показана основная кривая и дополнительные кривые, определяющие коридор погрешностей. В пределах коридора функцию можно построить неоднозначно, и максимум функции (x_M, y_M) может соответствовать любой точке интервала, определяемого пересечением горизонтальной прямой, проведенной через нижнюю границу коридора погрешностей, с верхней границей коридора. Поэтому погрешность Δx координаты макси-

мума x_M можно считать равной половине этого интервала. Погрешность Δy координаты y_M при этом определяется как половина проекции коридора погрешностей на ось ординат (см. рис. 1.13).

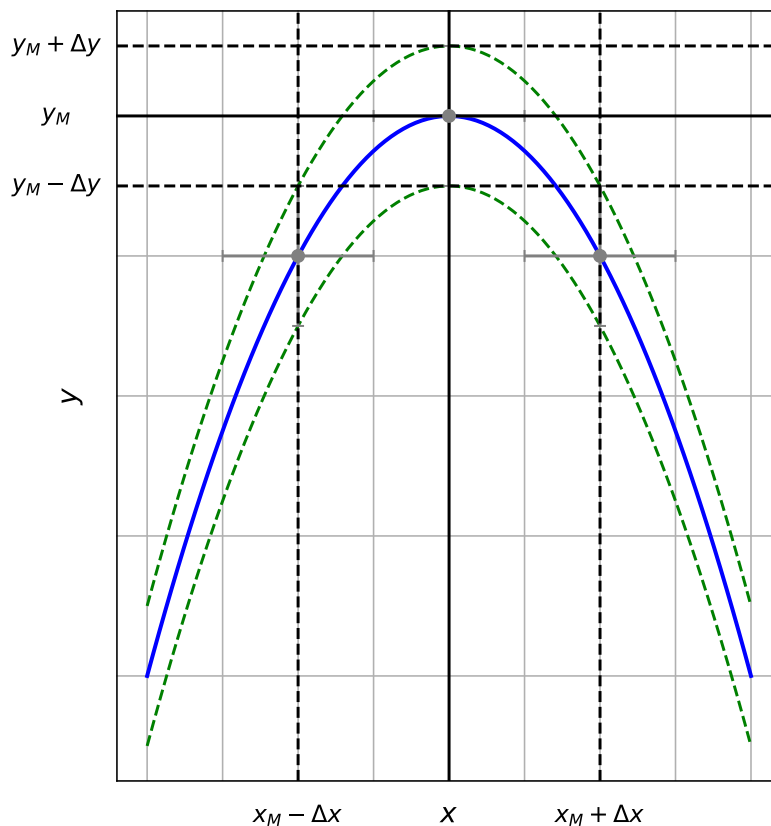


Рис. 1.13: Определение погрешности координат максимума функции

Пользуясь аналогичными принципами, можно построить алгоритм определения погрешностей графической интерполяции для других кривых и их характерных точек. Однако следует помнить, что графическая обработка результатов измерения является лишь грубой оценкой, и для получения более точных результатов необходимо использовать более сложные аналитические методы, например метод наименьших квадратов. Так, для аппроксимации функции в окрестности максимума с помощью метода наименьших квадратов используется параболическая зависимость $y(x) = ax^2 + bx + c$, т. е. определяются три параметра кривой, что приводит к существенному увеличению объема вычислений.

Графическая экстраполяция

Определение значений $y(x)$ за пределами экспериментально исследованной области, т. е. случай, когда приходится “продлевать” график функции в область значений x , где нет экспериментальных точек, называется графической экстраполяцией.

Экстраполяцию следует применять только в случае, если результаты эксперимента ясно указывают на то, что зависимость $y(x)$ — линейная, и, кроме того, если имеется теоретическое основание ожидать линейную зависимость. Тогда по экспериментальным точкам строят наилучшую прямую и затем продлевают ее в нужную область. Чаще всего таким образом определяются точки пересечения наилучшей прямой с осями или с другими прямыми (рис. 1.14). Основной вклад в погрешности Δx и Δy определяемых координат точек в этом

случае вносит погрешность углового коэффициента Δk . Чем дальше располагается искомая точка от экспериментально изученной области, тем бóльшая погрешность накапливается за счет неточности определения параметра k .

Погрешности точек пересечения с осями x^* и y^* можно определить по графику следующим образом. Помимо наилучшей прямой $y = kx + b$ через точку с координатами (x_c, y_c) , соответствующую “центру масс”

$$x_c = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N}; \quad y_c = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{N}, \quad (36)$$

проводятся две вспомогательные прямые¹³ с коэффициентами наклона $(k + \Delta k)$ и $(k - \Delta k)$. Их пересечения с осями отсекают двойную погрешность искомой координаты (рис. 1.14).

Отметим, что в данном случае координата y^* совпадает с параметром b наилучшей прямой, поэтому погрешность Δy может быть также определена аналитически как погрешность Δb : $\Delta y \simeq x_c \Delta k$.

В случае, если искомой является точка пересечения наилучшей прямой с какой-либо другой прямой, построенной в тех же осях (см. рис. 1.15), погрешности Δx и Δy можно приближенно считать равными половине длины проекций отрезка, отсекаемого вспомогательными прямыми от этой прямой, на осях абсцисс и ординат соответственно.

¹³Иногда для упрощения расчетов без заметной потери точности вспомогательные прямые проводят через края погрешностей первой и последней экспериментальных точек (см. рис. 1.14).

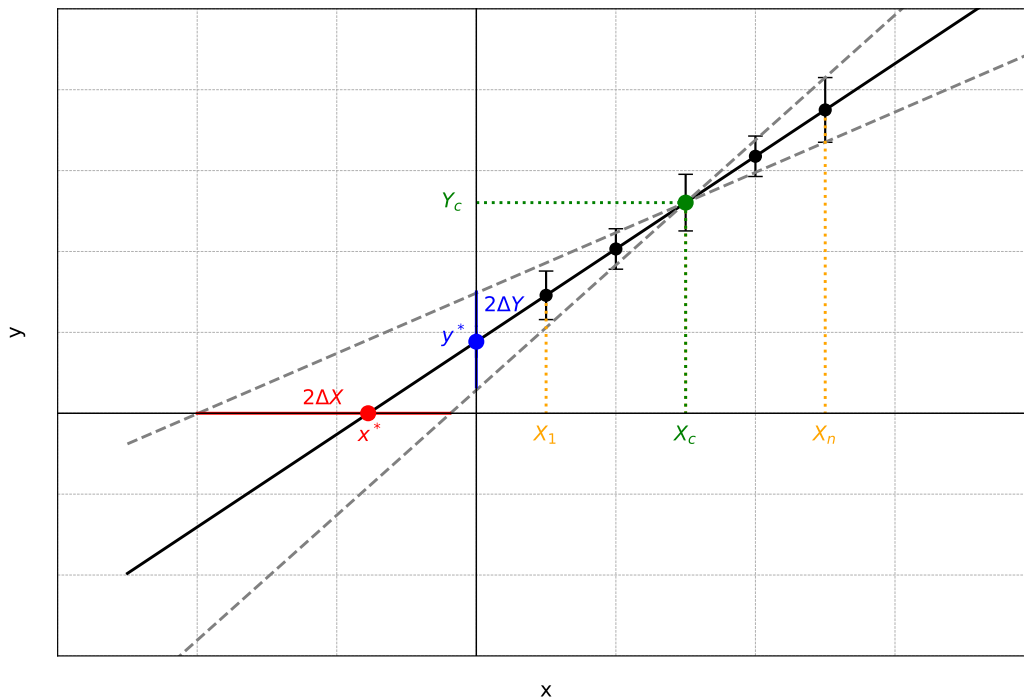


Рис. 1.14: Нахождение точек пересечения с осями вне экспериментально исследованной области методом экстраполяции наилучшей прямой: для определения погрешностей точек x^* и y^* кроме наилучшей прямой (сплошная линия) проводятся вспомогательные прямые (пунктир), показывающие погрешность углового коэффициента k

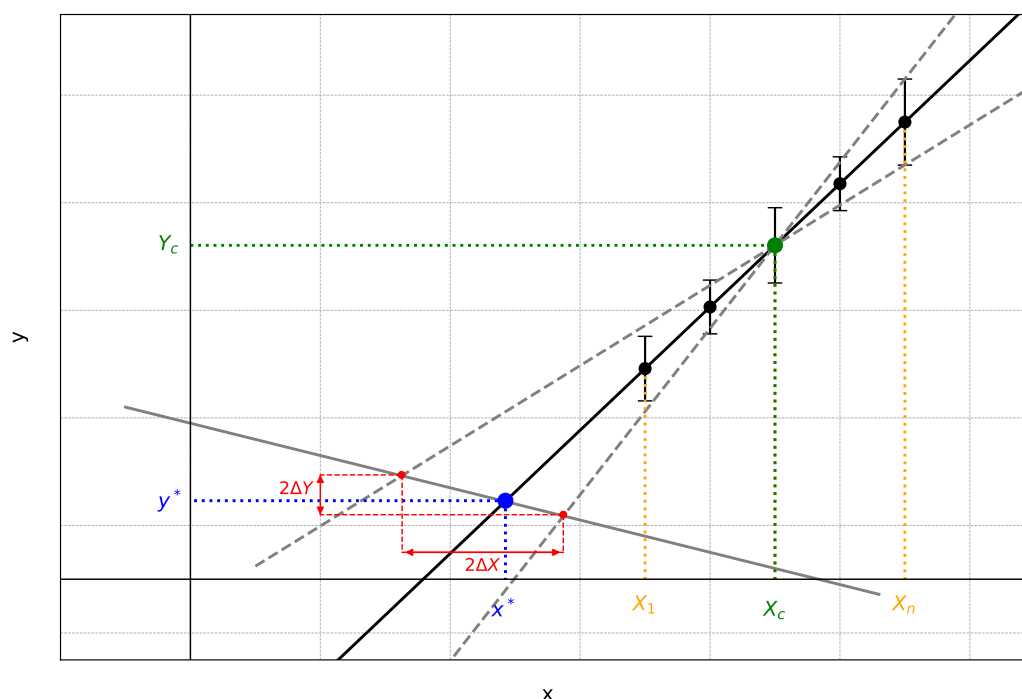


Рис. 1.15: Определение погрешностей координат (x^*, y^*) точки пересечения наилучшей прямой (черным) с некоторой другой прямой (серым). Вспомогательные прямые (пунктир), показывающие погрешность углового коэффициента k , отсекают отрезок на “серой” прямой

1.7 Обработка данных экспериментов с помощью электронных таблиц

Различные редакторы электронных таблиц являются хорошими помощниками современного исследователя, позволяя быстро выполнить обработку полученных данных, не прибегая к средствам программирования, определить нужные значения, построить графики и найти искомый результат. Конечно, они не подходят для обработки больших массивов данных, требуют много времени для выполнения стандартных операций форматирования, однако в рамках школьных исследований будут являться просто незаменимым инструментом в работе над проектами или кейсовыми задачами. В данном пособии работа с электронными таблицами будет рассмотрена на примере бесплатной программы LibreOffice Calc, входящей в комплект стандартных программ операционной системы московского образования М ОС 12.

1.7.1 Подготовка данных к обработке и расчет прямых измерений

Прежде чем приступить к анализу экспериментальных данных, важно подготовить их для дальнейшей обработки. Данные, полученные в ходе экспериментов, часто содержат ошибки ввода, выбросы или пропуски. Первый шаг — проверка данных на корректность: необходимо убедиться, что все значения имеют смысл в контексте эксперимента. Для корректного анализа полученных результатов важно правильно структурировать данные, а также не забывать обозначения — данные без заголовков быстро теряются и забываются, а при отсутствии указания размерностей физических величин есть риск возникновения ошибки в

расчетах. Структурирование таблиц упрощает дальнейший анализ. Каждая строка может соответствовать отдельному измерению, а столбцы — измеряемым параметрам, включая ошибки и вычисляемые значения. Используйте встроенные функции LibreOffice Calc для первичной обработки прямых измерений:

- СУММ — определяет сумму значений в выделенных ячейках;
- СРЗНАЧ — определяет среднее арифметическое значение выделенных ячеек;
- СТОТКЛ.В — определяет стандартное отклонение по выборке. Стоит отметить, что используемое в алгоритме расчета погрешности прямых измерений стандартное отклонение среднего отличается от вычисленного значения на $\text{КОРЕНЬ}(N)$, где N — число измерений, вычисляемое функцией СЧЕТ();
- СТЬЮДЕНТ.ОБР($1-\alpha$, N) — вычисляет значение коэффициента Стьюдента для указанного числа измерений и доверительной вероятности. Стоит отметить, что в формуле указывается не значение доверительной вероятности α , а значение $1-\alpha$. То есть при доверительной вероятности 0,7 в формуле необходимо указать значение 0,3.

С помощью указанных функций можно произвести быструю обработку результатов прямых измерений, найти средние значения, необходимые для расчёта, и погрешности. Важно, что при изменении данных расчёт автоматически меняется.



1.7.2 Анализ данных: расчеты и функции LibreOffice Calc для обработки косвенных измерений

Для анализа экспериментальных данных LibreOffice Calc предоставляет широкий набор математических и статистических функций. Например, с помощью функции МЕДИАНА можно определить центральное значение в данных, а с ЛИНЕЙН() — рассчитать коэффициенты линейной зависимости, которая наиболее часто используется в школьных экспериментах. Если в эксперименте требуется найти зависимость между переменными, можно использовать столбцы для вычисления производных значений, таких как скорости, ускорения или другие параметры в зависимости от эксперимента. В LibreOffice Calc имеются встроенные стандартные математические операции, тригонометрические и другие функции, позволяющие сделать расчет практически любой физической формулы. Воспользуясь QR-кодом, вы можете скачать пример файла, в котором проводится анализ эксперимента. Логические функции, такие как ЕСЛИ, помогают в анализе данных с условиями. Например, можно автоматически пометить значения, выходящие за пределы допустимого диапазона. Условное форматирование позволяет наглядно выделить такие данные в таблице, улучшая восприятие информации.

**Основы обработки данных
в электронных таблицах**

1.7.3 Работа с графиками и визуализацией данных

Визуализация данных — важный этап обработки, так как графики делают результаты эксперимента более понятными и наглядными. Для построения графиков используйте диаграммы LibreOffice Calc. Наиболее подходящие для физических измерений диаграммы — это XY(разброс), позволяющие построить прямую зависимость одной величины (столбца) от другой величины (столбца), отобразить аппроксимацию, а также погрешности. Для добавления диаграммы необходимо открыть вкладку «Вставка», выбрать элемент «Диаграмма» и далее отметить соответствующий тип диаграммы. Добавление данных на диаграмму осуществляется нажатием правой кнопки мыши, выбора элемента «Диапазоны данных» и далее «Ряды данных». В этом разделе можно также выбрать соответствующие подписи к данным, если вы ранее сделали обозначение столбцов.

Добавление тренда на график позволяет найти математическую зависимость между переменными. В LibreOffice Calc можно не только визуализировать тренд, но и автоматически получить его уравнение и коэффициент детерминации R^2 , который показывает качество аппроксимации.

Для отображения погрешностей можно использовать полосы ошибок. Это особенно важно для физических экспериментов, так как демонстрирует точность измерений. Например, полосы ошибок можно добавить вручную через настройки диаграммы или автоматизировать, рассчитав их заранее в таблице.

Таким образом, используя обработку данных в электронных таблицах, можно значительно ускорить процесс выполнения эксперимента и уменьшить риск ошибки, возникающий при использовании калькулятора. Стоит заметить, что синтаксис формул, используемый в указанных примерах для программы LibreOffice Calc, зачастую идентичен синтаксису, используемому в других программах такого же типа, что позволяет использовать приведенные материалы вне зависимости от используемого ПО.



**Наука о больших данных:
новое золото инков**

1.8 Обработка данных с помощью языка Python

Обработка экспериментальных данных — важный этап научного исследования, который позволяет выявить закономерности, провести анализ и сделать корректные выводы о полученных физических величинах. Python является мощным инструментом для этой задачи благодаря большому количеству библиотек, таких как numpy, pandas, matplotlib, scipy и другие.

В данном разделе мы рассмотрим:

1. Загрузку данных
2. Обработку данных и расчет погрешностей
3. Построение графиков
4. Линейную регрессию методом наименьших квадратов

Почему важно уметь применять Python в обработке данных? Как связаны большие данные и New York Times? Как "родились" большие данные? Как исследовательские наработки внедряются коммерческими гигантами? Послушай выпуск Инженерного подкаста с Михаилом Ровнягиным, менеджером по развитию бизнес-технологий, доцентом кафедры компьютерных систем и технологий ИИКС НИЯУ МИФИ, чтобы поговорить о том, как устроены большие данные в современном мире. Переходи по QR-коду и узнай много нового о большой науке!

1.8.1 Загрузка данных в Python

Работа с экспериментальными данными часто начинается с их загрузки. Данные могут храниться в различных форматах, таких как текстовые файлы, CSV, Excel, базы данных или веб-ресурсы. Python предоставляет множество инструментов для обработки данных, включая библиотеки `pandas`, `numpy` и стандартные модули, такие как `csv` и `json`.

В этом разделе мы рассмотрим:

- Загрузку данных из CSV.
- Загрузку данных из текстовых файлов.
- Чтение данных из Excel.
- Загрузку данных с веб-ресурсов.
- Загрузку данных из формата JSON.

Загрузка данных из CSV-файлов

CSV (Comma Separated Values) — это один из самых распространённых форматов для хранения таблиц. Для работы с ним обычно используется библиотека `pandas`.

Пример загрузки данных из CSV

```
1 import pandas as pd
2
3 # Загрузка данных из CSV
4 data = pd.read_csv('experiment_data.csv')
5
6 # Просмотр первых пяти строк
7 print(data.head())
```

Listing 1.1: Пример загрузки данных из CSV

Пояснение

- `pd.read_csv()` — функция для загрузки CSV-файлов.

- `data.head()` – метод для отображения первых пяти строк таблицы, чтобы проверить корректность загрузки данных.

Дополнительные параметры `read_csv()` поддерживает множество параметров, например:

- `sep=','` – позволяет указать разделитель (например, табуляция или точка с запятой).
- `header=None` – если у таблицы нет заголовка.
- `usecols=['col1', 'col2']` – позволяет загрузить только определённые столбцы.
- `dtype={'col1': float}` – задаёт типы данных для колонок.

Загрузка данных из текстового файла

Текстовые файлы часто имеют произвольный формат. Их можно загружать с помощью стандартных инструментов Python или с использованием `numpy`.

Пример с использованием `numpy`

```
1 import numpy as np
2
3 # Загрузка данных из текстового файла
4 data = np.loadtxt('experiment_data.txt', delimiter=',')
5
6 print(data)
```

Listing 1.2: Загрузка данных из текстового файла

Пояснение

- `np.loadtxt()` – функция для загрузки числовых данных из текстового файла.
- `delimiter=','` – разделитель между значениями.

Ограничения Если файл содержит смешанные типы данных (например, текст и числа), используйте `pandas` или стандартный модуль `csv`.

Чтение данных из Excel

Excel – популярный формат для хранения таблиц. Библиотека `pandas` позволяет читать данные из Excel-файлов.

Пример загрузки данных

```
1 # Загрузка данных из Excel
2 data = pd.read_excel('experiment_data.xlsx', sheet_name='Sheet1')
3
4 # Просмотр первых строк
5 print(data.head())
```

Listing 1.3: Загрузка данных из Excel

Пояснение

- `sheet_name` — позволяет указать имя листа для загрузки данных.
- Для работы с Excel требуется установка дополнительной библиотеки, например, `openpyxl` или `xlrd`.

Загрузка данных с веб-ресурсов

Данные могут быть получены из сети, например, с помощью URL-адреса.

Пример загрузки CSV с URL

```
1 # Загрузка данных из URL
2 url = 'https://example.com/data.csv'
3 data = pd.read_csv(url)
4
5 print(data.head())
```

Listing 1.4: Загрузка данных из URL

Пояснение

- Можно загружать данные напрямую по URL, используя функцию `pd.read_csv()`

Дополнительные библиотеки

Для работы с данными из сложных веб-страниц можно использовать `requests` или `beautifulsoup4`.

Загрузка данных из JSON

JSON (JavaScript Object Notation) — формат, широко используемый для передачи данных.

Пример загрузки JSON с использованием pandas

```

1 # Загрузка данных из JSON
2 data = pd.read_json('experiment_data.json')
3
4 print(data.head())

```

Listing 1.5: Загрузка данных из JSON

Пояснение

- JSON данные удобно читать, если они имеют структуру таблицы.
- Для сложных иерархий можно использовать модуль `json`.

Пример с использованием модуля json

```

1 import json
2
3 # Чтение JSON
4 with open('experiment_data.json', 'r') as file:
5     data = json.load(file)
6
7 print(data)

```

Listing 1.6: Чтение JSON с использованием модуля json

1.8.2 Обработка данных прямых измерений

Получив данные в удобном формате (загрузкой из файла или в ручном режиме) мы имеем возможность воспользоваться встроенными функциями языка Python для выполнения базовых задач обработки данных: расчёт среднего значения по выборке, погрешностей, дисперсии. Этот этап обработки можно выполнить и вручную, однако имея функционал загрузки данных непосредственно с прибора в автоматическом режиме, удобней встроить пару строк кода в программу для обработки, чтобы получить быстрый результат. Рассмотрим пример кода для обработки данных прямых измерений с помощью языка Python.

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Пример данных, полученных с физического прибора
5 measurements = [10.2, 10.4, 10.3, 10.5, 10.1, 10.3, 10.4, 10.2]
6
7 # Вычисление статистических параметров
8 mean_value = np.mean(measurements) # Среднее значение
9 variance = np.var(measurements, ddof=1) # Дисперсия
10 std_dev = np.std(measurements, ddof=1) # Стандартное отклонение
11

```

```

12 # Погрешность среднего значения
13 error_of_mean = std_dev / np.sqrt(len(measurements))
14
15 # Вывод результатов
16 print(f"Среднее значение: {mean_value:.2f}")
17 print(f"Дисперсия: {variance:.2f}")
18 print(f"Стандартное отклонение: {std_dev:.2f}")
19 print(f"Погрешность среднего: {error_of_mean:.2f}")

```

Listing 1.7: Обработка данных прямых измерений

Пояснение

- `np.mean()` – вычисляет среднее значение выборки.
- `np.var()` – оценивает дисперсию выборки.
- `np.std()` – оценивает стандартное отклонение выборки.
- `std_dev / np.sqrt(len(measurements))` – формула для расчёта погрешности среднего.

Результаты

В результате обработки данных мы получаем:

- Среднее значение измерений – оценка центральной тенденции данных.
- Дисперсия и стандартное отклонение – характеристики разброса данных.
- Погрешность среднего значения – оценка точности измерений.

1.8.3 Обработка данных косвенных измерений

Описание

Косвенные измерения фактически являются расчетом искомых значений по заданным формулам. Воспользуемся простым примером расчета площади на основании длины и ширины объекта.

```

1 import numpy as np
2
3 # Прямые измерения
4 lengths = [5.1, 5.0, 5.2, 5.1] # Длина, м
5 widths = [2.0, 2.1, 2.0, 2.1] # Ширина, м
6
7 # Вычисление средних значений
8 mean_length = np.mean(lengths)
9 mean_width = np.mean(widths)

```

```
10
11 # Расчёт площади
12 area = mean_length * mean_width
13
14 # Стандартные отклонения
15 std_length = np.std(lengths, ddof=1)
16 std_width = np.std(widths, ddof=1)
17
18 # Погрешность результата (формула ошибок косвенных измерений)
19 error_area = area * np.sqrt((std_length / mean_length)**2 + (std_width /
    mean_width)**2)
20
21 # Вывод результатов
22 print(f"Средняя длина: {mean_length:.2f} м")
23 print(f"Средняя ширина: {mean_width:.2f} м")
24 print(f"Площадь: {area:.2f} м2")
25 print(f"Погрешность площади: ±{error_area:.2f} м2")
```

Listing 1.8: Обработка данных косвенных измерений

Пояснение

- `mean_length * mean_width` – расчёт площади прямоугольника.
- `np.sqrt((std_length / mean_length)**2 + (std_width / mean_width)**2)` – формула для погрешности результата, учитывающая погрешности измерений длины и ширины.

Результаты

В результате обработки данных косвенных измерений мы получаем:

- Средние значения прямых измерений.
- Результат расчёта искомой величины.
- Погрешность результата.

1.8.4 Библиотека Matplotlib

`matplotlib` – это одна из самых популярных библиотек для визуализации данных в языке программирования Python. Она предназначена для создания статических, интерактивных и анимационных графиков. С её помощью можно создавать графики любой сложности, начиная от простых линейных диаграмм и заканчивая сложными трёхмерными визуализациями.

Основные возможности Matplotlib

Библиотека предоставляет широкий функционал для построения графиков и работы с данными:

- Построение линейных, столбчатых, точечных графиков.
- Создание гистограмм, диаграмм рассеяния и круговых диаграмм.
- Работа с многомерными данными и построение трёхмерных графиков.
- Тонкая настройка осей, заголовков, легенд и других элементов графика.
- Настройка стилей графиков с помощью встроенных тем или пользовательских параметров.
- Создание анимаций для визуализации изменений данных во времени.
- Экспорт графиков в высококачественные форматы, такие как PNG, PDF, SVG и EPS.

Компоненты Matplotlib

Matplotlib состоит из нескольких ключевых компонентов, которые делают её гибкой и мощной:

- `pyplot` — модуль, предоставляющий функции, аналогичные командам MATLAB, для быстрого построения графиков.
- `Axes` и `Figure` — основные элементы объекта графика: `Figure` отвечает за всё полотно графика, а `Axes` — за отдельную область графика.
- `Artist` — всё, что отображается на графике (линии, текст, точки), представляет собой объект класса `Artist`.
- `mplot3d` — модуль для создания трёхмерных графиков.

Пример использования Matplotlib

Пример простого линейного графика:

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2
3 # Данные для построения графика
4 x = [1, 2, 3, 4, 5]
5 y = [2, 3, 5, 7, 11]
6
7 # Построение графика
8 plt.plot(x, y, label='Простая линия')
9 plt.title('Пример линейного графика')
10 plt.xlabel('Ось X')
11 plt.ylabel('Ось Y')
```



```
12 plt.legend()  
13 plt.grid(True)  
14 plt.show()
```

Listing 1.9: Построение линейного графика с использованием Matplotlib

Разберём подробно синтаксис библиотеки `matplotlib`, а также примеры построения различных графиков, встречающихся в физических экспериментах из данного пособия.

Основной синтаксис

```
1 import matplotlib.pyplot as plt  
2  
3 # Создание графика  
4 x = [1, 2, 3, 4, 5]  
5 y = [10, 20, 25, 30, 35]  
6  
7 plt.plot(x, y, label='Линия 1', color='blue', linewidth=2)  
8 plt.xlabel('Ось X')  
9 plt.ylabel('Ось Y')  
10 plt.title('Пример графика')  
11 plt.legend()  
12 plt.grid()  
13 plt.show()
```

Построение нескольких графиков

```
1 import numpy as np  
2  
3 x = np.linspace(0, 10, 100)  
4 y1 = np.sin(x)  
5 y2 = np.cos(x)  
6  
7 plt.plot(x, y1, label='sin(x)', color='green')  
8 plt.plot(x, y2, label='cos(x)', color='red')  
9 plt.xlabel('Ось X')  
10 plt.ylabel('Ось Y')  
11 plt.title('Синус и косинус')  
12 plt.legend()  
13 plt.show()
```

Настройка стилей

```
1 plt.style.use('ggplot') # Установка стиля графика  
2  
3 x = [1, 2, 3, 4, 5]
```

```

4 y = [10, 20, 30, 40, 50]
5
6 plt.bar(x, y, color='purple')
7 plt.title('Гистограмма')
8 plt.xlabel('Категории')
9 plt.ylabel('Значения')
10 plt.show()

```

3D графики

```

1 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
2 import numpy as np
3
4 fig = plt.figure()
5 ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
6
7 x = np.random.rand(50)
8 y = np.random.rand(50)
9 z = np.random.rand(50)
10
11 ax.scatter(x, y, z, c='r', marker='o')
12 ax.set_xlabel('X Label')
13 ax.set_ylabel('Y Label')
14 ax.set_zlabel('Z Label')
15
16 plt.show()

```

Одна из основных задач обработки графиков, как было показано в разделе 1.6 данного пособия, это аппроксимация экспериментальных данных. В Python для этого активно применяется метод наименьших квадратов (МНК). В этом разделе мы рассмотрим:

1. Линейную аппроксимацию.
2. Полиномиальную аппроксимацию.
3. Экспоненциальную аппроксимацию.
4. Логарифмическую аппроксимацию.
5. Сравнение моделей.

Линейная аппроксимация

Линейная аппроксимация используется, когда предполагается линейная зависимость между переменными:

$$y = kx + b \quad (37)$$

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # Данные
5 x = np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5])
6 y = np.array([0.5, 2.0, 2.5, 3.8, 5.1, 6.0])
7
8 # Аппроксимация методом наименьших квадратов
9 coeffs = np.polyfit(x, y, 1) # Полином 1-й степени
10 k, b = coeffs
11
12 # Построение графика
13 x_fit = np.linspace(min(x), max(x), 100)
14 y_fit = k * x_fit + b
15
16 plt.scatter(x, y, label='Данные', color='blue')
17 plt.plot(x_fit, y_fit, label=f'Линейная модель: y = {k:.2f}x + {b:.2f}',
18         color='red')
19 plt.xlabel('x')
20 plt.ylabel('y')
21 plt.title('Линейная аппроксимация')
22 plt.legend()
23 plt.grid()
24 plt.show()

```

Полиномиальная аппроксимация

Полиномиальная аппроксимация применяется, если зависимость между переменными более сложная:

$$y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \quad (38)$$

```

1 # Данные
2 x = np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5])
3 y = np.array([0.5, 0.7, 1.66, 2.7, 4.9, 6.0])
4
5 # Аппроксимация полиномом 2-й степени
6 coeffs_poly = np.polyfit(x, y, 2) # Полином 2-й степени
7 poly_model = np.poly1d(coeffs_poly)
8
9 # Построение графика
10 y_poly_fit = poly_model(x_fit)
11
12 plt.scatter(x, y, label='Данные', color='blue')
13 plt.plot(x_fit, y_poly_fit, label=f'Полиномиальная модель: {poly_model}',
14         color='green')
15 plt.xlabel('x')

```

```

15 plt.ylabel('y')
16 plt.title('Полиномиальная аппроксимация й(2- степени)')
17 plt.legend()
18 plt.grid()
19 plt.show()

```

Экспоненциальная аппроксимация

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

$$y = ae^{bx} \quad (39)$$

Для нахождения коэффициентов часто используют логарифмирование:

$$\ln(y) = \ln(a) + bx \quad (40)$$

```

1  from scipy.optimize import curve_fit
2
3  # Определение экспоненциальной функции
4  def exponential(x, a, b):
5      return a * np.exp(b * x)
6
7  # Аппроксимация
8  params, _ = curve_fit(exponential, x, y)
9  a, b = params
10
11 # Построение графика
12 y_exp_fit = exponential(x_fit, a, b)
13
14 plt.scatter(x, y, label='Данные', color='blue')
15 plt.plot(x_fit, y_exp_fit, label=f'Экспоненциальная модель: y = {a:.2f}e^{b:.2f}x', color='orange')
16 plt.xlabel('x')
17 plt.ylabel('y')
18 plt.title('Экспоненциальная аппроксимация')
19 plt.legend()
20 plt.grid()
21 plt.show()

```

Логарифмическая аппроксимация

Логарифмическая зависимость имеет вид:

$$y = a \ln(x) + b \quad (41)$$

```

1  # Определение логарифмической функции
2  def logarithmic(x, a, b):
3      return a * np.log(x) + b
4
5  # Убираем нулевые значения x (для логарифма)
6  x_nonzero = x[1:]
7  y_nonzero = y[1:]
8
9  # Аппроксимация
10 params_log, _ = curve_fit(logarithmic, x_nonzero, y_nonzero)
11 a_log, b_log = params_log
12
13 # Построение графика
14 y_log_fit = logarithmic(x_fit[1:], a_log, b_log)
15
16 plt.scatter(x_nonzero, y_nonzero, label='Данные', color='blue')
17 plt.plot(x_fit[1:], y_log_fit, label=f'Логарифмическая модель:  $y = \{a\_log\} \cdot \ln(x) + \{b\_log\}$ ', color='purple')
18 plt.xlabel('x')
19 plt.ylabel('y')
20 plt.title('Логарифмическая аппроксимация')
21 plt.legend()
22 plt.grid()
23 plt.show()

```

1.9 Выводы

В этой главе мы рассмотрели необходимый теоретический минимум, который позволит обработать данные физических экспериментов, выполняемых с помощью данного пособия различными способами, в зависимости от имеющихся возможностей. С учетом стремительного проникновения информационных технологий в научно-техническую деятельность, мы бы рекомендовали знакомиться не только с традиционными способами расчета "на листочке" но и активно использовать компьютер в своей работе. Это позволит вам приобрести необходимый набор компетенций для успешного обучения в университете и последующей работе в научно-технической сфере.

А узнать о том, чем важны точные измерения в современной науке, можно в выпуске инженерного подкаста: "Атомные часы: как успеть все до нового года". Как нас обманывает время? Как связаны электронные переходы и мировые стандарты времени? Зачем все лаборатории мира «скидываются» временем? И как, в конце концов, все успеть? Вы встретитесь со специалистами в области квантовой метрологии Чере-



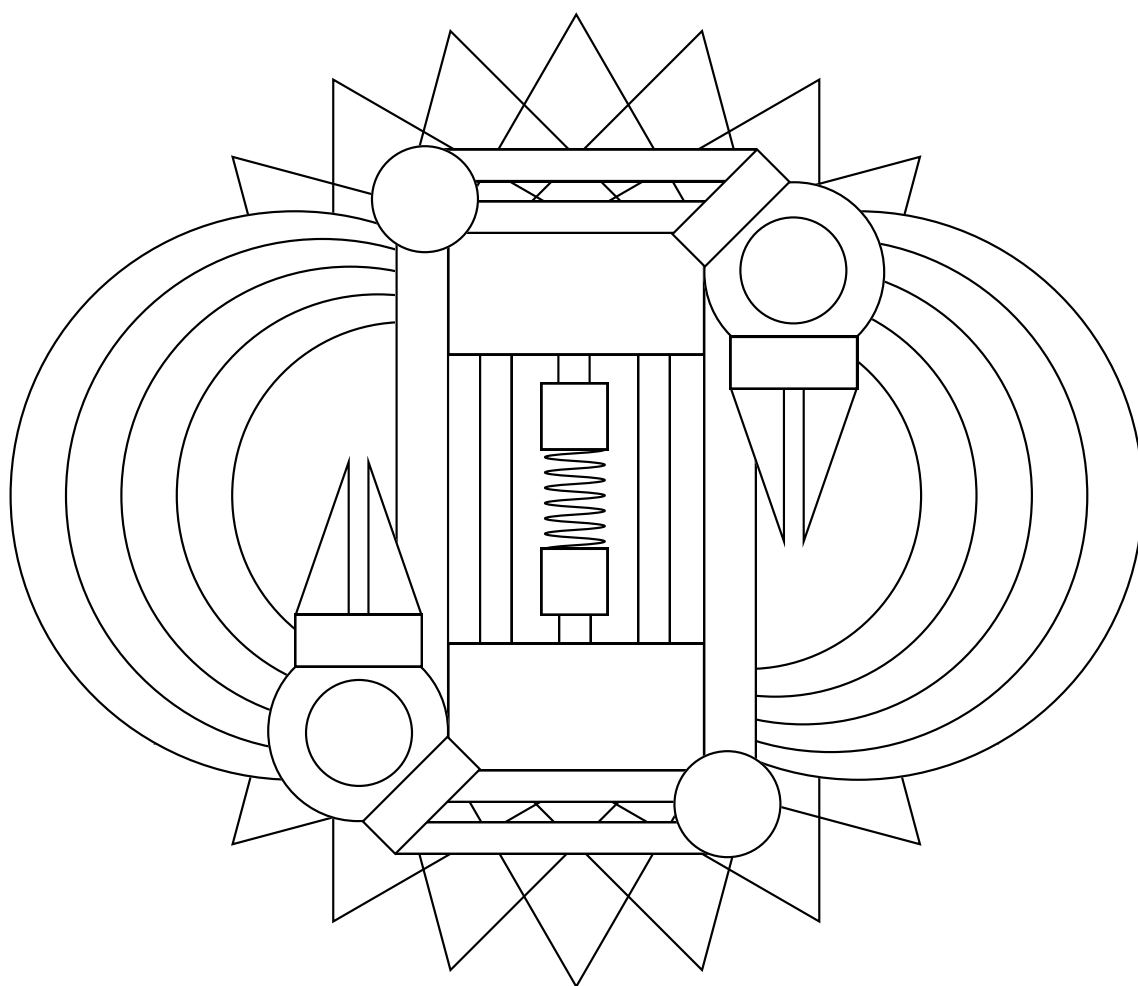
**Атомные часы: как успеть
все до нового года**

пановым Павлом и Тричевым Константином, чтобы выяснить, как измерять время с атомной точностью и почему без атомных часов GPS и ГЛОНАСС никогда бы не было. Переходи по QR коду и познакомься с новыми открытиями в метрологии!

Список литературы к главе

1. Н.С. Воронова, С.Г. Бежанов, С.А. Воронов, Е.В. Хангулян, О.Ю. Цупко, А.И. Романов, Анализ и представление результатов эксперимента: Учебно-методическое пособие. — М.: НИЯУ МИФИ, 2023.

2 МЕХАНИКА ДЛЯ БУДУЩЕГО ИНЖЕНЕРА



2.1 Введение

Механика, а именно ее составляющие — кинематика и динамика, это разделы физики, изучаемые школьниками в самом начале их пути в большую науку, ведь именно с этих разделов начинается практически любой учебник 6-7 класса. Механика — это раздел физики, изучающий движение тел и взаимодействие между ними. Три основных закона механики, которые были открыты Исааком Ньютоном в XVII веке, описывают движение любых объектов — от простых камней до сложных робототехнических устройств. И пусть в привычном ключе для школьника — рассматривать законы движения на примере объекта А и объекта Б, движущихся в идеальной системе, или на Зайце, которого догоняет Волк, в действительности те же самые законы и принципы используют инженеры для проектирования сложных систем и устройств. Рассмотрим, как основные законы механики применяются в современных робототехнических системах.

Первый закон Ньютона объясняет, почему робот продолжает двигаться, даже если двигатели отключены, и почему он не начнет движение, если на него не подействует сила. Например, чтобы робот начал движение, его двигатели должны создать силу, которая преодолит инерцию, то есть его стремление оставаться в покое. Когда робот движется по прямой, его инерция помогает ему сохранять траекторию. Однако при повороте робот должен преодолеть свою инерцию, чтобы изменить направление, это особенно важно при проектировании мобильных роботов, которые перемещаются по сложным поверхностям. Если робот перемещается на колесах, его инерция влияет на то, как быстро он может изменить скорость или направление. Это свойство учитывают разработчики, чтобы сделать роботов более маневренными и разрабатывают более сложные системы управления движением роботов, например, устанавливают независимые моторы на левую и правую оси робота (пример: робот-клешня из серии VEX) или Меканум-колеса (пример реализации перемещений в любых направлениях с помощью подобных колес приведен на рисунке 2.1). Пользуясь Вторым законом Ньютона,

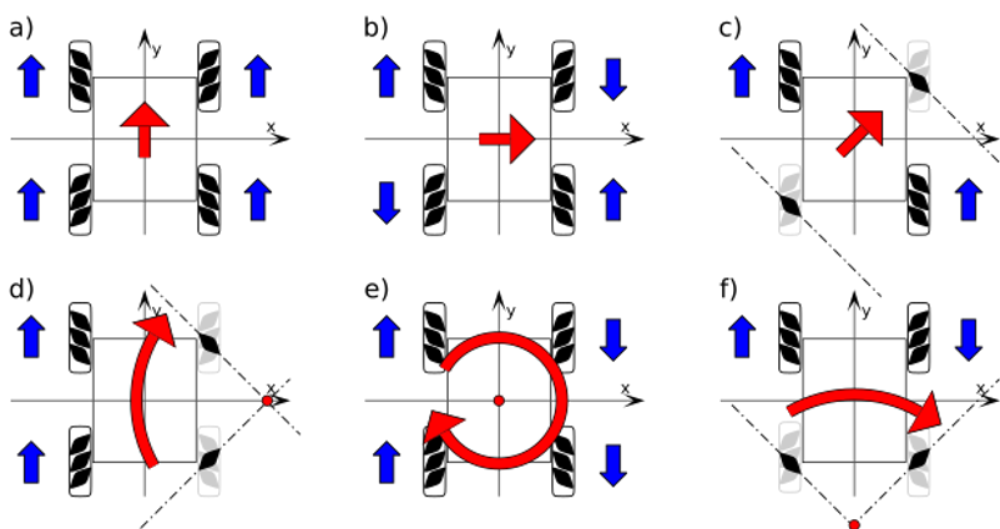


Рис. 2.1: Реализация перемещений с помощью Меканум-колес

можно рассчитать не только силу или ускорение, которое может развить система, но и описать в целом движение робота в любых условиях. Например, при проектировании промышленных манипуляторов необходимо проводить расчет характеристик движения, учитывая ускорение

конечной точки (захвата) для увеличения эффективности работы робота. Кроме того, в случае работы устройства в сложных условиях (магнитное поле, температура, давление, сильный ветер и т.п.) в рассматриваемый закон можно добавить соответствующие силы и вычислить поправки для моторов, осуществляющих перемещение объекта.

В тех же манипуляторах с плоско-параллельной кинематикой (рисунок 2.2), законы движения применяются для расчета координат точки и углов поворота соответствующих сервоприводов или шаговых моторов для обеспечения требуемой скорости перемещения объекта в пространстве, а также для расчета оптимальной траектории движения захвата.



Рис. 2.2: Простой манипулятор с плоско-параллельной кинематикой (перемещение стрелы и поворот)

Для приведенного на рисунке 2.2 манипулятора расчет кинематики движения основывается на работе трех сервоприводов - поворотного вокруг своей оси и двух приводов, отвечающих за перемещение стрелы. Пример кода на Python для расчета и визуализации траектории перемещения манипулятора с тремя сочленениями приведен в листинге:

```

1  import numpy as np; import matplotlib.pyplot as plt
2  # Параметры длины звеньев манипулятора
3  l1, l2, l3 = 5, 5, 5 # длины рычагов
4  # Расчет координат x, y рабочего органа по углам сочленений
5  def forward_kinematics(theta1, theta2, theta3, l1, l2, l3):
6      x = l1 * np.cos(theta1) + l2 * np.cos(theta2) + l3 * np.cos(theta3)
7      y = l1 * np.sin(theta1) + l2 * np.sin(theta2) + l3 * np.sin(theta3)
8      return x, y
9  # Параметры начальной и конечной точки
10 x_start, y_start = 2, 2 # Точка А (начальная)
11 x_end, y_end = 8, 8     # Точка Б (конечная)
12 # Время и количество шагов для траектории
13 T = 10 # Общее время движения

```

```

14 n_steps = 100 # Количество шагов
15 # Создаем массив времени
16 t_values = np.linspace(0, T, n_steps)
17 # Определение нелинейной траектории
18 # Сначала мы интерполируем по оси X и Y, но с добавлением синусоиды к Y
19 x_traj = np.linspace(x_start, x_end, n_steps)
20 amplitude = 2 # Амплитуда синусоиды
21 y_traj = np.linspace(y_start, y_end, n_steps) + amplitude * np.sin(np.
    linspace(0, 2 * np.pi, n_steps))
22 # Визуализация траектории
23 plt.figure(figsize=(8, 6))
24 plt.plot(x_traj, y_traj, label="Нелинейная траектория синусоида()")
25 plt.scatter([x_start, x_end], [y_start, y_end], color="red", label="
    Точки A и B")
26 plt.title("Траектория перемещения манипулятора")
27 plt.xlabel("X")
28 plt.ylabel("Y")
29 plt.legend()
30 plt.grid(True)
31 plt.show()
32 # Функция для расчёта углов обратной кинематики
33 # Простая обратная кинематика для демонстрации
34 def inverse_kinematics(x, y, l1, l2, l3):
35 # Пример простой задачи обратной кинематики: расчёт углов для простоты
36     theta1 = np.arctan2(y, x) # Пример простого угла для демонстрации
37     # Реальные углы могут зависеть от конкретной конфигурации манипулятора
38     return theta1, theta1, theta1 # Возвращаем одинаковые углы
39
40 # Использование обратной кинематики для вычисления углов на каждом шаге
41 angles_trajectory = [] for x, y in zip(x_traj, y_traj):
42     theta1, theta2, theta3 = inverse_kinematics(x, y, l1, l2, l3)
43     angles_trajectory.append([theta1, theta2, theta3])

```

Listing 2.1: Расчет и визуализация траектории перемещения манипулятора с тремя сочленениями

Однако применение законов механики в инженерии не ограничивается расчетом скоростей и координат объектов, поскольку в реальных системах нужно учитывать множество факторов, влияющих на её работу. Зададимся вопросом, а сможет ли манипулятор, траекторию которого мы так усердно высчитывали, переместить по ней груз массой 100 кг, если все основные узлы его выполнены из пластиковых деталей методом 3Д печати? Не вникая в суть вопроса, напрашивается очевидный ответ: конечно, не сможет, поскольку пластик хрупкий и такую массу не выдержит. Более внимательный школьник заметит, что основная проблема в моменте силы, из-за которого пластик просто сломается под такой нагрузкой. А вот грамотный инженер скажет, что всё возможно, если правильно спроектировать ключевые узлы, проведя расчет соответствующих нагрузок на каждую из деталей системы. Подобными расчетами занимаются специалисты по физике прочности, а любому студенту инженерного

университета знаком такой предмет, как «сопротивление материалов», на котором подобных специалистов начинают обучать тонкой науке нагрузок и деформаций. Конечно, никто не будет изготавливать промышленный манипулятор из пластика без особой для этого причины, но тем не менее подобные конструкции вполне возможны при грамотном учете нагрузок. В первом блоке пособия у вас будет возможность познакомиться с влиянием дополнительных внешних сил на привычные системы на примере колебаний математического маятника, изучить различные виды деформаций с помощью разрывной машины, а также выполнить ряд проектно-исследовательских заданий по механике, связанные с особенностями 3Д-печати.

2.2 Лабораторная работа №1 Измерения линейных размеров тел

Цель работы: Сравнить значения диаметра мерного цилиндра, полученные прямыми измерениями штангенциркулем, с косвенными измерениями по длине его окружности.

Введение

Любое измерение физической величины — это определение, во сколько раз значение, полученное с помощью прибора для измерения этой физической величины, больше или меньше эталонной единицы этой физической величины. Посмотрите два примера ниже.

Измерение длины — это нахождение, во сколько раз измеряемый объект длиннее или короче эталона одного метра, который выполнен из специального сплава, имеет специальную форму и хранится в Международной палате мер и весов во Франции (рис. 2.3 слева).

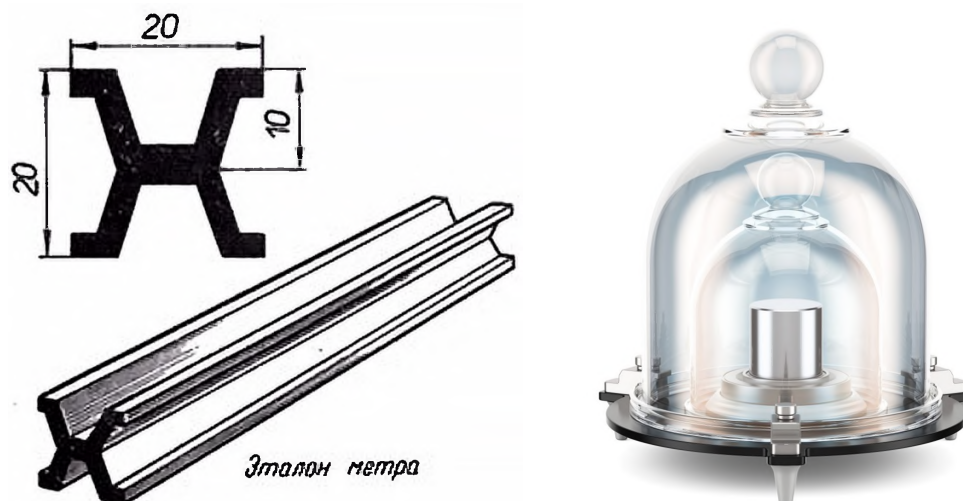


Рис. 2.3: Международные эталоны меры длины в 1 м (слева) и массы в 1 кг (справа)

Измерение массы — это определение, во сколько раз масса измеряемого объекта больше или меньше массы эталона одного килограмма — специального цилиндра, хранящегося под колпаками (чтобы защитить его от пыли, ведь каждая пылинка — это лишняя «добавка», которая чуть-чуть меняет значение массы эталона килограмма).

Современных ученых уже не устраивает точность старых эталонов, поэтому они придумали более точные и совершенные эталоны этих и других единиц физических величин, основанные на более тонких, совершенных и универсальных физических явлениях. Однако суть процесса измерения не изменилась. Измерение — это сравнение с эталоном.

Поскольку любое измерение — это процесс субъективный, ни одно измерение не может дать абсолютно точное значение измеряемой величины. Ошибку, которую может вносить в измерение сам измерительный прибор, называют **приборной**. Чаще всего для оценки ошибки прибора достаточно взять половину цены деления шкалы, но если деление очень мелкое, то в качестве оценки приборной погрешности следует выбрать одно деление шкалы.

Вот два примера: школьная линейка и штангенциркуль. Деление шкалы линейки 1 мм. Оно достаточно крупное, чтобы различить положение отсчета между делениями. Для линейки можно выбрать 0,5 мм в качестве приборной погрешности, но вообще такая точность великовата для школьной линейки, и уже для линейки с миллиметровыми делениями приборная погрешность в 1 мм будет вполне оправданной. Другой прибор для измерения линейных размеров – штангенциркуль. Он настолько точный, что с его помощью можно измерять размеры объектов от 0,1 мм, а в некоторых моделях от 0,05 мм. Для определения таких малых величин только миллиметровой шкалы недостаточно, поэтому на штангенциркуле есть дополнительная шкала, которая называется нониус. При такой точности ни о какой половине цены деления шкалы для оценки приборной погрешности говорить не приходится. Для таких мелких делений шкалы одно деление – правильная оценка приборной погрешности.

Измерения штангенциркулем проводят следующим образом (см. рисунок 2.4). Сперва нужно развести губки прибора на такое расстояние, чтобы оно было больше измеряемого объекта (например, чтобы мерный цилиндр, диаметр которого хотим определить, свободно проходил между губками). Затем очень осторожно нужно свести губки, чтобы объект измерения оказался зажат между ними. Штангенциркулем можно измерять и внутренние размеры, например, диаметры отверстий. Последовательность действий аналогична, только губки сперва нужно разместить внутри отверстия, а потом аккуратно развести до плотного соприкосновения со стенками отверстия.

Когда проведено измерение размера, по основной шкале следует определить значение размера в сантиметрах и миллиметрах, а доли миллиметра покажет нониус. Делается это так. Значение сантиметров и миллиметров будет соответствовать ближайшему слева от нулевой риски нониуса делению основной шкалы (на рисунке ниже это значение по основной шкале 2 см и 4 мм). К этому значению следует дописать показания долей миллиметра по нониусу. Цена деления нониуса указывается на его шкале или определяется по подписям делений шкалы. Обратите внимание, что цена деления нониуса на рисунке выражена обыкновенной дробью ($1/20$). За показание нониуса берут деление нониуса, которое наиболее точно совпадает с любым из делений основной шкалы (на примере с рисунка это деление 7 шкалы нониуса. Оно наиболее точно совпадает со вторым делением после 5 см основной шкалы). Подписанное деление 7 шкалы нониуса, это 0,7 мм (потому что каждое маленькое деление – это $1/20=0,05$ мм). Таким образом, показания штангенциркуля на картинке равны 24,7 мм или 2 см и 4,7 мм.

Следует запомнить еще несколько определений, которые могут встретиться в лабораторных работах. Максимальное значение, указанное на шкале прибора, называется **пределом измерения прибора**.

Что подразумевают, когда говорят о точности результата. На точность результата влияют различные факторы. Про один из них уже говорилось выше. Но помимо ошибки, которую в результат вносит прибор, дополнительную ошибку могут вносить метод измерения, метод обработки результата измерения, аккуратность экспериментатора или различные случайные воздействия. В итоге получается результат, который несколько отличается от того результата, который должен был бы получиться в идеальном случае. Идеальный результат называют **истинным значением**. Для учета влияния случайных факторов измерения проводят несколько раз, а потом полученные значения обрабатывают специальными математическими методами.

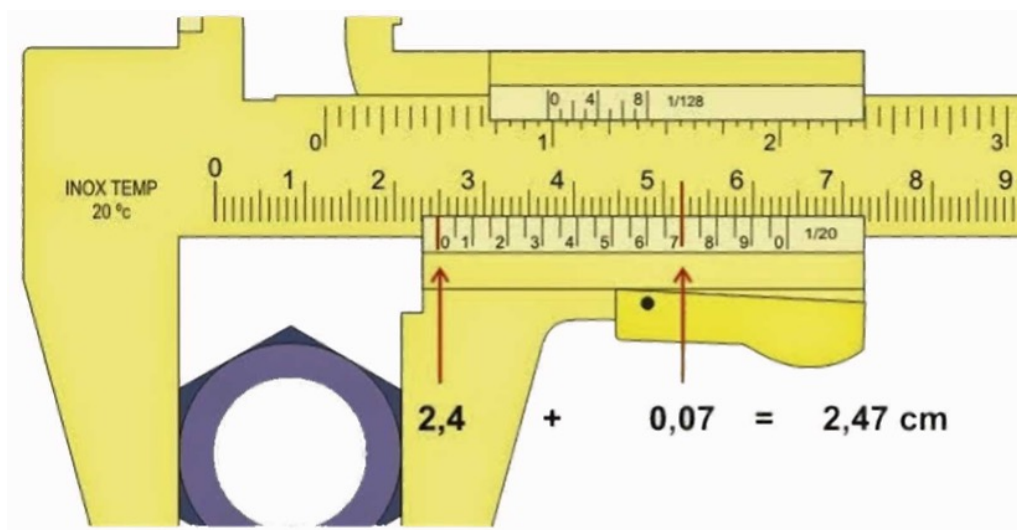


Рис. 2.4: Снятие отсчетов по основной шкале и нониусу штангенциркуля

Чтобы выразить тот факт, что полученное при измерении значение недостаточно точное, а также то, на сколько оно может отличаться от истинного значения, экспериментальный результат записывают вместе с его ошибкой. Наглядно это можно отобразить с помощью интервала на числовой оси, который называют **доверительным интервалом**. Все значения, которые попадают в доверительный интервал, считаются верными. При записи используют следующее обозначение $\langle x \rangle \pm \Delta x$, где $\langle x \rangle$ - это результат, находящийся посередине доверительного интервала, а Δx - левая и правая его границы или ошибка результата.

В науках, которые исследуют измерения (метрология) и метод их обработки (статистика), не принято писать лишние цифры в результатах измерений и ошибках. Для простоты будем **округлять все ошибки** в большую сторону до первой отличной от нуля цифры (говорят, «до первой значащей цифры»), а все **результаты** будем **округлять** по правилам математики **до того же разряда, до которого округлена ошибка**. Следуя этим рекомендациям, значение, например, $3,1415 \pm 0,0324$ правильнее записать как $3,14 \pm 0,04$. На самом деле, правила округления ошибок измерений чуть сложнее, о них вам расскажут в университете.

Результаты, полученные непосредственно измерением прибором, называются **прямыми измерениями**. Результаты, полученные путем вычислений, называются **косвенными измерениями**. Например, для определения значения средней скорости, рулеткой измерили расстояние, а секундомером время. Измерения расстояния и времени — прямые, а скорости — косвенное.

Результаты измерений или расчетов считаются **совпадающими**, если пересекаются их доверительные интервалы.

Описание установки

Установка представляет собой набор элементов для измерения и измерительные инструменты. В зависимости от имеющихся инструментов можно добавить к предлагаемому набору оборудования более точные линейки или штангенциркули, а также микрометр.

Приборы и принадлежности: линейка, штангенциркуль, мерный цилиндр, бумажная полоска, карандаш, калькулятор.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение диаметра мерного цилиндра прямым измерением с помощью штангенциркуля

1. Заполните таблицу 2.1 характеристик используемых приборов.

Таблица 2.1: Приборы и принадлежности

Приборы и принадлежности	Технические характеристики
Линейка	Предел измерения: Цена деления: Приборная погрешность:
Штангенциркуль	Предел измерения основной шкалы: Цена деления основной шкалы: Предел измерения нониуса: Цена деления нониуса: Приборная погрешность:
Мерный цилиндр	Максимальный объем: Цена деления: Приборная погрешность:
Бумажная полоска	
Карандаш	
Калькулятор	

2. Проведите измерение диаметра цилиндра штангенциркулем в трех местах цилиндра (ближе к основанию, в середине и ближе к горловине) и заполните таблицу
3. Укажите единицы измерения диаметра в заголовке столбца «диаметр».
4. Запишите результаты измерений. **Обратите внимание:** в ячейку следует записывать только численное значение. Единицы измерения уже записаны в заголовке столбца. Все значения в столбце должны быть выражены в одних и тех же единицах.
5. Из таблицы характеристик перепишите приборную погрешность штангенциркуля в столбец «погрешность прибора».
6. Заполните столбец «погрешность измерения».
7. Запишите результат измерения в виде «диаметр $\pm$ погрешность» измерения.

- **Обратите внимание:** результат и погрешность должны быть выражены в одинаковых единицах. Например, если погрешность выражена в мм, а результат в см, то оба значения следует перевести либо в см, либо в мм.
- Погрешность округляйте до одной значащей цифры.
- **Обратите внимание:** разряд последней цифры результата измерения должен совпадать с разрядом последней цифры погрешности. По общепринятым правилам округляйте результат до того же разряда, до которого округлена погрешность. Если у результата нет единиц в соответствующем разряде, то недостающие разряды заполняются нулями. Например, результат 23 с погрешностью 0,35 следует записать в виде $23,0 \pm 0,4$.

8. Укажите единицы результата измерения в заголовке столбца «Результат измерения».

Таблица 2.2: Измерения цилиндра штангенциркулем

Место измерения	Диаметр цилиндра D	Погрешность прибора Δl , мм	Погрешность прибора ΔD , мм	Результат измерения $D \pm \Delta D$, мм
основание				
середина				
горловина				

9. Повторите измерения диаметра, используя линейку. Заполните таблицу 2.3.

Таблица 2.3: Измерения цилиндра линейкой

Место измерения	Диаметр цилиндра D	Погрешность прибора Δl , мм	Погрешность прибора ΔD , мм	Результат измерения $D \pm \Delta D$, мм
основание				
середина				
горловина				

10. Сравните результаты измерений из таблиц 2.2 и 2.3. При измерении каким прибором точность измерения диаметра выше?

Задание 2. Определение диаметра мерного цилиндра косвенным измерением по длине окружности

1. Плотнo и ровно оберните цилиндр полоской бумаги с перехлестом и небольшим смещением краев относительно друг друга по образующей цилиндра (см. рисунок).
2. Поставьте по образующей цилиндра штрих на бумажке, так чтобы он переходил с одного края бумажки на другой (см. рисунок).
3. Расправьте полоску и измерьте расстояние между штрихами штангенциркулем. Результат запишите в таблицу 2.4.

Таблица 2.4: Измерения цилиндра штангенциркулем

Место измерения	Длина окружности цилиндра L	Погрешность прибора Δx , мм	Погрешность прибора ΔL , мм	Диаметр D	Результат $D \pm \Delta D$, мм
основание					
середина					
горловина					

Таблица 2.5: Измерения цилиндра штангенциркулем

Место измерения	Длина окружности цилиндра L	Погрешность прибора Δx , мм	Погрешность прибора ΔL , мм	Диаметр D	Результат $D \pm \Delta D$, мм
основание					
середина					
горловина					

- Измерьте расстояние между штрихами линейкой. Результат запишите в таблицу 2.5.
- Повторите измерение у основания, середины и горловины мерного цилиндра (чтобы не путать отметки, используйте разные края и стороны полоски и/или перечеркивайте штрихи)
- Сравните результаты таблиц 2.2 и 2.4 (измерения штангенциркулем), а также 2.3 и 2.5 (измерения линейкой). Можно ли говорить о совпадении результатов прямого и косвенного измерений? Обоснуйте ваш ответ.

Расчетные формулы:

$$D = \frac{L}{\pi} \quad \Delta D = \frac{\Delta L}{\pi}$$

Задание 3. Применение статистических методов обработки результатов. Сравнение точности измерений диаметра

- Рассчитайте среднее значение диаметра и его погрешность для каждого из экспериментов по формулам:

$$\langle D \rangle = \frac{D_{\text{основание}} + D_{\text{середина}} + D_{\text{горловина}}}{3}$$

$$\Delta D = \frac{\Delta D_{\text{основание}} + \Delta D_{\text{середина}} + \Delta D_{\text{горловина}}}{3}$$

- Рассчитайте среднее значение диаметра и его погрешность для каждого из экспериментов по формулам (метод Корнфельда определения среднего):

$$\langle D \rangle = \frac{D_{\max} + D_{\min}}{2}$$

$$\Delta D = \frac{D_{max} - D_{min}}{2}$$

2. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Какое измерение называется прямым, а какое косвенным?
2. Что называется приборной погрешностью?
3. Как соотносится оценка точности прибора с его ценой деления?
4. Для чего проводят несколько измерений одной и той же величины?
5. При каких условиях говорят о совпадении результатов измерения?

Литература

1. Мякишев, Г. Я. Физика 10 класс. Базовый уровень: учебник для общеобразовательных организаций / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский / под ред. проф. Н. А. Парфентьевой. – Москва: Просвещение, 2014. – 420 с.
2. Касьянов, В. А. Физика: 11 класс: углубленный уровень: учебник: издание в pdf-формате / В. А. Касьянов. – 10-е изд., стер. – Москва: Просвещение, 2022. – 493 с.

2.3 Лабораторная работа №2 Изучение колебаний математического маятника в магнитном поле

Цель работы: исследовать колебания математического маятника при различных условиях, вычислить эффективное ускорение маятника при наличии магнитного поля.

Введение

Колебания как механическое движение встречаются повсеместно, поэтому очень важно уметь их описывать. Для этого вводят различные физические модели. Хорошо известны вам две: математический и пружинный маятники (рис. 2.5).

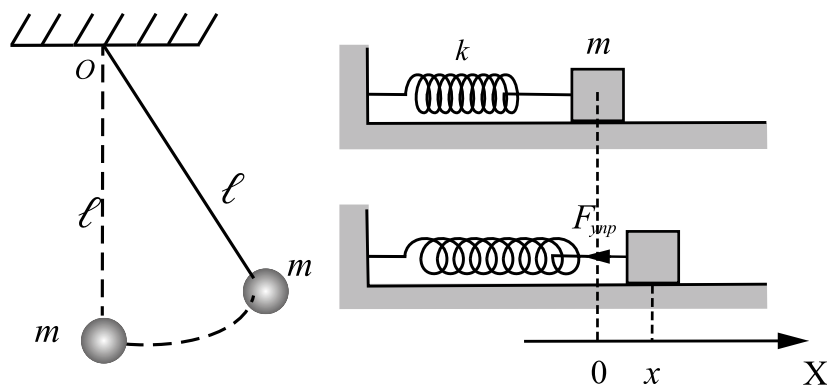


Рис. 2.5: Математический и пружинный маятники

Из курса общей физики нам известно, что для свободных незатухающих малых колебаний период математического маятника с длиной нити l равен:

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

где $g=9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения Земли.

Отметим, что эта формула справедлива, когда на груз маятника действует только одна возвращающая сила – сила тяжести mg . В более общем случае помимо гравитационного поля могут быть и другие поля, например, магнитное поле постоянного магнита или электрическое поле конденсатора. При наличии других силовых полей формула для T_0 уже не выполняется, однако ее достаточно легко преобразовать, если вместо g использовать некоторое так называемое эффективное ускорение, содержащее и другие возвращающие силы, причем:

$$a_{\text{эфф}} = g \pm \frac{F}{m}$$

где F – некоторая возвращающая сила, m – масса груза. Знак в формуле определяется следующим образом: если $\vec{g} \uparrow \uparrow \vec{F}$, то необходимо взять «плюс», если $\vec{g} \uparrow \downarrow \vec{F}$, то «минус».

В работе исследуется модель математического маятника, на который помимо силы тяжести действует магнитная сила, создаваемая постоянным магнитом, находящимся ниже

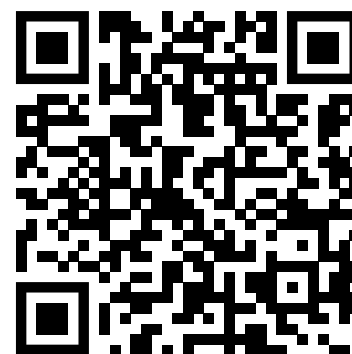
груза. Если груз маятника представляет из себя ферромагнетик, то при движении груза в магнитном поле будет происходить намагничивание, то есть, магнит будет притягивать к себе груз. Таким образом, помимо возвращающей силы тяжести на груз вертикально вниз будет действовать некоторая магнитная сила F .

Тогда окончательно можно получить формулу для периода математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{a_{\text{эфф}}}} = 2\pi \sqrt{\frac{m \cdot l}{mg + F}}$$

Понимание процессов взаимодействия механических систем с внешними полями играет ключевую роль в создании устойчивых и эффективных технологий, таких как магнитные подвесы, системы управления роботами и инновационные транспортные средства (например, маглев). Экспериментальное изучение этих явлений на лабораторных установках развивает аналитические навыки и помогает усвоить базовые принципы физики, лежащие в основе современного научного прогресса.

В токамаках, установках для удержания высокотемпературной плазмы с целью управления термоядерным синтезом, магнитные поля играют ключевую роль. Они создаются для стабилизации и удержания плазмы, но при этом оказывают влияние на различные механические системы, такие как опорные конструкции и подвижные механизмы. Изучение влияния магнитного поля на привычную механическую систему позволит понять то, как эти эффекты применяются на практике. А узнать больше о токамаках можно в выпуске инженерного подкаста, перейдя по QR коду.



**Термоядерный реактор:
наука о том, как скрутить
солнце в бублик**

Описание установки

Приборы и принадлежности: многофункциональный штатив для фронтальных работ, полосовой магнит, секундомер, динамометр.

Схематически экспериментальная установка изображена на рисунке 2.6. Нить с грузом 1 укреплена на штативе 2. Для создания внешнего магнитного поля используется обыкновенный полосовой магнит 3.

Для экспериментального измерения периода колебаний следует использовать секундомер. Цена деления большинства секундомеров составляет 0,01 с, по этой причине приборной погрешностью можно пренебречь. Однако основной вклад вносит именно случайная погрешность измерения времени. Для её снижения в работе предлагается определять не период колебаний, а время полных 5 колебаний маятника, а затем вычислять период.

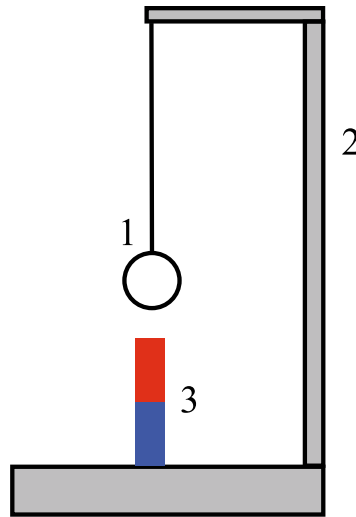


Рис. 2.6: Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение параметров и периода математического маятника в отсутствие магнитного поля

1. С помощью линейки определите длину нити l маятника и массу m груза. В качестве погрешностей Δl и Δm примите цену деления приборов. Результат запишите в лабораторный журнал.
2. Рассчитайте теоретическое значение периода $T_0^{\text{теор}}$ по формуле:

$$T_0^{\text{теор}} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

3. Экспериментально определите период T_0 малых колебаний математического маятника. Для этого 5 раз проведите измерения времени t полных 5 колебаний и заполните таблицу 2.6.

Таблица 2.6: Экспериментальные данные

№	t , с	$\langle t \rangle$, с	$T_0 = \frac{\langle t \rangle}{5}$
1			
2			
3			
4			
5			

4. Рассчитайте погрешность периода ΔT_0 по формуле:

$$\Delta T_0 = \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{5}\right)^2 + \left(\frac{\pi \Delta l}{\sqrt{gl}}\right)^2}$$

где $\Delta t = \frac{t_{max} - t_{min}}{2}$ по методу Корнфельда.

5. Сделайте вывод, совпадают ли с учетом погрешности T_0 и $T_0^{теор}$.

Задание 2. Расчет эффективного ускорения и периода маятника в магнитном поле

1. В соответствии с рисунок 2.6 установите полосовой магнит под грузом маятника.
2. Прикрепите груз к динамометру и медленно приближайте к магниту. В некоторый момент магнитная сила F притяжения станет заметной. Определите примерное расстояние между грузом и магнитом такое, чтобы $F \approx 2mg$.
3. Запишите полученное значение силы F и его погрешность ΔF (как цену деления динамометра) в лабораторный журнал.
4. Рассчитайте $a_{эфф}$ и период колебаний при наличии магнитного поля $T^{теор}$. Погрешность $\Delta a_{эфф}$ определите по формуле:

$$\Delta a_{эфф} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{m}\right)^2 + \left(\frac{F \cdot \Delta m}{m^2}\right)^2}$$

5. Запишите результаты в лабораторный журнал.

Задание 3. Экспериментальное определение периода математического маятника в магнитном поле

1. Подвесьте груз на нити на расстоянии, которое было определено в задании 2.
2. Экспериментально определите период T малых колебаний математического маятника при наличии магнитного поля. Для этого 5 раз проведите измерения времени полных 5 колебаний и заполните таблицу 2.7.

Таблица 2.7: Экспериментальные данные

№	t , с	$\langle t \rangle$, с	$T_0 = \frac{\langle t \rangle}{5}$
1			
2			
3			
4			
5			

3. Рассчитайте погрешность периода ΔT по формуле:

$$\Delta T_0 = \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{5}\right)^2 + \left(\frac{\pi \Delta l}{\sqrt{gl}}\right)^2 + \left(\frac{\pi \sqrt{l} \cdot \Delta a_{эфф}}{a_{эфф}^{\frac{3}{2}}}\right)^2}$$

где $\Delta t = \frac{t_{max} - t_{min}}{2}$ по методу Корнфельда.

4. Сделайте вывод, совпадают ли с учетом погрешности T и $T^{теор}$.
5. Сделайте вывод о применимости формулы для расчета периода через эффективное ускорение.

Контрольные вопросы

1. Какова формула частоты математического маятника?
2. Почему при наличии магнитного поля период математического маятника может измениться?
3. В каком случае наличие магнита в работе не привело бы к изменению периода колебаний маятника?
4. Как изменилась бы формула для расчета периода, если полюса магнита поменять местами?
5. Какие допущения и упрощения относительно колебаний были сделаны в данной работе? Что внесло основной вклад в отклонение от теоретических расчетов?

Литература

1. Мякишев, Г. Я. Физика 10 класс. Базовый уровень: учебник для общеобразовательных организаций / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский / под ред. проф. Н. А. Парфентьевой. – Москва: Просвещение, 2014. – 420 с.
2. Касьянов, В. А. Физика: 11 класс: углубленный уровень: учебник: издание в pdf-формате / В. А. Касьянов. – 10-е изд., стер. – Москва: Просвещение, 2022. – 493 с.

2.4 Лабораторная работа №3 Изучение деформации материалов

Цель работы: построение диаграммы деформирования металлов, определение областей упругой и пластичной деформации, определение механических свойств металлов.

Введение

На уроке физики вы изучили закон упругой деформации – закон Гука. Он устанавливает прямую пропорциональность между изменением размеров тела (его деформацией) и силой, вызвавшей это изменение. Но главное свойство упругой деформации заключается в том, что при упругой деформации после прекращения действия внешней силы тело полностью восстанавливает свои размеры и форму. Этот закон широко используется в технике: во всех амортизаторах, рессорах машин, пружинах часовых механизмов. А еще упругая деформация позволяет сохранять свойства и прочность конструкций даже при изменениях их форм и размеров (но только в небольшом диапазоне). Например, длинный мост может совершать небольшие колебания под весом проезжающих по нему машин, и при этом не разрушается. Аналогично ведут себя крылья самолета при попадании в воздушную турбулентность – небольшие изменения сил, действующих на крылья, приводят к их деформации, но из-за упругости материала они возвращают свою форму без ущерба для воздушного судна после восстановления стационарного режима полета. Каковы пределы применимости закона упругой деформации? Что будет происходить с материалом, если превысить эти пределы? Сразу ли произойдет разрушение? Все ли материалы ведут себя одинаково и имеют схожие механические свойства? На эти и многие другие вопросы отвечают такие разделы физики и инженерных наук, как механика сплошных сред, физика твердого тела, материаловедение, сопротивление материалов и другие.

Диаграммой деформирования называется график зависимости напряжения (σ) от относительного удлинения тела (ε). Напряжение – это отношение силы к площади поперечного сечения тела, а относительное удлинение – это отношение изменения длины к начальной длине тела. Для построения такой диаграммы исследуемые образцы (чаще всего это длинные прутки или пластины определенной специальной формы и размеров (рис. 2.7)) вставляют в специальные разрывные машины и начинают их растягивать, измеряя при этом их удлинение. Эксперимент проводится до разрушения (разрыва) образца или превышения критического значения силы.

Классический закон Гука гласит, что деформация тела прямо пропорциональна силе, вызвавшей эту деформацию. После снятия усилия тело должно полностью восстановить свою форму и размер. Однако данный закон применим только для небольших усилий и деформаций. Диапазон сил и деформаций, в котором выполняется закон Гука, называется **областью упругой деформации** (рис. 2.8). Если же к телу приложить большую силу, то тело будет безвозвратно менять свою форму и размер, а начиная с некоторого значения силы эти изменения вообще будут происходить без существенного увеличения приложенной силы. Это так называемые **области пластической деформации** и **текучести**.

Все вышесказанное справедливо для пластичных металлов: медь, алюминий, олово,



Рис. 2.7: Образцы различных металлов, подготовленные для разрушающих испытаний и определения механических свойств

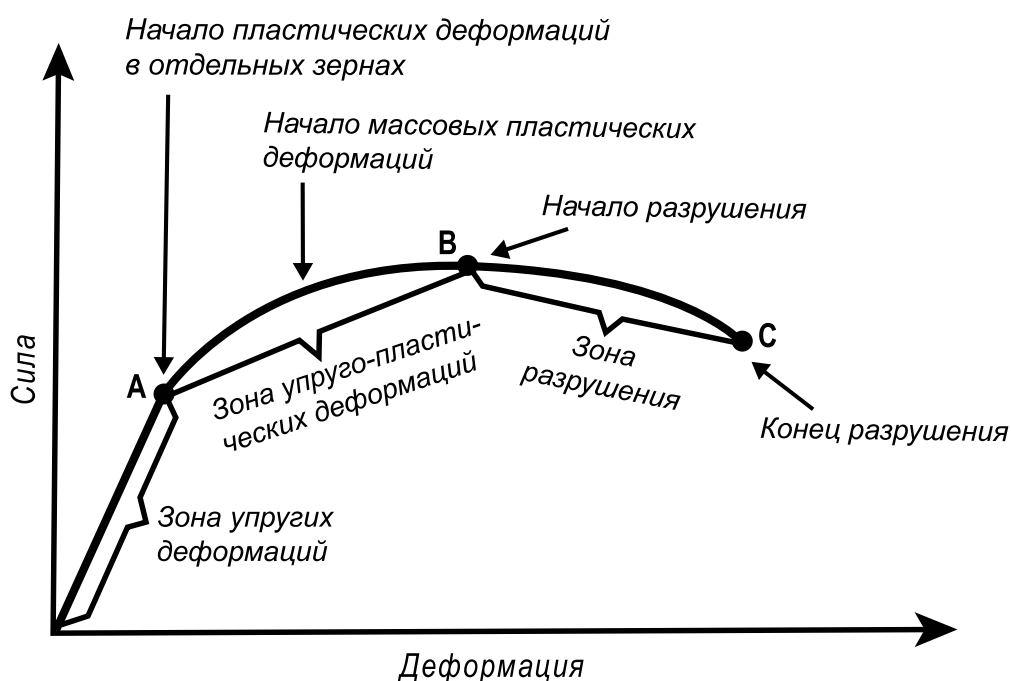


Рис. 2.8: Диаграмма деформирования

железо, сталь, бронза. Очень пластичным является золото. Эти металлы относительно легко поддаются механической обработке – гибке, ковке, штамповке, чеканке, прокату, волочению. Пластичность некоторых металлов (в том числе и сплавов) имела важное историческое и технологическое значение в развитии человечества. Можно привести в пример скачки в развитии цивилизаций во времена бронзового и железного веков, оцените утонченность и красоту древних изделий из золота, серебра и меди. Однако есть и другие металлы – хрупкие (бериллий, хром, чугун), которые не имеют способности к пластической деформации, не тянутся, а мгновенно разрушаются при превышении определенной нагрузки. При этом они могут быть очень прочными и твердыми. Например, с XVI века все пушки отливались из чугуна, а не так давно в домах повсеместно устанавливались чугунные батареи, в которые подавалась горячая вода под большим давлением. При этом падение, удар или большие и

резкие температурные перепады могут расколоть чугунное изделие. Из-за особых механических свойств хрупких металлов особыми являются и способы их обработки. Для придания изделиям из этих металлов определенных форм используется литье, спекание спрессованных порошков, а механическая обработка (точение, фрезерование, сверление, шлифовка) требует применения специальных техник и умений.

Описание установки

Установка представляет собой разрывную машину - станину с крепежом, установленным цифровым штангенциркулем для определения линейного перемещения, осуществляемого винтом в верхней части установки, и закрепленным динамометром. На установку могут монтироваться крепежные элементы для давления на образец плоскостью, клином, острием, а также крючки для подвеса проволоки/ веревки для работы на разрыв. Динамометр имеет предел измерения 50 Н и имеет функцию переключения единиц измерения на граммы и унции. Динамометр имеет несколько режимов работы - в одном он показывает непрерывное значение, в другом - фиксирует максимальный результат при снятии нагрузки. Динамометр работает как от автономного источника питания, так и от сети 220 В. Цифровой индикатор штангенциркуля, измеряющего линейные перемещения работает от батарей. Перемещение динамометра осуществляется регулировочным винтом в верхней части установки.

Приборы и принадлежности: разрывная машина (с измерителем удлинения и нагрузки), набор различных проволок, штангенциркуль.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Построение диаграммы деформирования

1. Прикрепите к верхней и нижней петле разрывной машины проволоку. Крепление должно быть надежным. При нагружении проволока не должна проскальзывать!
2. Разведите петли разрывной машины так, чтобы проволока расправилась, но еще не начала натягиваться.
3. Установите измеритель удлинения в нулевое положение (или определите первоначальное положение измерителя).
4. Последовательно увеличивая натяжение, снимите зависимость удлинения проволоки от прикладываемого усилия. Рекомендуется провести измерения удлинения при указанных в таблице 2.8 нагружениях (усилиях).
5. Используя программы для построения графиков (например, электронные таблицы LibreOffice Calc), постройте график зависимости $F(\Delta x)$.

Задание 2. Определение области упругой и пластичной деформации. Вычисление коэффициента упругости.

1. Для вычисления коэффициента упругости выберите точку примерно посередине линейной области упругой деформации (см. рис. 2.8). Результат занесите в таблицу.

Таблица 2.8: Экспериментальные данные

$F, \text{Н}$	0	5	10	15	20	22	24	25	26	27	28	29	30
$\Delta x, \text{мм}$													
$F, \text{Н}$	31	32	33	34	35	36	38	40	40.5	41	41.5	42	42.5
$\Delta x, \text{мм}$													

2. Вычислите площадь поперечного сечения проволоки. Результат занесите в таблицу 2.9.
3. Вычислите напряжение на образце в выбранной точке: отношение силы к площади поперечного сечения проволоки.
4. Определите относительное удлинение проволоки в выбранной точке: отношение удлинения к начальной длине. Удлинение считать от нулевого значения (если начальное значение при измерении было ноль). Результат занесите в таблицу.
5. Вычислите модуль упругости (модуль Юнга) как отношение напряжения к относительной деформации. Результат занесите в таблицу. Модуль упругости эквивалентен коэффициенту упругости, только выражен в других единицах.
6. Определите по справочнику значение модуля упругости для данного металла. Сравните расчетное значение с табличным.

Таблица 2.9: Экспериментальные данные

$F_{1/2}, \text{Н}$	$S, \text{мм}^2$	$\sigma, \text{Па}$	$\Delta x, \text{мм}$	$l_0, \text{мм}$	ε	$E, \text{Па}$	$E, \text{Па}$

Расчетные формулы

$$S = \frac{\pi D^2}{4}, \quad \sigma = \frac{F}{S}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta x}{l_0}, \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Задание 3. Определение предела пропорциональности (упругости), текучести и прочности

1. По построенному в Задании 1 графику определите координаты точки, где нарушается линейная зависимость усилия от удлинения. Результат занесите в таблицу. Это значение предела пропорциональности, оно совпадает с пределом упругости (для большинства материалов).
2. На оси абсцисс по графику отметьте точку $\Delta x_{0.2} = 0.2\% \cdot l_0$ (см. рис. 2.8). Через эту точку постройте прямую, параллельную наклонному участку упругой деформации. Ордината

точки пересечения этой прямой с графиком – так называемый условный предел текучести. Занесите полученный результат в таблицу ??.

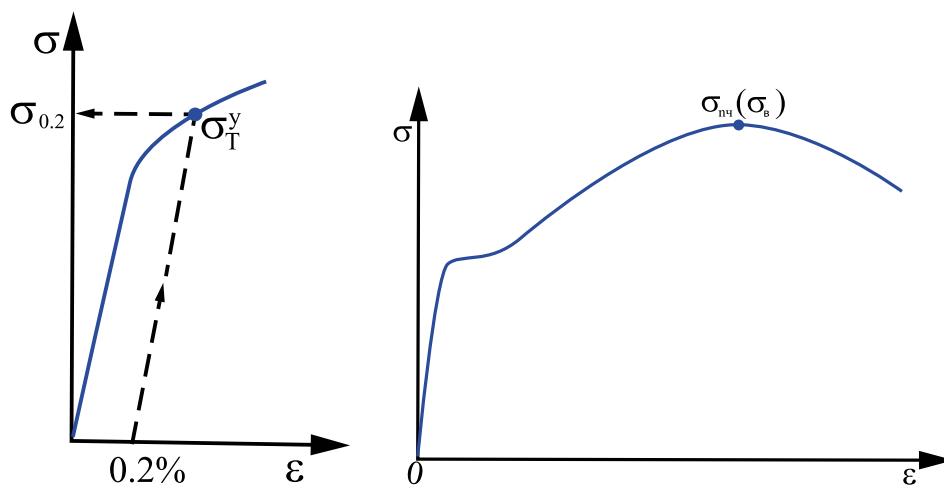


Рис. 2.9: Участки диаграммы деформирования (для определения пределов текучести и прочности)

3. Определите по справочнику предел текучести для данного материала. Результат занесите в таблицу ??. Сравните расчетное и табличное значения.
4. Определите по графику предел прочности (см. рис. 2.9). Результат занесите в таблицу 2.10.

Таблица 2.10: Экспериментальные данные

$F, \text{Н}$	$\Delta x, \text{мм}$	$\Delta x_{0.2}, \text{мм}$	$F_{0.2}, \text{Н}$	$S, \text{мм}^2$	$\sigma_{0.2}, \text{Па}$	$\sigma_{0.2}, \text{Па}$

Таблица 2.11: Экспериментальные данные

$F, \text{Н}$	$\Delta x, \text{мм}$	$\Delta x_{0.2}, \text{мм}$	$F_{0.2}, \text{Н}$	$S, \text{мм}^2$	$\sigma_{0.2}, \text{Па}$	$\sigma_{0.2}, \text{Па}$

Расчетные формулы

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S}, \quad \sigma_{пр} = \frac{F_{\text{макс}}}{S}$$

Контрольные вопросы

1. Назовите характерное отличие хрупких металлов от пластичных?
2. Какую деформацию называют упругой?

3. Сформулируйте закон Гука?
4. При каком условии применим закон Гука?
5. Нарисуйте диаграмму деформирования и укажите на ней характерные области упругой деформации, области пластической деформации и области разрушения.
6. Какие методы механической обработки пластичных металлов используют явление пластической деформации?

Литература

1. Мякишев, Г. Я. Физика 10 класс. Базовый уровень: учебник для общеобразовательных организаций / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский / под ред. проф. Н. А. Парфентьевой. – Москва: Просвещение, 2014. – 420 с.
2. Касьянов, В. А. Физика: 11 класс: углубленный уровень: учебник: издание в pdf-формате / В. А. Касьянов. – 10-е изд., стер. – Москва: Просвещение, 2022. – 493 с.

2.5 Лабораторная работа №4 Определение периода вращения солнца. Основы астрономических наблюдений

Цель работы: рассчитать период вращения Солнца на разных гелиографических широтах, освоить методику наблюдения за солнцем с помощью телескопа.

Введение

Солнце – ближайшая к Земле звезда, находящаяся на расстоянии 149,6 млн. км или 1 астрономической единицы (а.е.). Благодаря ему существует жизнь на Земле, и наша планета обращается вокруг него. На примере Солнца можно изучать внутреннее строение звезд, а также поведение данной звезды и влияние на Землю. Одной из задач по исследованию Солнца стоит определение его скорости вращения. Так как поверхность звезды состоит не из твердого вещества, а горячего ионизированного газа – плазмы, то его вращение дифференцировано: скорость вращения различна на разных широтах Солнца (гелиографических широтах).

Существует много способов исследования вращения Солнца, однако все они сводятся к двум основным методам:

- по смещению со временем различных характерных образований на Солнце (факелы, солнечные пятна, волокна, образования в зеленой и электронной коронах);
- по доплеровским смещениям отдельных спектральных линий в спектре Солнца в различных метках солнечного диска.

В данной работе необходимо воспользоваться первым методом, отслеживая смещение солнечных пятен (рис. 2.10). Данные, полученные из наблюдений, можно проанализировать несколькими способами: вычислением смещений пятен в течение нескольких часов или нескольких дней; анализом серии временных рядов и усреднением полученных значений смещений.



**Телескоп Джеймс Уэбб:
зеркальное отражение
прошлого**

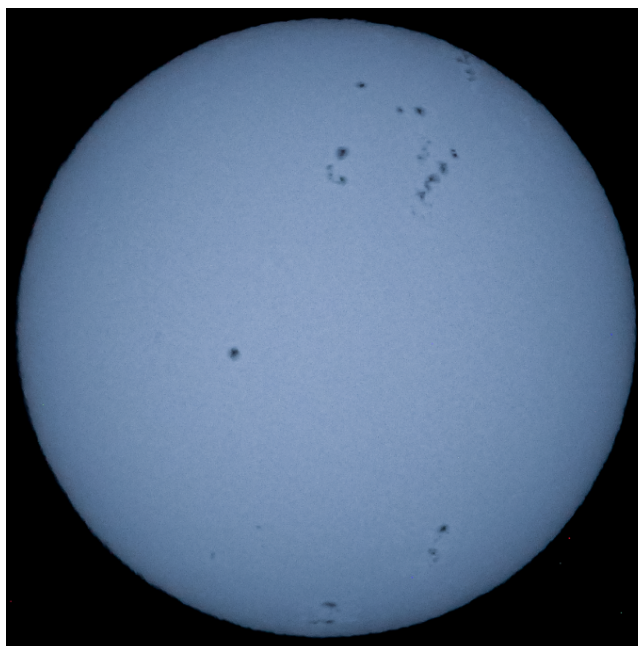


Рис. 2.10: Фотография Солнца в оптическом диапазоне

Частоту вращения Солнца на разных гелиографических широтах можно рассчитать по формуле Ховарда и Харви (1966–1968):

$$\omega(\varphi) = 13.76^\circ - 1.74^\circ \cdot \sin^2(\varphi) - 2.19^\circ \cdot \sin^4(\varphi)$$

где φ – гелиографическая широта.

Описание установки

Приборы и принадлежности: распечатанные фотографии Солнца, линейка, карандаш, телескоп на штативе, солнечный фильтр для телескопа, камера для телескопа (опционально).

Работа выполняется с помощью распечатанных фотографий Солнца, выполнением геометрических построений на листах бумаги или миллиметровки. В случае хорошей погоды или возможности организации выездных наблюдений возможно дополнение работы наблюдением солнечных пятен с помощью телескопа с соответствующими светофильтрами и приставкой для наблюдения за Солнцем.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение периода вращения Солнца

1. Вам предоставлены несколько фотографий Солнца с указанием даты и времени с точностью до минуты. На них необходимо отметить экватор Солнца и нулевой меридиан, от которого будет происходить отсчет смещения пятен, а также измерить линейкой диаметр Солнца D на фотографии. Для выполнения лабораторной работы необходимо выбрать не менее 6 солнечных пятен, находящихся на разных широтах. Измерьте расстояние l от экватора до центра пятна с помощью линейки и рассчитайте его широту по следующей формуле:

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{2l}{D} \right)$$

2. Данные вычисления необходимо проделать для всех выбранных пятен. После этого необходимо рассчитать долготу солнечного пятна. Для этого измерьте расстояние x от нулевого меридиана до центра пятна с помощью линейки и рассчитайте его долготу по следующей формуле:

$$\alpha_1 = \arcsin \left(\frac{2x_1}{D} \right)$$

3. Аналогичную операцию нужно проделать для того же пятна в другой момент времени и вычислить долготу α_2 . Разность долгот $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ – угловое расстояние, которое прошло пятно в течение выбранного промежутка времени. Тогда:

$$\omega = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t},$$

где Δt – разность по времени между двумя снимками. Далее необходимо рассчитать средний период вращения Солнца:

$$T = \frac{360}{\omega}$$

4. По полученным данным определите среднее значение периода вращения Солнца $\langle T \rangle$ и его погрешность. Воспользуйтесь альтернативным способом расчета периода: необходимо выбрать два снимка, на которых одно и то же пятно находится на левом и правом краях диска соответственно. Тогда за промежуток времени Δt между двумя снимками пятно прошло угловое расстояние в 180° по диску Солнца, а период вращения будет:

$$T = 2 \cdot \Delta t$$

5. Постройте график зависимости периода вращения Солнца от гелиографической широты $T(\varphi)$, полученной первым методом, на него нанесите значения периода вращения, полученные вторым методом, и значения периода вращения, полученные аналитическим методом по формулам (2) и (5). Проанализируйте результаты и определите, какой из двух наблюдательных методов точнее и поясните почему.

Задание 2. Определение периода вращения Солнца (при наличии подходящих погодных условий)

1. Установите на телескоп солнечный фильтр из комплекта оборудования. В случае его отсутствия изготовьте солнечный фильтр самостоятельно или используйте проекционную приставку для наблюдения за солнцем.
2. Расположите телескоп так, чтобы была возможность получить снимки солнца.

3. Получите с помощью телескопа снимки солнечных пятен, зафиксируйте координаты, дату и время получения снимка.
4. Повторите эксперимент пп 1-3 через неделю.
5. Пользуясь полученным ранее значением периода вращения солнца, определите планируемое смещение солнечного пятна за ваш период измерений. Сравните результат с полученным экспериментально.

Контрольные вопросы

1. Почему для определения периода вращения Солнца используются солнечные пятна, а не другие элементы его поверхности?
2. Как изменяется видимое движение солнечных пятен в зависимости от широты на Солнце?
3. Почему период вращения Солнца на экваторе отличается от периода на полюсах?
4. Какие факторы могут повлиять на точность определения периода вращения Солнца по солнечным пятнам?
5. Как солнечные пятна помогают ученым изучать не только вращение Солнца, но и другие его характеристики?

Литература

1. Мякишев, Г. Я. Физика 10 класс. Базовый уровень: учебник для общеобразовательных организаций / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский / под ред. проф. Н. А. Парфентьевой. – Москва: Просвещение, 2014. – 420 с.
2. Касьянов, В. А. Физика: 11 класс: углубленный уровень: учебник: издание в pdf-формате / В. А. Касьянов. – 10-е изд., стер. – Москва: Просвещение, 2022. – 493 с.

2.6 Проектные и кейсовые задачи раздела

2.7 Кейс №1 Исследование технологических параметров FDM печати.

1.Актуальность

Изучение параметров 3D печати играет ключевую роль в создании прочных и качественных деталей. Современные технологии аддитивного производства предлагают широкий спектр материалов и методов, каждый из которых требует оптимизации параметров для достижения наилучших результатов. Ключевыми аспектами являются выбор температуры экструзии, скорости печати, толщины слоя, адгезии между слоями и типа заполнения. Температура экструзии напрямую влияет на межслойное сцепление и прочность изделия. Если она слишком низкая, материал не расплавляется должным образом, что приводит к образованию слабых зон в структуре детали. Завышенная температура, напротив, может вызвать перегрев и ухудшение механических свойств материала. Скорость печати определяет время изготовления и качество поверхности детали. Чрезмерно высокая скорость может привести к недостаточной адгезии между слоями, в то время как низкая замедляет процесс и увеличивает стоимость изделия. Толщина слоя оказывает влияние на детализацию: тонкие слои повышают качество, но увеличивают время печати. Тип заполнения определяет внутреннюю структуру детали, ее вес и механические свойства. Плотное заполнение обеспечивает прочность, но повышает расход материала. Игнорирование оптимизации этих параметров может привести к дефектам, таким как расслоение, трещины и деформация. Таким образом, тщательное изучение параметров 3D печати необходимо для разработки надежных изделий, отвечающих современным требованиям промышленности. Можно рассмотреть следующие параметры, влияющие на прочностные характеристики деталей, выполненные по технологии 3D печати:

Прочность на растяжение Прочность на растяжение показывает, какую максимальную нагрузку материал может выдержать, прежде чем порваться. Например, это важно для деталей, которые должны выдерживать растягивающие усилия, как крюк или трос. Формула для расчета прочности на растяжение:

$$\sigma_t = \frac{F}{A},$$

где F — сила растяжения, а A — площадь поперечного сечения.

Пример: PLA имеет прочность на растяжение около 53 МПа, а сталь — 500-800 МПа.

Прочность на изгиб

Прочность на изгиб определяет, сколько нагрузки материал выдержит при сгибании. Например, это важно для стульев или рам.



3D-печать: если печатать дом, то только не буквой "Г"

Формула для расчета:

$$\sigma_b = \frac{3F \cdot L}{2b \cdot h^2},$$

где F – сила, L – длина, b – ширина, h – высота.

Пример: PLA имеет прочность на изгиб 102 МПа.

Модуль упругости

Модуль упругости показывает, насколько материал жесткий или гибкий. Например, TPU более эластичный, чем ПEEK.

Формула:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon},$$

где σ – напряжение, а ε – относительное удлинение.

Пример: TPU имеет модуль упругости 70 МПа, а ПEEK – 3720 МПа.

Ударная вязкость

Ударная вязкость показывает, как материал ведет себя при ударах или падениях. Для ее измерения используются специальные методы (Изода или Шарпи), которые определяют, сколько энергии материал может поглотить перед разрушением. Кроме физических свойств используемых материалов, имеется также ряд технологических параметров, влияющих на прочность:

1. Ориентация и параметры печати: например, заполнение и толщина стенок.
2. Условия эксплуатации: влажность, температура, химические воздействия.
3. Постобработка: например, нагрев и отжиг готовой детали.
4. Дизайн: правильный подход к проектированию для 3D-печати.

Использование ПО для моделирования

Для проверки прочности детали еще до ее печати можно использовать специальные программы. Они помогают предсказать, как деталь поведет себя под нагрузкой, и при необходимости изменить дизайн.

Узнать больше о современной 3D печати и разобраться в тонкостях этого инженерного искусства можно вместе с сотрудниками центра компетенций WorldSkills, Игнатовым А.В. и Божковым М.Ю.. Переходи по QR коду и узнай много нового!

2. Этапы работы

1. Подготовьте модели деталей для изучения прочностных характеристик деталей разных форм и размеров. При выборе ширины объекта ориентируйтесь на размеры рабочего инструмента разрывной машины. Заготовьте следующие типы деталей:
 - Цилиндр
 - Прямоугольник
 - Балка (длинный тонкий прямоугольник)
 - Кольцо

2. Подготовьте несколько разных моделей цилиндра для печати в слайсере с изменением следующих параметров:
 - Ширина стенки
 - Плотность заполнения
 - Шаблон заполнения
 - Толщина основания
3. Распечатайте все подготовленные модели и проведите испытания на сжатие на разрывной машине. Сделайте выводы о влиянии технологических параметров печати на прочность деталей.
4. Повторите аналогичные исследования для деталей других форм и размеров. Составьте технологическую карту или шаблон в слайсере для производства деталей с разными характеристиками (предельными для каждого случая)
5. Повторите испытания для балки (прогиб балки) и кольца (разрыв кольца)
6. Составьте рекомендации по подготовке моделей для печати в зависимости от требований заказчика по прочности и надежности полученной конструкции
7. Определите, какие параметры лучше подходят для печати:
 - Силовых конструкций и элементов, нагружаемых на разрыв
 - Зубчатых колес и валов
 - Корпусных деталей

3. Примерный перечень средств и материалов для выполнения задания

1. FDM принтер для работы с пластиком PLA
2. PLA пластик
3. Штангенциркуль
4. Разрывная машина с насадкой для работы на сжатие материалов
5. Компьютер с установленным ПО для 3D моделирование и слайсером для печати
6. Динамометр с пределом 50 Н или более (можно использовать бытовые весы - безмен)

4. Требования к предоставлению решения задания

По итогам выполнения кейсовой задачи оформляется отчет о работе проектной команды, включающий в себя как разработанные системы и устройства, так и корректно оформленную документацию по кейсу. Документация в обязательном порядке должна включать в себя:

1. Титульный лист (школа, авторы, название кейса, название команды, руководитель).

2. Описание команды, распределение ролей, функций и обязанностей каждого участника команды.
3. Теоретическое Введение. В разделе «Введение» обосновывается Актуальность исследования, формулируются цель и задачи работы, а также предоставляется краткий литературный обзор темы исследования.
4. Методику проведения исследования. В разделе «Методика исследования» описывается порядок выполнения экспериментов, экспериментальная установка, приводится ее схема, указываются расчетные формулы, использованные для обработки полученных данных, а также приводится описание методики оценки погрешностей экспериментальных результатов.
5. Результаты проведенного исследования. В разделе «Результаты» необходимо представить полученные данные, а также результаты их обработки в виде таблиц и/или графиков, привести интерпретацию и физическое объяснение результатов. Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и подписаны.
6. Разработанные 3D-модели в форматах .obj, .stl или .step, скриншоты разработанных 3D-моделей (как системы в целом, таким и отдельный ее частей, при наличии). 3D-модели должны находиться в репозитории проекта в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.).
7. Описание схемы разработанной установки в виде изображений общей схемы установки, электрической принципиальной схемы, монтажной схемы, оптической схемы (если имеется) и т.д.
8. В случае разработки программного обеспечения, должен быть приведен алгоритм его работы в виде блок-схем.
9. Код разработанного программного обеспечения должен быть представлен в виде ссылки на репозиторий проекта с кодом в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.). Любые архивы с загруженными исходными кодам (.zip, .rar и т.п.) загружать в другие хранилища данных запрещается.
10. Фотографии разработанной установки и ее составных частей.
11. Видеоролик, демонстрирующий выполнение экспериментальных измерений в соответствии с требованиями кейса. На видео необходимо продемонстрировать прохождение каждого, описанного в задании, эксперимента или отдельных его частей. Видео с проведенным экспериментом должно однозначно подтверждать авторство участников (во время записи ролика необходимо четко произнести название команды, ФИО участников, номер школы, ФИО руководителя). Видеоролик располагается на стороннем видеохостинге (ВКонтакте, Rutube и др.), ссылка на видеоролик располагается в репозитории в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.). Весь эксперимент, от подготовки к работе до завершения последнего этапа, должен быть записан на видео одним дублем без склейки и монтажа. В течении всего видео в кадре должны быть разработанная командой установка и как минимум один из участников команды,

выполняющий все операции с ней. Вход и выход участников, передача инструмента, деталей и других вещей из кадра недопустимо. Допускается использование второй камеры для более детализированной демонстрации ключевых моментов. Видео должно быть со звуком, на котором отчетливо слышны подаваемые голосовые команды и действия команды. На видеозаписи должно быть хорошо различимы все элементы, влияющие на оценивание результативности. В случае, если эксперты не смогут по видеозаписи однозначно понять результат выполнения задания, принимается решение не в пользу участника.

12. Заключение, включающее краткое изложение результатов работы, подведение итогов исследования, обсуждение его практической и теоретической значимости. Также могут быть предложены дополнительные направления исследований.
13. Список литературных источников. В этом разделе приводится список использованных источников, статей, книг и другой литературы, на которые ссылается исследование. Кроме того, работа может содержать приложения с иллюстративным материалом (рисунки, схемы, таблицы, фотографии и т. п.). На каждое приложение должна быть дана ссылка в тексте работы.

5. Список рекомендуемой литературы

1. Горьков, Д. Е. 3D-печать с нуля / Д. Е. Горьков, В. А. Холмогоров. — СПб.: БХВ-Петербург, 2020. — 256 с.
2. Канесса, Э. Доступная 3D-печать для науки, образования и устойчивого развития / Э. Канесса, К. Фонда, М. Дзеннаро. — 2013. — 14,4 Мб.
3. Никонов, В. В. КОМПАС-3D: создание моделей и 3D-печать / В. В. Никонов. — М.: АСКон, 2017. — 320 с.
4. Большаков, В. П. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex: учебный курс / В. П. Большаков, А. Л. Бочков, А. Сергеев. — М.: АСКон, 2016. — 368 с.
5. Герасимов, А. А. Самоучитель КОМПАС-3D v19 / А. А. Герасимов. — М.: АСКон, 2019. — 400 с.

2.8 Темы проектно-исследовательских работ для самостоятельного изучения

Выполнение проектных и исследовательских работ – это важный этап в обучении, который помогает не только углубить понимание физических явлений, но и развить навыки, которые необходимы каждому будущему инженеру: критическое мышление, умение ставить и решать задачи, анализировать данные и работать с экспериментальным оборудованием.

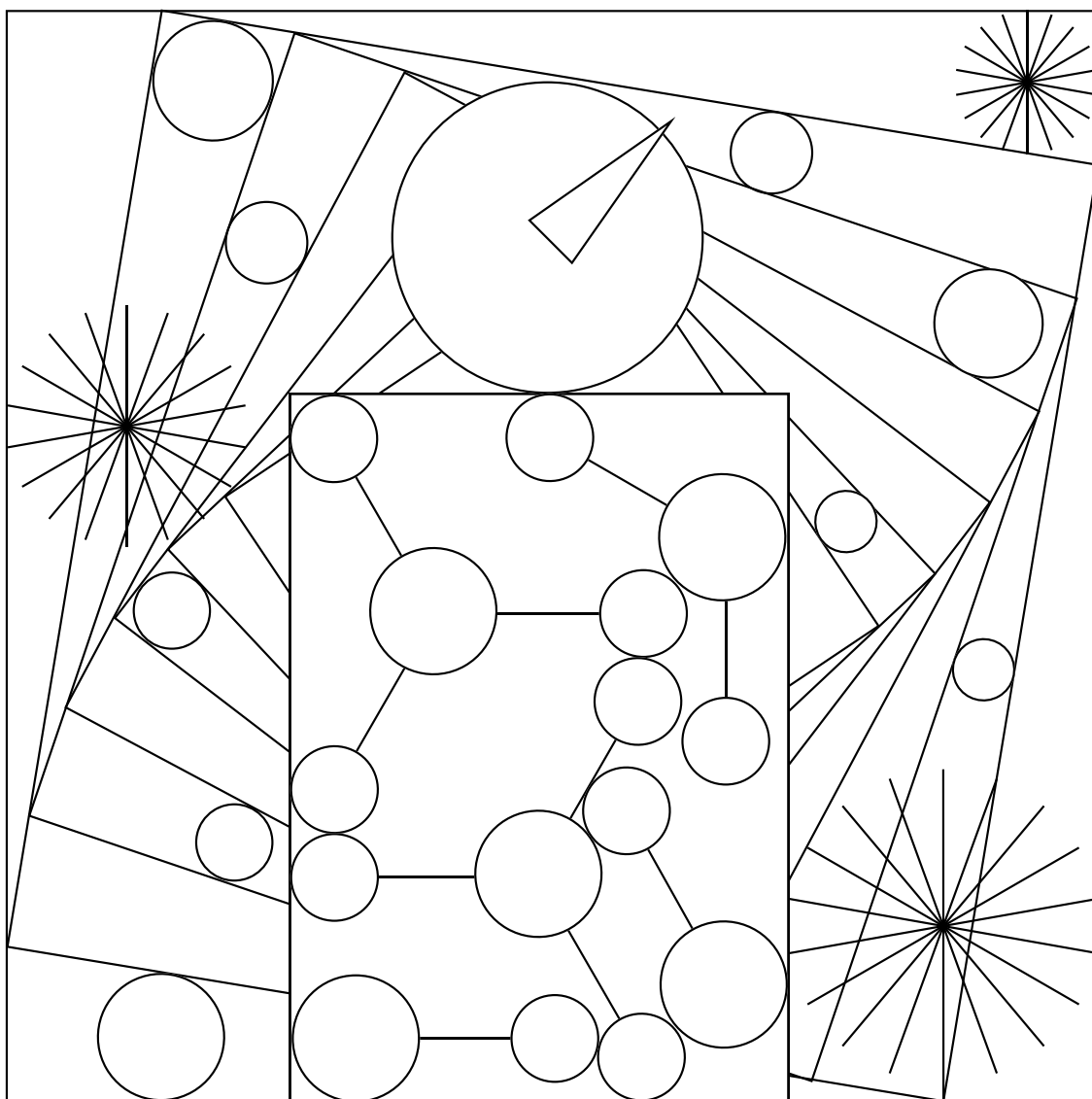
В этом разделе представлены темы исследовательских работ, которые помогут вам погрузиться в изучение интересных и практически значимых аспектов механики. Вы можете выбрать тему, которая вас вдохновляет, либо предложить свою собственную идею. Некоторые проекты предполагают проведение экспериментов и обработку данных, другие – разработку теоретических моделей или выполнение расчетов. Независимо от выбранной темы, ваш проект станет уникальным шагом на пути к освоению профессии инженера.

Помните, что ваш успех в исследовательской работе зависит от четкости постановки задачи, аккуратности выполнения экспериментов, внимательности в расчетах и способности объяснить полученные результаты. Не бойтесь экспериментировать, задавать вопросы и искать ответы. Ведь именно так рождаются настоящие инженерные открытия! **Темы проектных и исследовательских работ к разделу:**

- 1. Исследование влияния электрического поля на движение математического маятника.** В работе предлагается расширить спектр изучаемых полей и по аналогии с работой №2 изучить, влияет ли электрическое поле на движущиеся механические системы.
- 2. Изучение характеристик шаговых двигателей и определение максимального крутящего момента.** Шаговые двигатели - практически главный элемент любого современного робота, ЧПУ станка или 3D принтера. Предлагается изучить строение и принцип работы шагового двигателя, предложить способ определения крутящего момента и выяснить, за счет чего эту величину можно сделать максимально возможной.
- 3. Исследование прочностных характеристик стержневых строительных конструкций (ферм).** В работе необходимо изучить основные принципы проектирования строительных ферм для создания прочных конструкций, таких как мосты или рамы автомобилей. Предлагается изучить разные варианты ферм и выполнить простейшие прочностные расчеты.
- 4. Моделирование работы подшипников и трения в механизмах.** Проект предполагает изучение способов измерения силы трения скольжения и качения для различных материалов, создание собственной модели подшипника и изучение того, как различные смазки влияют на движение такой системы.
- 5. Разработка и исследование модели подъемного крана с оптимизацией механики.** Предлагается исследовать различные виды конструкций подъемных кранов (или кранов для перемещения объектов, например балочных кранов), определить оптимальную конструкцию крана для минимизации усилий и максимальной грузоподъемности, а также создать такую модель для демонстрации.

6. **Исследование влияния формы крыла на подъемную силу.** Оптимизация конструкций крыла имеет свою актуальность не только для разработки летательных аппаратов, но и при разработке ветрогенераторов, турбин, систем вентиляции. Предлагается исследовать как происходит взаимодействие крыла и потока воздуха, а также поработать над эффективностью конструкции крыла.
7. **Разработка и исследование модели энергоэффективного водяного колеса.** Водяные колеса в современных инженерных системах находят активное применение как элементы передачи энергии движущейся жидкости в механическую или электрическую. Ученикам предлагается изучить виды конструкций водяных колес, выполнить расчеты и моделирование и собрать собственную модель гидроэлектростанции на основе собственных разработок.
8. **Создание и исследование модели сейсмографа.** Сейсмографы - крайне важные устройства для областей с повышенной сейсмоактивностью. Предсказание землетрясений дает возможность предотвратить тяжелые катаклизмы. Предлагается изучить строение сейсмографа, а также предложить собственную модель компактного устройства, измеряющего колебания земной поверхности.

3 МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА В НАУКЕ И ИНЖЕНЕРИИ



3.1 Введение

Термодинамика — раздел физики, изучающий тепловые процессы и взаимные преобразования энергии в веществах различной природы. Ее бурное развитие началось в XVII веке в связи с потребностями промышленной революции того времени. Одним из ключевых событий в истории термодинамики стало изобретение парового двигателя. В 1712 году английский изобретатель Томас Ньюкомен создал атмосферный паровой двигатель для откачки воды из шахт. Этот двигатель использовал пар для создания вакуума, поднимающего поршень под действием атмосферного давления.

Хотя конструкция Ньюкомена была примитивной и неэффективной, она заложила основу для дальнейших разработок. В 1769 году шотландский инженер Джеймс Уатт значительно усовершенствовал паровой двигатель, введя отдельный конденсатор для охлаждения пара. Это позволило избежать потерь тепла и повысить КПД машины. Уатт также применил ряд усовершенствований, что расширило применение паровых двигателей в различных отраслях промышленности. Паровые двигатели Уатта стали символом промышленной революции, способствуя развитию транспорта, металлургии и других сфер.

С развитием паровых машин возникла потребность в научном понимании тепловых процессов. Французский инженер Сади Карно в 1824 году опубликовал работу "Размышления о движущей силе огня", где исследовал эффективность тепловых машин. Карно ввел понятие идеального теплового двигателя и описал цикл Карно — теоретический процесс, обладающий максимальной возможной эффективностью. Его работа стала фундаментом второго закона термодинамики, устанавливающего принцип необратимости естественных процессов.

Рудольф Клаузиус и Уильям Томсон (лорд Кельвин) систематизировали знания того времени, сформулировав основные законы термодинамики. Клаузиус ввел понятие энтропии, характеризующей меру беспорядка в системе, и определил, что в замкнутой системе энтропия не может уменьшаться. Лорд Кельвин установил абсолютную шкалу температур и сформулировал второй закон термодинамики в терминах невозможности создания вечного двигателя второго рода. В конце XIX — начале XX веков, благодаря трудам Гиббса и Нернста термодинамика приобрела научную строгость.

Можно сказать, что следующий этап развития тепловых машин — изобретение двигателя внутреннего сгорания (ДВС) — стал возможным благодаря развитию термодинамики. В 1860 году был построен первый двигатель, работающий на газе. В 1876 году немецкий инженер Николаус Отто разработал четырехтактный двигатель, использующий цикл Отто.

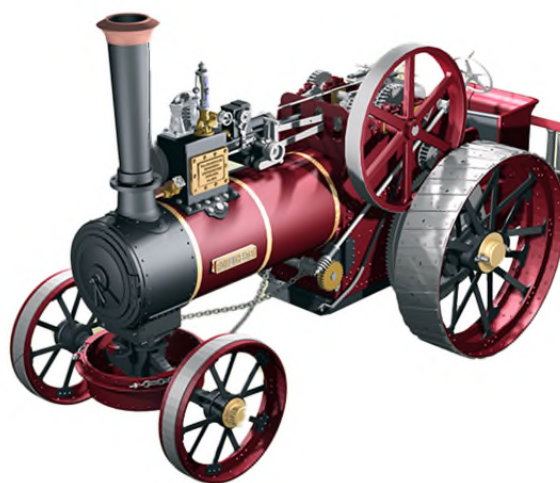


Рис. 3.1: Трактор с паровым двигателем

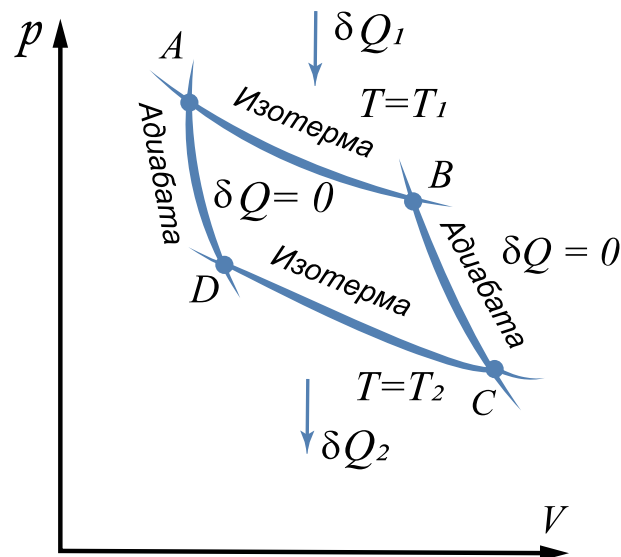


Рис. 3.2: Цикл Карно — изопроцесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат, названный именем открывшего его физика Сади Карно — «фундамент» всех тепловых машин от паровоза и автомобиля до холодильника и кондиционера

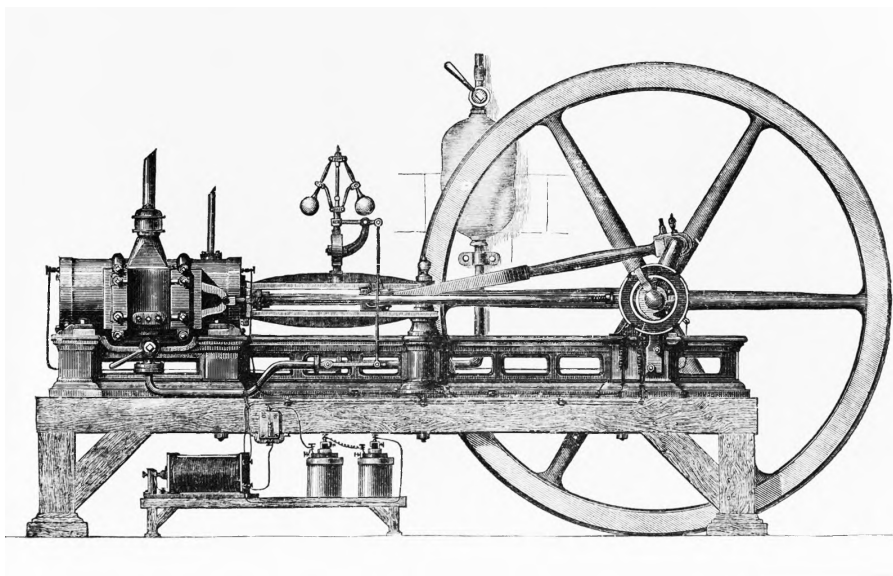


Рис. 3.3: Первый в мире двигатель, работающий на газе — двигатель Ленуара, 1860 г. Принципиальный шаг в развитии двигателестроения после паровых двигателей

Этот цикл включает четыре стадии: впуск топливной смеси, сжатие, рабочий ход сгорания и выпуск отработанных газов. Двигатель Отто стал основой для современных бензиновых двигателей. В 1892 году Рудольф Дизель предложил альтернативный цикл с использованием топлива, с тех пор носящим его имя. В его двигателе топливо впрыскивается в цилиндр с сильно сжатым и нагретым воздухом, где происходит самовоспламенение. Цикл Дизеля характеризуется высоким давлением и температурой, что обеспечивает большую эффективность по сравнению с бензиновыми двигателями. Дизельные двигатели широко используются в грузовом транспорте, кораблестроении и энергетике. В настоящее время разработаны дизельные двигатели, не уступающие бензиновым в мощности и экологичности.

В XX веке развитие термодинамики продолжилось с появлением новых циклов и тех-

нологий. Цикл Брайтона (Джоуля) лег в основу работы газовых турбин и реактивных двигателей, используемых в авиации и энергетике.

Этот цикл включает сжатие воздуха, его нагревание при постоянном давлении, расширение в турбине и выпуск отработанных газов. Исследования в области термодинамики также привели к пониманию процессов охлаждения и созданию холодильных машин. Цикл Ранкина используется в паровых турбинах для выработки электроэнергии на тепловых электростанциях. Современная термодинамика активно изучает процессы в экстремальных условиях, таких как высокие давления и температуры. Это важно для развития ядерной энергетики, материаловедения, изучения планетарных атмосфер и космических исследований.

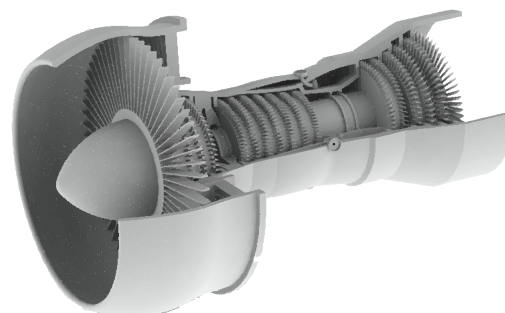


Рис. 3.4: Газовая турбина — основа современной энергетики и авиации

Другим тесно связанным с термодинамикой разделом физики является молекулярно-кинетическая теория (МКТ) — фундаментальное направление, объясняющее макроскопические свойства веществ на основе движения и взаимодействия их микроскопических частиц — атомов и молекул. Идеи о том, что материя состоит из мельчайших неделимых частиц, восходят к древнегреческим философам Левкиппу и Демокриту. Однако научное обоснование этой концепции было разработано лишь в XIX веке.

Даниил Бернулли в 1738 году предложил идею, что давление газа обусловлено ударами его молекул о стенки сосуда. Однако его работа не получила широкого признания. В середине XIX века Джеймс Клерк Максвелл и Людвиг Больцман внесли решающий вклад в развитие МКТ. Максвелл в 1859 году вывел закон распределения скоростей молекул в газе, известный как распределение Максвелла. Он показал, что в равновесном состоянии молекулы газа имеют разный диапазон скоростей, описываемый статистической функцией. Больцман развил эти идеи и сформулировал кинетическую теорию газов, связывая макроскопические параметры, такие как давление и температура, с микроскопическими свойствами молекул.

МКТ дала возможность объяснить законы термодинамики на основе молекулярного строения вещества. Первый закон термодинамики, выражающий закон сохранения энергии, получил микроскопическое обоснование через кинетическую энергию частиц. Второй закон термодинамики, связанный с увеличением энтропии, был объяснен через статистическую вероятность различных микросостояний системы. Таким образом, полуэмпирические термодинамические законы получили фундаментальное объяснение. В настоящее время на основе МКТ и термодинамики построена статистическая механика (или статистическая физика), во многом объединяющая обе теории.

Фазовые переходы — важный аспект, изучаемый в МКТ и термодинамике. При изменении температуры или давления вещество может переходить из одного агрегатного состояния в другое: твердое, жидкое или газообразное. На молекулярном уровне эти переходы связаны с изменением степени свободы движения молекул и сил взаимодействия между ними. Например, при плавлении твердого тела молекулы получают достаточно энергии, чтобы преодолеть жесткую структуру кристаллической решетки и начать двигаться более свободно,

образуя жидкость. При кипении жидкость превращается в газ, когда молекулы имеют достаточную энергию, чтобы преодолеть межмолекулярные силы притяжения и распространиться в пространстве.

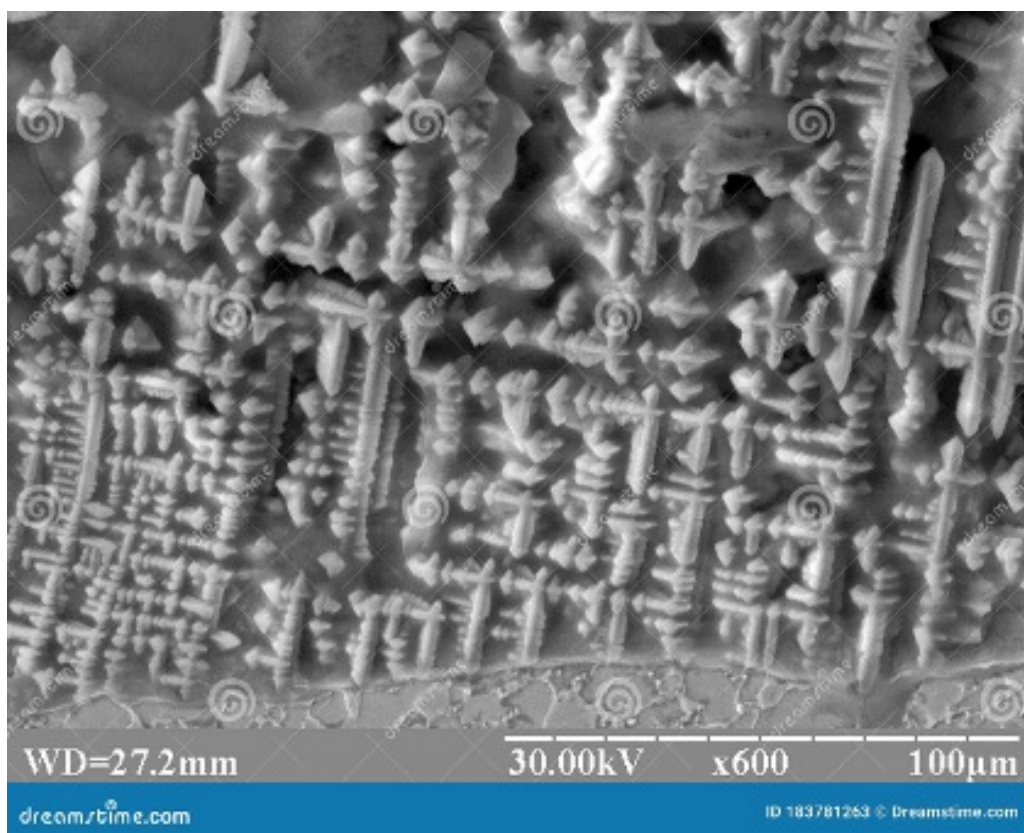


Рис. 3.5: Кристаллы воды, замороженные в вакууме. Изображение с растрового электронного микроскопа. Кристаллизация воды — один из хрестоматийных примеров фазового перехода первого рода. Источник — сайт dreamstime.com.

С термодинамикой и молекулярно-кинетической теорией мы сталкиваемся ежедневно и не только в связи с различными инженерно-техническими устройствами. Свойства воды — уникального вещества, которые имеют решающее значение для жизни на Земле, также изучаются с помощью термодинамики и молекулярно-кинетической теории. Молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода (H_2O). Особенности ее молекулярной структуры приводят к ряду аномалий по сравнению с другими веществами. Во многом вследствие этих аномалий стало возможным появление жизни на Земле.

Так, одним из наиболее известных свойств воды является ее максимальная плотность при $4^{\circ}C$. Это означает, что при охлаждении от $4^{\circ}C$ до $0^{\circ}C$ вода начинает расширяться, а не сжиматься, как большинство веществ. Это связано с образованием водородных связей между молекулами воды, приводящих к формированию открытой кристаллической структуры льда. Расширение воды при замерзании играет ключевую роль в возможности появления жизни. Лед, образующийся на поверхности водоемов, менее плотен и плавает, создавая изолирующий слой, который защищает подводную экосистему от замерзания. Это позволяет водным организмам выживать в холодные зимние месяцы. Кроме этого, вода обладает высокой удельной теплоемкостью, что означает, что она способна поглощать и отдавать большое количество тепла без значительного изменения температуры. Это свойство способствует поддержанию стабильного климата на планете и регулирует температуру в организмах.

Еще одно важное свойство воды — высокая теплота парообразования и плавления. Это означает, что для перехода воды из жидкого состояния в пар требуется большое количество энергии, что играет роль в процессах испарения и конденсации в атмосфере, влияя на погодные условия и климат.

Вода также является универсальным растворителем благодаря своей полярной природе. Она способна растворять множество веществ, что обеспечивает протекание химических реакций в живых организмах. Растворенные вещества транспортируются по организму, участвуют в обмене веществ и других биологических процессах.

Несмотря на кажущуюся простоту молекулы воды, ее свойства и свойства льда до сих пор остаются предметом изучения. Структура льда включает в себя множество различных фаз, зависящих от давления и температуры. Изучение свойств льда важно для понимания процессов в климатологии, гляциологии и планетологии. Ледяные шапки и ледники играют ключевую роль в регулировании климата, отражая солнечную радиацию и влияя на циркуляцию океанических течений. Изменения в ледяном покрове связаны с глобальным потеплением и имеют серьезные последствия для уровня мирового океана и экосистем.

Развитие термодинамики и молекулярно-кинетической теории привели к созданию такой области физики, как гидрогазодинамика, изучающая течение жидкостей и газов при различных условиях. Развитие гидрогазодинамики во многом определило бурный прогресс в XX веке таких областей, как авиа- и кораблестроение.



**Как числовые методы
помогают учебным решить
задачи молекулярной
физики**



Рис. 3.6: Переход от ламинарного (слева) в турбулентному течению в струе жидкости.

Ламинарное течение характеризуется упорядоченным движением слоев жидкости или газа, которые скользят друг относительно друга без перемешивания. Такое течение описывается простыми математическими моделями, такими как уравнение Навье — Стокса при низких числах Рейнольдса. Примером ламинарного течения является медленное течение воды в тонких трубках. Турбулентное течение, напротив, характеризуется хаотическим и непредсказуемым движением с вихрями и завихрениями. Турбулентность возникает при высоких

скоростях или больших масштабах движения и является одной из наиболее сложных проблем в физике жидкостей. Турбулентные потоки наблюдаются в реках, атмосфере и технологических процессах. Переход от ламинарного к турбулентному течению зависит от безразмерного параметра, известного как число Рейнольдса, которое определяется соотношением между инерционными и вязкими силами в потоке. При низких значениях числа Рейнольдса течение остается ламинарным, а при высоких — становится турбулентным. Все эти особенности оказывают непосредственное влияние на речные и океанские суда, на поведение самолетов и даже автомобилей и учитываются в процессе проектирования.

Важной частью гидрогазодинамики является изучение сверхзвуковых течений — движения газов со скоростями, превышающими скорость звука в данной среде. При таких скоростях возникают особые явления, такие как ударные волны и скачки уплотнения. Ударные волны — это тонкие слои, в которых происходит резкое изменение параметров газа: давления, температуры и плотности. В авиации преодоление звукового барьера связано с возникновением ударной волны, создающей значительное сопротивление и звуковой шум. Разработка самолетов, способных летать на сверхзвуковых скоростях, требует учета этих явлений при проектировании аэродинамических форм и материалов. При скоростях, превышающих пять скоростей звука, течения называются гиперзвуковыми. Гиперзвуковые течения характерны для возвращения космических аппаратов в атмосферу и требуют особого внимания из-за экстремальных температур и тепловых нагрузок. Исследования в этой области важны для развития космической техники и гиперзвукового транспорта.



Рис. 3.7: Сверхзвуковое обтекание шара. Видна ударная волна, возникающая перед шаром и ее отражение от плоскости в нижней части фото

Гидрогазодинамика как инженерная отрасль имеет широкое применение. В промышленности она важна для проектирования трубопроводов, насосов и вентиляторов. В метеорологии и климатологии изучение атмосферных течений помогает прогнозировать погоду и понимать климатические процессы. В медицине гидрогазодинамика используется для понимания кровообращения и разработки медицинских устройств. В спортивной индустрии аэродинамика играет роль в улучшении дизайна велосипедов, автомобилей и спортивной одежды для снижения сопротивления воздуха.

В современном научном и технологическом мире термодинамика и молекулярная физика продолжают занимать центральное место в исследованиях и инновациях. С развитием новых материалов, технологий и пониманием фундаментальных процессов эти области фи-

зики решают сложные задачи, стоящие перед человечеством.

Одной из ключевых проблем современности является поиск устойчивых и экологически чистых источников энергии. Термодинамика играет важную роль в оптимизации энергетических систем, таких как солнечные панели, ветрогенераторы и термоэлектрические преобразователи. Исследования направлены на повышение эффективности преобразования энергии и снижение потерь. Также ключевую роль термодинамика играет при разработке и совершенствовании самого безопасного и дешевого на сегодняшний день инструмента получения энергии — атомных станций.

Термодинамика, молекулярно-кинетическая теория и их «старший брат» — статистическая механика — лежат в основе нанотехнологий, позволяя создавать материалы с уникальными свойствами. Наноматериалы, такие как графен и углеродные нанотрубки, обладают высокой прочностью, проводимостью и другими характеристиками. Они находят применение в электронике, медицине и промышленности. Прогресс последних десятилетий в области получения новых сверхпрочных материалов (углеродных волокон и углеродных нанотрубок) позволил вернуться к вопросу создания лунного лифта, до последних лет считавшегося нереализуемым.

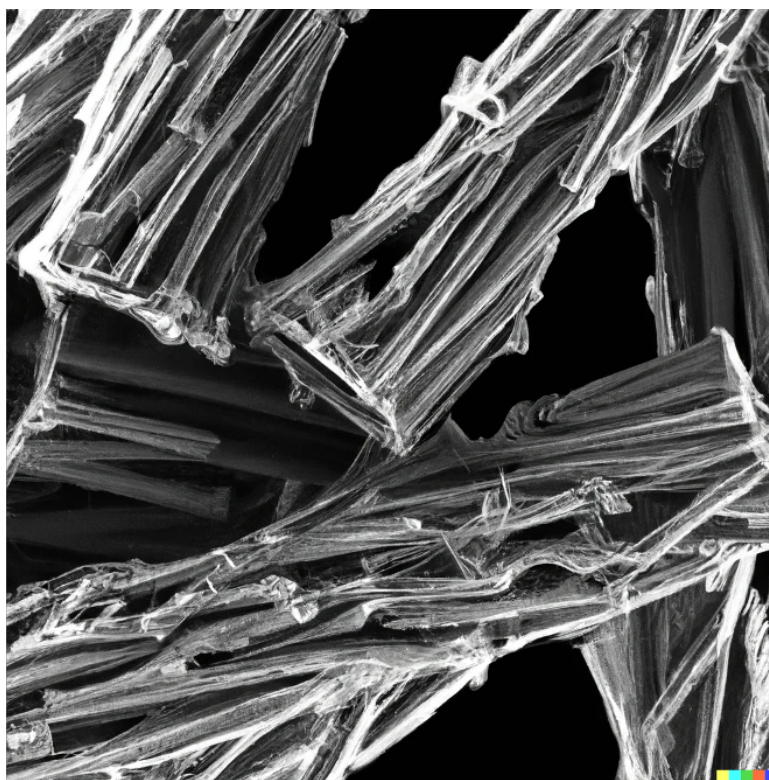


Рис. 3.8: Углеродные нанотрубки. Изображение со сканирующего электронного микроскопа

Слияние термодинамики и квантовой механики привело к развитию квантовой термодинамики, изучающей тепловые процессы в квантовых системах. Это важно для создания квантовых компьютеров, которые обещают революцию в обработке информации. Понимание термодинамических аспектов квантовых систем необходимо для управления декогеренцией и тепловыми флуктуациями.

Термодинамика активно применяется в биофизике для понимания процессов в живых организмах. Исследования биомолекул, таких как белки и ДНК, помогают в разработке новых лекарств и методов лечения заболеваний. Термодинамические принципы используются

для анализа стабильности белков и взаимодействия между молекулами. Изучение термодинамических процессов в атмосфере и океанах важно для прогнозирования климатических изменений и разработки стратегий по снижению негативного воздействия на окружающую среду. Модели глобального климата основаны на понимании теплообмена, гидрогазодинамики и термодинамики.

В космической науке термодинамика и молекулярная физика используются для исследования планет, звезд и галактик. Понимание процессов термоядерного синтеза в звездах, теплообмена в планетарных атмосферах и свойств межзвездного вещества позволяет расширить наши знания о Вселенной. Термодинамика лежит в основе работы многих промышленных процессов, включая химическое производство, металлургию и энергетические системы. Оптимизация этих процессов с точки зрения энергоэффективности и экологичности является актуальной задачей. Узнать подробнее об этом на примере работы газовой центрифуги можно в выпуске Инженерного подкаста по ссылке из QR кода.

Термодинамика и статистическая физика помогают облегчать жизнь и труд человека во многих аспектах. От бытовых приборов, таких как холодильники и кондиционеры, до высокотехнологичных устройств, включая смартфоны и компьютеры, — все это стало возможным благодаря пониманию и применению принципов этих наук. В транспорте улучшение двигателей внутреннего сгорания и разработка электромобилей связаны с термодинамикой. В энергетике возобновляемые источники энергии и системы хранения энергии основаны на термодинамических принципах.

Термодинамика и молекулярная физика продолжают быть двигателями прогресса, позволяя человечеству решать сложные проблемы и стремиться к устойчивому развитию. Они не только расширяют наши фундаментальные знания о природе, но и находят практическое применение, улучшая качество жизни и открывая новые возможности для будущих поколений.

В этом разделе вы познакомитесь со свойствами газов и жидкостей, узнаете немного о понятии вакуума, а также соберете собственное устройство для измерения температуры на основе законов молекулярной физики.



**Газовая центрифуга: мы
вертим весь мир**

3.2 Лабораторная работа №5 Объемное расширение жидкостей

Цель работы: определить коэффициент температурного (объемного) расширения жидкостей.

Введение

Все вещества окружающего нас мира - твердые, жидкие и газообразные, изменяют свои свойства и характеристики при изменении температуры. Это может приводить к изменению агрегатного состояния, электромагнитных, упруго-прочностных и теплофизических свойств.

Для большинства веществ нагревание приводит к увеличению их объема и увеличению линейных размеров. Данный эффект можно объяснить в рамках механической теории теплоты следующим образом. При нагревании скорость движения молекул или атомов вещества увеличивается, а в твердых телах увеличивается амплитуда колебаний атомов относительно их равновесного положения в кристаллической решетке, поэтому в случае постоянного давления пространство между ними увеличивается и вещество расширяется. Однако увеличение объема при увеличении температуры выполняется не для всех веществ. Например, для воды и льда в определенном температурном интервале или для вольфрамата циркония увеличение температуры приводит к уменьшению объема.

Для практики важную роль играет коэффициент температурного расширения. Это связано с условиями работы элементов приборов и установок, которые могут изменять свой линейный размер или объем с изменением температуры эксплуатации. В случае твердых тел обычно используют коэффициент температурного линейного расширения. Это в первую очередь касается материалов с анизотропной структурой, то есть со структурой, например, кристаллической, при которой свойства материала зависят от направления. Для жидкостей и газов в качестве такой характеристики используется коэффициент объемного расширения, который показывает, на какую относительную величину увеличится (при нагреве) или уменьшится (при охлаждении) объем вещества.

Коэффициент объемного расширения β определяется по формуле:

$$\beta = \frac{1}{V_0} \left(\frac{\Delta V}{\Delta T} \right)_p,$$

где V_0 – начальный объем жидкости, ΔV – изменение объема жидкости при изменении температуры на ΔT , индекс p обозначает, что измерения проводятся при постоянном давлении.

Изменение объема или линейного размера проводят с использованием специального оборудования – дилатометра. При измерениях для получения результатов с высокой точностью необходимо термостатирование системы, учет коэффициента температурного расширения элементов прибора и вибрации.

Описание установки

Приборы и принадлежности: термостойкий мерный стакан или колба, емкость для холодной воды, линейка, штангенциркуль, термометр, маркер (с толщиной линии не более 1 мм), секундомер, пищевой краситель (рекомендуется).

Рекомендуется в качестве мерного стакана взять мерную колбу или пробирку, малого диаметра (но не капилляр) чтобы изменение уровня жидкости было заметно. Можно воспользоваться пищевым красителем для окрашивания воды в яркий цвет, что позволит более точно снимать показания уровня.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Измерение изменения объема воды при изменении температур

1. Измерить штангенциркулем внутренний диаметр мерного стакана.
2. Залить в мерный стакан горячую воду.
3. Измерить температуру и отметить тонким маркером уровень воды.
4. Поставить мерный стакан в емкость и залить в нее холодную воду.
5. Повторить измерения температуры и отметить маркером уровень воды через 5, 15 и 30 минут после первого измерения.
6. Слить воду.
7. Определить изменение уровня после 5, 15 и 30 минут относительно первой отметки. Заполнить таблицу 3.1.

Таблица 3.1: Экспериментальные данные

Время, мин	Температура, °C	Изменение уровня, мм
5		
15		
30		

Задание 2. Рассчитать коэффициент объемного расширения

1. Определить изменение объема воды ΔV по изменению уровня.
2. Построить график изменения объема воды от температуры.
3. Определить коэффициент объемного расширения для трех разностей температур β_i .

4. Определить коэффициент объемного расширения β и его погрешность по результатам трех измерений.

Расчетные формулы:

$$\Delta V = \Delta h \cdot S,$$

где Δh – изменение уровня, S – площадь внутреннего сечения стакана.

$$\beta_i = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V_i}{\Delta T_i}$$

$$\bar{\beta} = \frac{\sum_i \beta_i}{N}, \quad \delta\beta = \sqrt{\frac{\left(\sum_i (\beta_i - \bar{\beta})^2\right)}{(N-1)}},$$

где N – число измерений.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение коэффициента объемного расширения.
2. Может ли быть коэффициент объемного расширения отрицательным?
3. Как называется прибор для определения коэффициента температурного расширения?
4. Перечислите факторы, влияющие на точность определения коэффициента объемного расширения.

Литература

1. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. – 8-е изд., перераб. и испр. – М.: ООО «Издательство Оникс»: ООО «Издательство «Мир и Образование», 2006.
2. Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. – 3-е изд. – М. : Советская энциклопедия, 1969-1978.
3. Громов И.В. «Общая физика: термодинамика». – М.: Наука, 2015.
4. Савельев И.В. «Курс общей физики. Том 1: Механика и молекулярная физика». – М.: Физматлит, 2020.
5. Ландсберг Г.С. «Основы термодинамики и молекулярной физики». – М.: Высшая школа, 2018.
6. Методические указания для выполнения лабораторных работ по молекулярной физике. – М.: МИФИ, 2021.

3.3 Лабораторная работа №6 Кипение воды при пониженном давлении

Цель работы: демонстрация зависимости температуры кипения воды от внешнего давления, измерение зависимости температуры кипения от атмосферного давления.

Введение

Кипение воды и других жидких веществ представляет собой процесс перехода жидкости в газообразное состояние за счет парообразования (образования и роста пузырьков пара в жидкости) и называется фазовым переходом. Внешние условия оказывают непосредственное влияние на начало и процесс кипения. Так, уменьшение внешнего давления приводит к уменьшению температуры кипения жидкости.

Этот, казалось бы, чисто научный факт на самом деле может оказывать непосредственное влияние на жизнь человека. Например, при подъеме в горы температура кипения может меняться настолько, что температурную обработку некоторых продуктов приходится делать на протяжении гораздо большего времени, чем мы привыкли. Так, при подъеме на 3000 метров над уровнем моря (такая высота, например, легко достигается на курортах Приэльбрусья) температура кипения воды падает на 10 градусов и составляет 90 градусов Цельсия. На высоте 6000 метров температура кипения составляет 80 градусов, что делает бессмысленным попытки заварить чай на такой высоте.

Физически зависимость температуры кипения от внешнего давления обусловлена тем, что вблизи поверхности жидкости всегда устанавливается равновесие между жидкостью и газом над ней (так называемый насыщенный пар). Температура кипения жидкости определяется как температура, при которой давление насыщенного пара жидкости становится равным внешнему давлению. Эта зависимость описывается уравнением Клапейрона-Клаузиуса, которое для малых интервалов температур можно представить в виде:

$$\ln P = -\frac{\Delta H_{\text{ф.п.}}}{R} \cdot \frac{1}{T} + C,$$

где:

- P — давление насыщенного пара,
- T — абсолютная температура (в Кельвинах),
- $\Delta H_{\text{ф.п.}}$ — удельная теплота испарения жидкости,
- R — универсальная газовая постоянная ($R \approx 8.31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$),
- C — постоянная, зависящая от природы жидкости.

Давление насыщенного пара определяется температурой, однако при уменьшении внешнего давления микропузырьки пара, непрерывно образующиеся в воде и имеющие давление, равное давлению насыщенного пара, всплывают при более низкой температуре за счет силы Архимеда. Поэтому кипение при уменьшении давления начинается при более низких температурах.

Описание установки

Приборы и принадлежности: вакуумная камера с манометром (из набора лабораторного по исследованию атмосферного давления), шприц пластиковый, вакуумный шланг, пластиковый контейнер, нагреватель для жидкости, термометр, тряпка или салфетка для очистки камеры.

В вакуумную камеру устанавливается невысокая емкость, в которую будет наливаться вода. После помещения воды внутрь камеры она закрывается и откачивается для проведения измерений давления. После проведения измерений камера очищается от остатков конденсата с помощью тряпки или салфетки. Камеру необходимо очищать перед каждым новым измерением. Температура воды измеряется с помощью термометра перед началом измерений. Остывание воды – быстрый процесс, в связи с чем откачку следует производить без задержек.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Подготовка к измерениям

1. Подготовить вакуумную камеру для измерений. Проверить плотность прилегания уплотнительной резинки и манометра. Закрыть вакуумную камеру.
2. Подключить шприц для откачки воздуха, проверить откачивающую способность шприца.
3. Откачать из вакуумной камеры газ до давления -400 гПа.
4. Проверить герметичность вакуумной камеры.
5. Открыть клапан и привести давление в вакуумной камере в соответствие с атмосферным.
6. Нагреть воду до температуры 80°C .

Задание 2. Демонстрация зависимости температуры кипения воды от внешнего давления

1. Налить нагретую до 80°C воду в пластиковый контейнер.
2. Поместить пластиковый контейнер в вакуумную камеру.
3. Закрыть вакуумную камеру.
4. С помощью шприца произвести откачку воздуха из вакуумной камеры до начала процесса кипения и появления пузырьков в воде.
5. В случае необходимости подождать несколько минут до прекращения процесса кипения ввиду остывания воды и повторить пункт 4.

Задание 3. Измерение зависимости температуры кипения воды от давления в камере

1. Подготовить таблицу для проведения измерений (таблица [3.2](#))

Таблица 3.2: Зависимость температуры кипения от атмосферного давления

$T_{\text{воды}}, ^\circ C$				
$P_1, \text{гПа}$				
$P_1, \text{гПа}$				
$P_1, \text{гПа}$				
$P_{\text{сред}}, \text{гПа}$				

- Нагреть воду до $100^\circ C$. Налить воду в пластиковый контейнер, измерить температуру. Поместить пластиковый контейнер в вакуумную камеру.
- Плотно закрыть вакуумную камеру.
- С помощью шприца произвести откачку воздуха из вакуумной камеры до начала процесса кипения и появления пузырьков в воде. Измерить давление в камере в момент начала кипения. Откачку следует производить быстро, в связи с интенсивным процессом охлаждения воды.
- Повторно вскипятить воду и повторить эксперимент минимум 2 раза. Посчитать среднее значение давления в камере при выбранной температуре жидкости.
- Повторить эксперимент для трех дополнительных температур воды в диапазоне $100 - 75^\circ C$.
- Построить график зависимости температуры кипения воды от давления в камере. Нанести на график теоретические значения для давления и сравнить экспериментальные значения с теоретическими.

Таблица 3.3: Зависимость температуры кипения от атмосферного давления (теоретическая)

$P, \text{кПа}$	101,3	98,07	88,26	78,45	68,65	58,84	49,03	39,23	29,42	19,61
$T_{\text{кип}}, ^\circ C$	100	99,09	96,18	92,99	89,45	85,45	80,86	75,42	68,68	59,67

- Сделать вывод о том, как зависит температура кипения жидкости от давления, а также о методике проведения эксперимента.

Задание 4. Изучение зависимости температуры кипения соленой воды от концентрации соли в растворе

- Нагреть воду до $100^\circ C$.
- Подготовьте солевой раствор, добавив 80 г поваренной соли в 500 мл воды. Залить готовый раствор в пластиковый контейнер. Измерить температуру раствора.

3. Поместить пластиковый контейнер в вакуумную камеру.
4. Плотнo закрыть вакуумную камеру.
5. С помощью шприца произвести откачку воздуха из вакуумной камеры до начала процесса кипения и появления пузырьков в воде. Измерить давление в камере в момент начала кипения.
6. Сравнить полученные данные с результатами предыдущего эксперимента.
7. Увеличить концентрацию соли в 4 раза и повторить эксперимент. Изменилась ли температура кипения после добавления соли в раствор?

Контрольные вопросы

1. Как изменяется температура кипения воды при понижении внешнего давления?
2. Чем обусловлена зависимость температуры кипения воды от внешнего давления?

Литература

1. Громов И.В. «Общая физика: термодинамика». — М.: Наука, 2015.
2. Савельев И.В. «Курс общей физики. Том 1: Механика и молекулярная физика». — М.: Физматлит, 2020.
3. Ландсберг Г.С. «Основы термодинамики и молекулярной физики». — М.: Высшая школа, 2018.
4. Левин И.М. «Физические основы метрологии». — М.: Издательство стандартов, 2017.
5. Методические указания для выполнения лабораторных работ по молекулярной физике. — М.: МИФИ, 2021.

3.4 Лабораторная работа №7 Изотерма идеального газа

Цель работы: измерение зависимости давления от объема при постоянной температуре (изотермы) для воздуха.

Введение

Множество газообразных веществ, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, можно приближенно описать законом Клапейрона-Менделеева. Относится к таким веществам и воздух при атмосферном давлении и давлениях несколько ниже атмосферного. Применимость такой простой модели обусловлена тем, что при нормальных условиях и давлениях ниже атмосферного молекулы газа находятся на таких расстояниях и движутся с такими скоростями, при которых взаимодействием молекул можно пренебречь. Отклонения от уравнения Клапейрона-Менделеева возникают при высоких давлениях или низких температурах недалеко от точки конденсации, когда становятся важными процессы образования зародышей новой фазы (конденсации или десублимации).

В настоящей лабораторной работе мы на практике убедимся, что закон Клапейрона-Менделеева применим для описания свойств воздуха при комнатной температуре и давлениях ниже атмосферного. Для удобства расчетов уравнение Клапейрона-Менделеева запишем в виде:

$$p = \frac{N}{V}kT,$$

где: p — давление, N — число частиц, V — объем, k — постоянная Больцмана, T — температура. Считая температуру и объем постоянными и измеряя давление и число частиц в некотором сосуде, можно убедиться в прямой пропорциональности между этими величинами.

Описание установки

Приборы и принадлежности: вакуумная камера с манометром, шприц пластиковый, вакуумный шланг.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Подготовка к измерениям

1. Закрыть вакуумную камеру.
2. Проверить откачивающую способность шприца.
3. Откачать из вакуумной камеры газ до давления ~ 400 гПа.
4. Проверить герметичность вакуумной камеры.

5. Открыть клапан и привести давление в вакуумной камере в соответствие с атмосферным.
6. Измерить высоту и диаметр вакуумной камеры.
7. Вычислить объем вакуумной камеры.
8. Измерить комнатную температуру.
9. Измерить атмосферное давление.
10. Используя изотерму идеального газа, вычислить число частиц в вакуумной камере.
11. Записать результаты измерений в таблицу 3.4.
12. Вычислить объем вакуумного шланга.

Задание 2. Измерение изотермы для воздуха

1. Закрыть вакуумную камеру.
2. Откачать примерно 100 мл воздуха из вакуумной камеры. **Внимание!** Объем откачки определяется **суммарным** объемом воздуха в шприце и вакуумном шланге.
3. Закрыть вакуумную камеру.
4. Измерить с помощью манометра давление в вакуумной камере.
5. Записать измеренные величины в таблицу 3.4.
6. Повторить пункты 2-5 пять раз.

Таблица 3.4: Экспериментальные данные

Откачанный объем, мл	Давление в камере, Па	Число частиц в камере
0		

Задание 3. Обработка результатов измерений

1. Для каждого выполненного измерения вычислить число частиц, оставшееся в вакуумной камере после откачки.

2. Построить график зависимости давления в вакуумной камере от числа частиц в ней.
3. Сделать выводы о характере зависимости давления от числа частиц.

Расчетные формулы

$$N_k = N_{k0} \left(1 - \frac{V_{\text{ш}}}{V_{\text{к}}} \right),$$

где:

- N_{k0} — число частиц в камере до проведения измерения,
- N_k — число частиц в камере после проведения измерения,
- $V_{\text{ш}}$ — объем вакуумного шланга,
- $V_{\text{к}}$ — объем вакуумной камеры.

Контрольные вопросы

1. Что такое идеальный газ?
2. Напишите уравнение состояния идеального газа в трех различных формах.
3. Какими физическими причинами обусловлено отклонение свойств газа от закона Клапейрона-Менделеева?

Литература

1. Громов И.В. «Общая физика: термодинамика». — М.: Наука, 2015.
2. Савельев И.В. «Курс общей физики. Том 1: Механика и молекулярная физика». — М.: Физматлит, 2020.
3. Ландсберг Г.С. «Основы термодинамики и молекулярной физики». — М.: Высшая школа, 2018.
4. Левин И.М. «Физические основы метрологии». — М.: Издательство стандартов, 2017.
5. Методические указания для выполнения лабораторных работ по молекулярной физике. — М.: МИФИ, 2021.

3.5 Лабораторная работа №8 Изучение газового термометра

Цель работы: изучение принципа работы газового термометра, изготовление модели газового термометра и его калибровка.

Введение

Газовый термометр — это прибор для измерения температуры, в котором используется зависимость давления или объёма газа от температуры при фиксированном объёме или давлении. Принцип работы газового термометра основан на уравнении состояния идеального газа:

$$pV = \nu RT,$$

где:

- p — давление газа,
- V — объём газа,
- ν — количество вещества газа,
- R — универсальная газовая постоянная,
- T — абсолютная температура.

Основные типы газовых термометров

1. **Термометр постоянного объёма.** Давление газа измеряется при неизменном объёме. Температура определяется из линейной зависимости давления от температуры:

$$T = \frac{p}{p_0} T_0,$$

где p_0 и T_0 — давление и температура при некоторой эталонной точке.

2. **Термометр постоянного давления.** Объём газа изменяется при постоянном давлении, и температура пропорциональна объёму.

Преимущества

- Высокая точность измерений в широком диапазоне температур.
- Часто используется как эталонный прибор в метрологии.

Недостатки

- Зависимость от условий эксперимента (например, утечка газа может повлиять на результат).
- Ограничение при высоких давлениях или низких температурах (где отклонения газа от идеальности становятся значительными).



Рис. 3.9: Промышленный газовый термометр

Газовые термометры используются в различных областях науки, техники и метрологии благодаря их высокой точности и стабильности. Они являются важным инструментом для измерения температуры, особенно в случаях, где требуется эталонное измерение. Рассмотрим ключевые области применения и примеры реальных установок.

Газовые термометры широко применяются в метрологических институтах для калибровки других типов термометров, включая жидкостные, термоэлектрические и инфракрасные. Например, Международное бюро мер и весов (BIPM) использует газовые термометры для определения и поддержания международной температурной шкалы (ITS-90). Газовые термометры постоянного объёма применяются для измерения температуры в диапазоне от 13.81 K (тройная точка водорода) до 1235.08 K (температура плавления серебра).

В полупроводниковой промышленности контроль температуры является ключевым фактором для создания высококачественных микросхем. Газовые термометры применяются в производственных установках для точного мониторинга температуры в вакуумных камерах и печах. Например, системы для осаждения тонкоплёночных материалов (PVD и CVD) используют газовые термометры в сочетании с другими сенсорами для достижения стабильной температуры.

В металлургической и химической промышленности газовые термометры используются для измерения высоких температур в плавильных печах и реакторах. Например, системы контроля температуры в производстве стекла или стали требуют точных измерений в диапазоне от 1000 до 1500 °C. Газовые термометры с инертными газами, такими как аргон, применяются в таких условиях, поскольку они остаются стабильными даже при экстремальных температурах.

Современные исследования квантовых материалов, включая топологические изоляторы и сверхпроводники, требуют точного контроля температуры для изучения их свойств. Газовые термометры используются в низкотемпературных установках, таких как разбавляющие криостаты, где температуры опускаются до нескольких миллиКельвинов. Это позволяет учёным наблюдать явления, которые возникают только при экстремально низких температурах. Одной из ключевых установок является газовый термометр постоянного объёма, ис-

пользуемый в криостатах для измерения температуры ниже 4 К. В таких системах термометр подключается к замкнутому объёму, заполненному гелием, и к высокочувствительному манометру. Такая установка широко используется в исследованиях свойств квантовых жидкостей, таких как жидкий гелий-3.

Газовые термометры занимают ключевое место в науке и технике благодаря их универсальности и высокой точности. Они используются как эталонные приборы, а также в специализированных установках для фундаментальных исследований и точных технологических процессов. Примеры реальных установок, таких как криостаты или вакуумные системы, подчёркивают их незаменимость в задачах, требующих высокоточного контроля температуры.

Описание установки

Приборы и принадлежности: газовый термометр, термометр для измерения температуры воды, манометр, резервуар с водой, нагреватель, хронометр, миллиметровая бумага или компьютер с программным обеспечением для построения графиков.

Экспериментальный стенд включает следующие элементы:

1. **Газовый термометр постоянного объёма** —сосуд с газом, соединённый с манометром для измерения давления. В нашем случае в качестве газа будет использоваться воздух.
2. **Термостат** —устройство для создания стабильной температуры (например, водяная баня) или калориметр.
3. **Резервуар с водой** —для изменения температуры газа.
4. **Манометр** —прибор для измерения давления газа.
5. **Измерительная линейка** —для определения уровня жидкости (если используется открытый манометр).

Газовый термометр может быть собран из готового металлического шара с точкой подключения манометра, так и самостоятельно с помощью стеклянной колбы с крышкой и жидкостного манометра.

Порядок выполнения работы

Задание 1: Определение температуры газа при различных условиях

1. Подготовьте экспериментальный стенд: соедините сосуд с манометром, подготовьте резервуар для воды.
2. Установите термометр в резервуар с водой при комнатной температуре.
3. Зафиксируйте показания манометра и термометра для воды.
4. Повторите измерения при нагревании воды до разных температур (например, 40 °С, 60 °С, 80 °С).

Таблица 3.5: Экспериментальные данные

№	Температура воды, °C	Давление газа, Па
1		
2		
3		
4		
5		
6		

5. Заполните таблицу:

Задание 2: Построение графика зависимости давления от температуры

1. На основе данных, полученных в Задании 1, переведите температуры воды из градусов Цельсия в Кельвины:
2. Постройте график зависимости давления от температуры .
3. Проведите линейную аппроксимацию графика и определите наклон прямой , связанный с количеством вещества газа и объёмом.

Задание 3: Расчёт абсолютного нуля температуры

1. Используйте график из Задания 2.
2. Экстраполируйте линию зависимости до пересечения с осью и определите значение, соответствующее .
3. Сравните полученный результат с теоретическим значением абсолютного нуля температуры (-273.15 C).

Контрольные вопросы

1. Какое физическое уравнение лежит в основе работы газового термометра?
2. Почему в газовом термометре предпочтительно использовать низкую плотность газа?
3. Объясните, как изменяется давление газа при нагревании в системе с постоянным объёмом.
4. Как экспериментально определить абсолютный нуль температуры с помощью газового термометра?
5. Какие факторы могут влиять на точность измерений при использовании газового термометра?

Литература

1. Громов И.В. «Общая физика: термодинамика». — М.: Наука, 2015.
2. Савельев И.В. «Курс общей физики. Том 1: Механика и молекулярная физика». — М.: Физматлит, 2020.
3. Ландсберг Г.С. «Основы термодинамики и молекулярной физики». — М.: Высшая школа, 2018.
4. Левин И.М. «Физические основы метрологии». — М.: Издательство стандартов, 2017.
5. Методические указания для выполнения лабораторных работ по молекулярной физике. — М.: МИФИ, 2021.

3.6 Проектные и кейсовые задания

3.7 Кейс №2 Термодинамические характеристики двигателя Стирлинга

1.Актуальность

Двигатель Стирлинга — это тепловой двигатель, который работает за счёт циклического нагрева и охлаждения газа внутри замкнутого пространства. Он был изобретён в 1816 году шотландским инженером Робертом Стирлингом. Основная особенность двигателя Стирлинга заключается в том, что он использует внешние источники тепла, например, солнечное излучение, горение топлива или даже тепло от отходов производства. Принцип работы двигателя основан на изменении объёма газа под действием температуры. Газ нагревается, расширяется, затем охлаждается и сжимается, создавая рабочее движение. Этот процесс происходит в четырёх этапах: нагрев, расширение, охлаждение и сжатие. Двигатель Стирлинга считается экологически чистым и эффективным, так как может работать на возобновляемых источниках энергии и производит меньше вредных выбросов, чем двигатели внутреннего сгорания.

Преимущества ДС: высокий КПД, диапазоны температур, разнообразие видов топлива и т.п. **Недостатки:** инертность, внешний источник тепла и т.п.

ДС относится к классу двигателей с внешним подводом тепла. Повышение эффективности достигается за счет использования регенератора — системы удержания тепла в основной части двигателя при охлаждении рабочего тела.

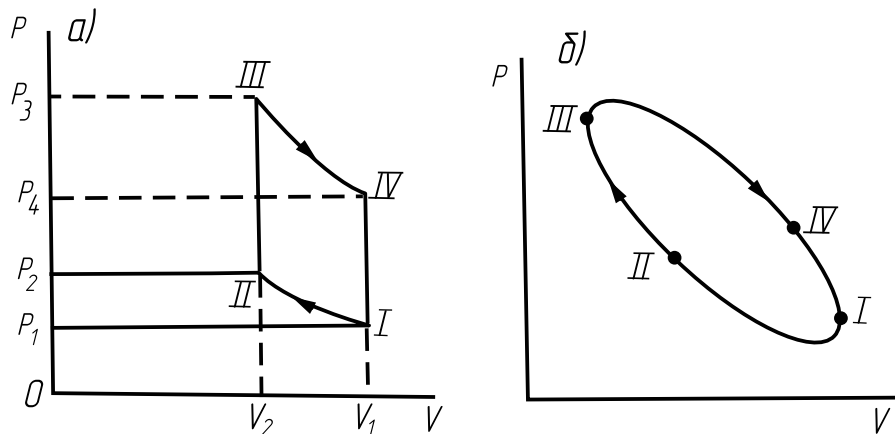
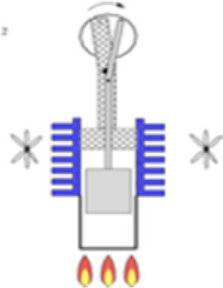
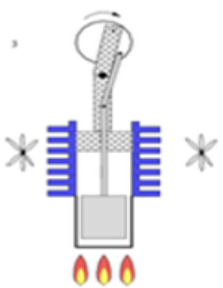
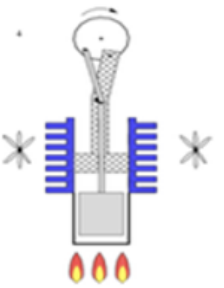
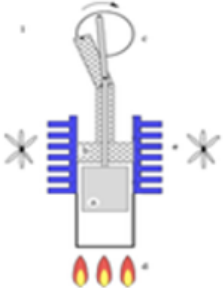


Рис. 3.10: PV -диаграмма двигателя Стирлинга: а) теория; б) эксперимент.

Внешний источник тепла нагревает газ в нижней части теплообменного цилиндра. Давление толкает рабочий поршень вверх	Маховик перемещает вытеснительный поршень вниз и вытесняет разогретый воздух из нижней части в охлаждающую камеру.	Воздух остывает и сжимается, рабочий поршень опускается вниз.	Вытеснительный поршень поднимается и втягивает охлаждённый воздух в нижнюю часть.
			

2. Этапы работы

Задание 1. Теоретическая подготовка

1. Изучить физические принципы и конструкции ДС.
2. Изучить литературу.
3. Провести расчет конструкции ДС (пример в приложении) и режимов работы.

Задание 2. Провести измерения и расчет термодинамических характеристик ДС

1. Подготовить чертежи и напечатать на 3D-принтере комплектующие.
2. Собрать действующую модель ДС с использованием имеющегося оборудования.
3. Подготовить измерительное оборудование.
4. Разработать методику проведения эксперимента.
5. Измерить температуру, давление и объем рабочего газа в ДС в различные моменты цикла движения.
6. Определить мощность нагревательного элемента.
7. Рассчитать КПД ДС.

Расчетные формулы

$RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$ – Изотермическое расширение

$C_V (T_2 - T_1)$ – Изохорное охлаждение

$RT_2 \ln \frac{1}{n}$ – Изотермическое сжатие

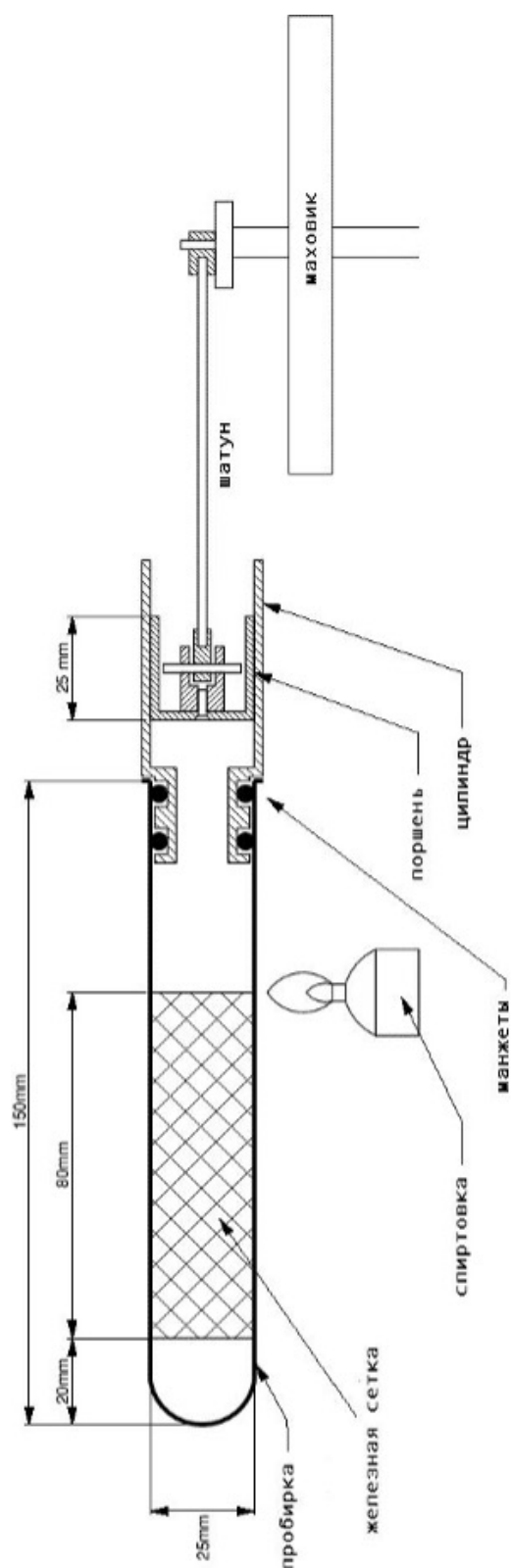


Рис. 3.11: Схематическое изображение двигателя Стирлинга

$C_V (T_1 - T_2)$ – Изохорный нагрев

$R (T_1 - T_2) \ln n$ – Полная работа за цикл

$RT_1 \ln n + C_V (T_1 - T_2)$ – Полученное тепло

$$\frac{R(T_1 - T_2) \ln n}{RT_1 \ln n + C_V(T_1 - T_2)} - \text{Коэффициент полезного действия}$$

3. Примерный перечень средств и материалов для выполнения задания

1. манометр
2. термометр (до 100 °С или больше)
3. Источник тепла - термостат с горячей водой, свечка, горелка и т.п.
4. Модель двигателя Стирлинга

4. Требования к предоставлению решения задания

По итогам выполнения кейсовой задачи оформляется отчет о работе проектной команды, включающий в себя как разработанные системы и устройства, так и корректно оформленную документацию по кейсу. Документация в обязательном порядке должна включать в себя:

1. Титульный лист (школа, авторы, название кейса, название команды, руководитель).
2. Описание команды, распределение ролей, функций и обязанностей каждого участника команды.
3. Теоретическое Введение. В разделе «Введение» обосновывается Актуальность исследования, формулируются цель и задачи работы, а также предоставляется краткий литературный обзор темы исследования.
4. Методику проведения исследования. В разделе «Методика исследования» описывается порядок выполнения экспериментов, экспериментальная установка, приводится ее схема, указываются расчетные формулы, использованные для обработки полученных данных, а также приводится описание методики оценки погрешностей экспериментальных результатов.
5. Результаты проведенного исследования. В разделе «Результаты» необходимо представить полученные данные, а также результаты их обработки в виде таблиц и/или графиков, привести интерпретацию и физическое объяснение результатов. Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и подписаны.
6. Разработанные 3D-модели в форматах .obj, .stl или .step, скриншоты разработанных 3D-моделей (как системы в целом, так и отдельных ее частей, при наличии). 3D-модели должны находиться в репозитории проекта в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.).
7. Описание схемы разработанной установки в виде изображений общей схемы установки, электрической принципиальной схемы, монтажной схемы, оптической схемы (если имеется) и т.д.

8. В случае разработки программного обеспечения, должен быть приведен алгоритм его работы в виде блок-схем.
9. Код разработанного программного обеспечения должен быть представлен в виде ссылки на репозиторий проекта с кодом в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.). Любые архивы с загруженными исходными кодам (.zip, .rar и т.п.) загружать в другие хранилища данных запрещается.
10. Фотографии разработанной установки и ее составных частей.
11. Видеоролик, демонстрирующий выполнение экспериментальных измерений в соответствии с требованиями кейса. На видео необходимо продемонстрировать прохождение каждого, описанного в задании, эксперимента или отдельных его частей. Видео с проведенным экспериментом должно однозначно подтверждать авторство участников (во время записи ролика необходимо четко произнести название команды, ФИО участников, номер школы, ФИО руководителя). Видеоролик располагается на стороннем видеохостинге (ВКонтакте, Rutube и др.), ссылка на видеоролик располагается в репозитории в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.). Весь эксперимент, от подготовки к работе до завершения последнего этапа, должен быть записан на видео одним дублем без склейки и монтажа. В течении всего видео в кадре должны быть разработанная командой установка и как минимум один из участников команды, выполняющий все операции с ней. Вход и выход участников, передача инструмента, деталей и других вещей из кадра недопустимо. Допускается использование второй камеры для более детализированной демонстрации ключевых моментов. Видео должно быть со звуком, на котором отчетливо слышны подаваемые голосовые команды и действия команды. На видеозаписи должно быть хорошо различимы все элементы, влияющие на оценивание результативности. В случае, если эксперты не смогут по видеозаписи однозначно понять результат выполнения задания, принимается решение не в пользу участника.
12. Заключение, включающее краткое изложение результатов работы, подведение итогов исследования, обсуждение его практической и теоретической значимости. Также могут быть предложены дополнительные направления исследований.
13. Список литературных источников. В этом разделе приводится список использованных источников, статей, книг и другой литературы, на которые ссылается исследование. Кроме того, работа может содержать приложения с иллюстративным материалом (рисунки, схемы, таблицы, фотографии и т. п.). На каждое приложение должна быть дана ссылка в тексте работы.

5. Список рекомендуемой литературы

1. Двигатели Стирлинга / Г. Ридер, Ч. Хупер, «Мир» М. 1986 г.
2. Машины, работающие по циклу Стирлинга / Уокер Г. М.: Энергия, 1978.

3.8 Темы проектно-исследовательских работ для самостоятельного изучения

Вы проделали большой путь в изучении молекулярной физики. Выполняя лабораторные работы и кейсовые задания, вы исследовали, как поведение молекул определяет свойства газов, жидкостей и твердых тел, узнали, что такое теплоемкость, давление, энергия и энтропия. Вы разобрались, как физические законы работают на уровне мельчайших частиц вещества, и увидели, как эти знания помогают инженерам разрабатывать технологии будущего. Теперь настало время углубить свои знания и применить их для решения самостоятельных задач.

Каждая тема, предложенная в этом разделе, поможет вам увидеть молекулярную физику не просто как набор формул и законов, а как ключ к пониманию мира вокруг нас. Вам предстоит ставить гипотезы, проектировать эксперименты, собирать и анализировать данные, делать выводы. Это не только интересно, но и полезно – именно так работают ученые и инженеры, создавая новые технологии и совершенствуя наше будущее.

Вы можете выбрать одну из предложенных тем или предложить свою собственную. Главное – выбрать то, что вам действительно интересно, ведь только увлечение процессом превращает сложную задачу в захватывающее исследование. Возможно, ваш проект приведет вас к новым открытиям, которые однажды станут основой новых технологий, или просто поможет глубже понять законы природы.

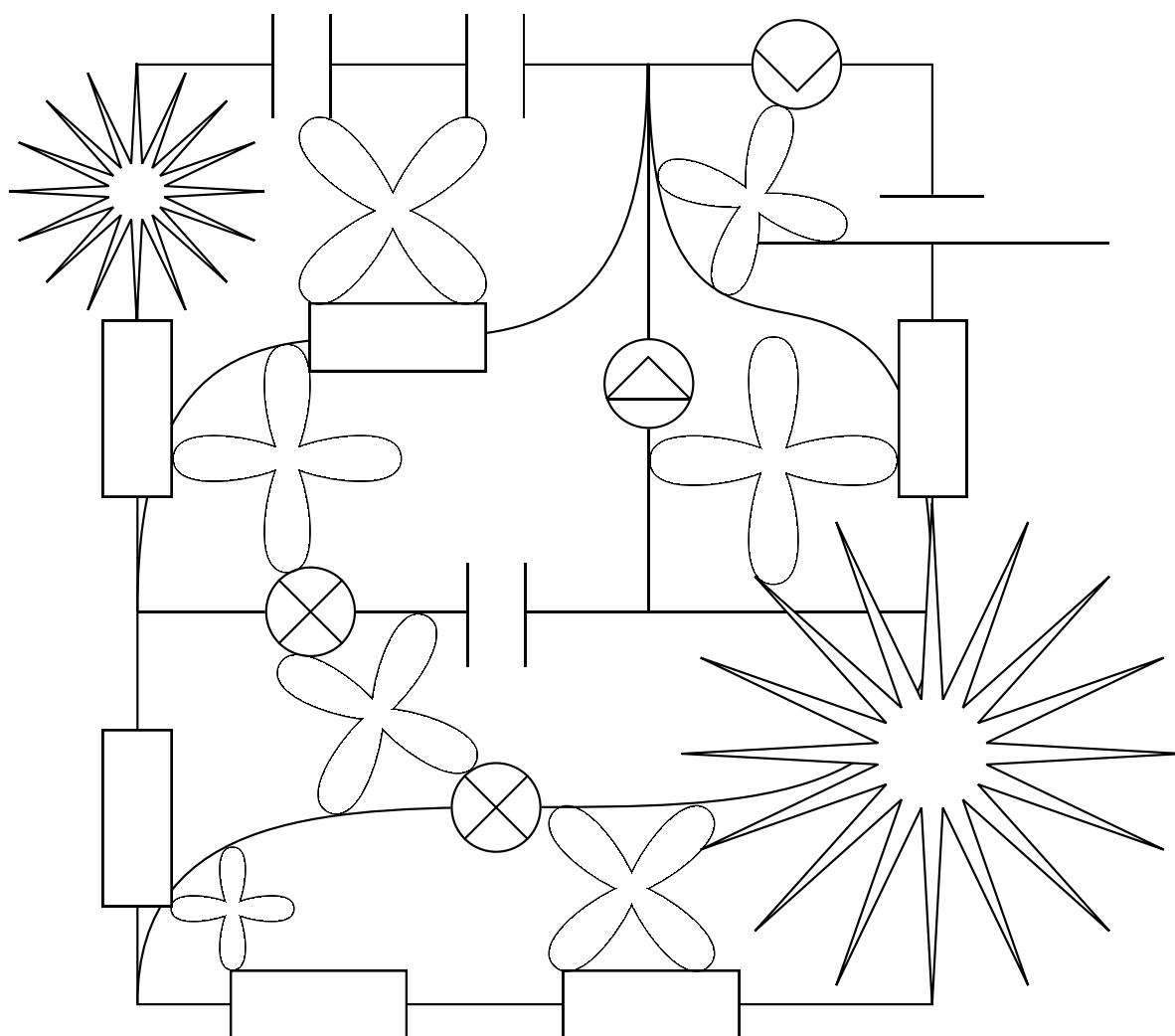
Мы уверены, что выполнение проекта по молекулярной физике даст вам не только ценный опыт работы с реальными данными, но и чувство удовлетворения от собственной исследовательской деятельности.

Темы проектных и исследовательских работ к разделу:

- 1. Проектирование и исследование тепловой изоляции.** Работа предполагает комплексное изучение свойства теплоизоляции, её основных характеристик, а также экспериментальное их измерение. На основе сделанных выводов можно подобрать комбинацию оптимальной теплоизоляции для различных условий и задач или предложить идеи для разработки новой теплоизоляции, исходя из основных физических принципов сохранения тепла.
- 2. Моделирование и исследование гидравлического пресса.** Предлагается исследовать модель гидравлического пресса, изучив принцип работы и ключевые физические параметры. С помощью моделирования и эксперимента определить критические режимы работы, а также эффективность и условия достижения её максимума.
- 3. Создание и исследование модели рекуператора для вентиляционной системы.** Рекуператор – важная часть современной вентиляционной системы. В проекте предполагается разработка модели рекуператора, который улавливает тепло из воздуха, выходящего из помещения, для подогрева поступающего воздуха. Для успешной разработки понадобится исследовать эффективность теплопередачи, а также сделать расчет энергосбережения для помещения, в котором будет использоваться ваш рекуператор. При наличии навыков, можно выполнить также моделирование потоков воздуха и температуры в системе рекуператора.

4. **Разработка и исследование модели эффективного теплообменника.** Теплообменники играют важнейшую роль в системах, требующих организации отвода тепла (например, в ДВС или процессорах ПК). В проекте предполагается создание компактной инженерной модели теплообменника и проведение экспериментов для определения эффективности передачи тепла. На основе полученных данных предлагается оптимизация конструкции теплообменника для повышения эффективности его работы. При наличии навыков, можно выполнить расчет и моделирование потоков тепла и жидкости внутри теплообменника.
5. **Создание и исследование солнечного водонагревателя.** Солнечные водонагреватели активно используются в быту и на производстве для эффективного нагрева жидкости в регионах с высокой солнечной активностью. В работе предлагается изучение зависимости температуры воды от площади нагревательной поверхности, угла наклона и интенсивности солнечного света, конструирование собственной рабочей модели солнечного эффективного водонагревателя на основе изученных параметров, а также моделирование тепловых процессов в системе солнечного нагревателя и расчет зависимости температуры воды от времени.
6. **Разработка устройства для охлаждения воздуха с использованием эффекта Джоуля-Томсона.** Предлагается изучить эффект Джоуля-Томпсона как основу для разработки экспериментального устройства, в котором происходит охлаждение газа при его расширении. Потребуется изучить зависимости температуры газа от давления и объема, продумать конструкцию такого устройства и исследовать его эффективность. Работа может быть выполнена также в формате компьютерного моделирования изучаемых эффектов.
7. **Создание модели теплового насоса и исследование его работы.** В работе предлагается изучить тепловой насос как инженерную систему. Построить его рабочую модель, измерить эффективность насоса при разных температурах окружающей среды. На основе изученных параметров модели будет необходимо оптимизировать конструкцию насоса с целью повышения коэффициента производительности.
8. **Разработка и исследование модели устройства для производства водорода методом электролиза.** Водородные генераторы все больше находят применение в устройствах для альтернативной энергетики, в автотранспортных системах и многих других. Предлагается изучить работу водородного генератора на электролизе, исследовать его основные параметры, а также выполнить моделирование процесса электролиза воды с учетом параметров установки (напряжение, ток, площадь электродов).

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ



4.1 Введение

Понимание электрических цепей и принципов их работы — это ключ к созданию инженерных решений, которые меняют мир. В данном разделе вы познакомитесь с основами электрических цепей постоянного тока. Эти знания являются фундаментом для понимания более сложных электрических и электронных систем, с которыми вы столкнётесь в будущем. Понимание этих основ поможет вам развить инженерное мышление и научиться применять законы физики для анализа и проектирования электрических схем.

Электрические цепи окружают нас повсюду. Их можно встретить в быту, в промышленности, в автомобилях и самолётах, в телекоммуникационных системах и даже в медицине. Они являются важным инструментом для управления энергией и её передачи. Чтобы понять их работу, необходимо познакомиться с ключевыми понятиями, такими как электрический ток, напряжение, сопротивление и мощность. Изучение электрических цепей позволяет не только узнать, как устроены и работают различные устройства, но и развить навыки проектирования и анализа собственных схем.

В ходе изучения материала вы познакомитесь с различными типами электрических цепей, научитесь разбираться в их устройстве и характеристиках. Важной частью работы станет освоение таких схем, как мост Уитстона и резистивный делитель напряжения. Эти схемы широко используются в инженерной практике для создания измерительных приборов, управления электрическими сигналами и разработки сложных систем. Этот раздел является первым шагом на пути к изучению более сложных электрических и электронных систем. Знания, которые вы получите, станут базой для понимания цепей переменного тока, работы трансформаторов, конденсаторов, диодов и транзисторов. Кроме того, они помогут вам увидеть взаимосвязь между теорией и практикой, между физическими законами и их инженерным применением. Это будет не только полезно для будущей учёбы, но и послужит важным этапом для формирования вашего интереса к инженерной профессии.

Электричество даёт нам возможность создавать уникальные устройства и решения, которые изменяют мир. Этот раздел не только откроет перед вами двери в удивительный мир электрических цепей, но и покажет, как знания могут быть применены для улучшения жизни людей. Мы надеемся, что этот опыт будет для вас вдохновляющим и полезным, а полученные знания помогут вам стать успешным инженером.

4.2 Лабораторная работа №9 Исследование резистивного делителя напряжения

Цель работы: исследовать схему резистивного делителя напряжения, определить номинал неизвестного резистора с помощью вольтметра и резистора с известным сопротивлением, познакомиться с основами моделирования в среде MicroCap.

Введение

На рисунке 4.1 представлена схема резистивного делителя напряжения. Ток, протекающий через последовательно соединенные резисторы, одинаков, а сумма напряжений на каждом из резисторов дает полное напряжение на цепи.

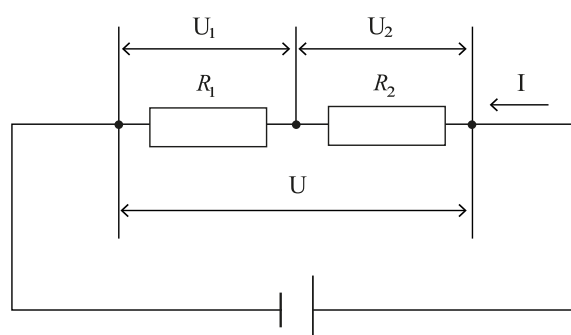


Рис. 4.1: Схема резистивного делителя напряжения

Если выразить ток через отношение напряжения на резисторе к его сопротивлению, и приравнять токи, то отношение напряжений на резисторах будет равно отношению их сопротивлений. Такая схема называется резистивным делителем напряжения, потому что точка между резисторами делит полное напряжение в соотношении, равном отношению сопротивлений

Если даны два резистора, сопротивление одного из которых неизвестно, его можно определить, используя только вольтметр. Для этого достаточно собрать электрическую схему резистивного делителя напряжения (последовательно соединенные резисторы), измерить напряжение на каждом резисторе, а затем, по отношению измеренных напряжений и известному значению одного из резисторов, можно вычислить значение неизвестного резистора.

Резистивный делитель часто используется для снижения напряжения до уровня, который безопасен для чувствительных компонентов, таких как микроконтроллеры или аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Например, если датчик или источник выдаёт напряжение выше допустимого уровня для измерительного устройства, делитель помогает привести сигнал к нужным параметрам. В



**Основы работы в MicroCap
12: Простейшие
электрические цепи**

цифровой электронике делители напряжения применяются для согласования уровней напряжения между разными логическими системами. Например, чтобы соединить устройство с логикой 5 В с устройством, работающим на 3,3 В. Эти важные свойства такой простой схемы делают ее ключевым элементом базовой инженерной подготовки.

Описание установки

Приборы и принадлежности: резисторы с известным и неизвестным сопротивлением, мультиметр, источник питания, макетная плата, комплект проводов для подключения к макетной плате, цифровая лаборатория UniTrain с приставкой Experimenter или EloTrain (при наличии).

Установка состоит из двух последовательно соединенных резисторов самостоятельно выбранных номиналов в зависимости от поставленной задачи. Рекомендуется использовать регулируемый источник питания с ограничением по току. Вместо мультиметра можно воспользоваться вольтметром, однако в таком случае будет необходим омметр для контрольного измерения сопротивления. Для удобства работы и демонстрации результата в качестве измерительного устройства и источника питания можно использовать цифровую лабораторию UniTrain-II.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Проверка соотношения напряжений на резисторах в схеме резистивного делителя напряжений

1. Соберите схему резистивного делителя: два резистора, соединенных последовательно. Подключите делитель к источнику питания.
2. Измерьте вольтметром напряжение на источнике питания. Результат внесите в таблицу 4.1.
3. Измерьте вольтметром напряжение на каждом резисторе. Результат внесите в таблицу 4.1.
4. Проверьте выполнение равенства напряжения на источнике питания U_0 сумме напряжений на каждом из резисторов при их последовательном соединении $U_{\Sigma} = U_R + U_x$. Вероятно, точного равенства не получится. Можно ли при этом говорить о совпадении результатов и как правильно сравнивать экспериментальные результаты, рассказано в Задании 3.

Задание 2. Определение сопротивления неизвестного резистора

1. Замените один неизвестный резистор другим. Повторите измерения из Задания 1. Результаты занесите во вторую строку таблицы 4.1.
2. Вычислите значения неизвестных сопротивлений по результатам измерения напряжений.

$$R_x = R \frac{U_x}{U_R}$$

Результат внесите в таблицу 4.1. Сравните со значением, указанным преподавателем.

Таблица 4.1: Экспериментальные результаты

	$U_0, \text{В}$	$U_R, \text{В}$	$U_x, \text{В}$	$U_\Sigma, \text{В}$	$R, \text{Ом}$	$R_x, \text{Ом}$
1						
2						

Задание 3. Оценка погрешностей результатов измерений

1. Оцените приборную погрешность измерений напряжений в Задании 1. Результаты занесите в таблицу 4.2.
2. Обратите внимание, что пока ошибку имеет только результат измерения U_0 и эта ошибка – приборная. В ошибку расчетного значения U_Σ вносят вклад ошибки измерения напряжений на каждом из резисторов U_R и U_x . Для **грубой оценки** ошибки U_Σ возьмите сумму ошибок каждого измерения.
3. Если ошибка каждого измерения равна цене деления вольтметра, то ошибка U_Σ будет равна двум ценам деления. Эта оценка является завышенной (ее еще называют «оценкой сверху»), более точная оценка требует использование специального метода математической обработки результатов и их погрешности.
4. Нарисуйте числовую ось напряжений и укажите на ней интервалы $[U_0 - \Delta U_0; U_0 + \Delta U_0]$ и $[U_\Sigma - \Delta U_\Sigma; U_\Sigma + \Delta U_\Sigma]$. О совпадении результатов можно говорить, если эти интервалы пересекаются, иначе результаты не совпадают.
5. Ошибка, выраженная в единицах измеряемой величины, называется **абсолютной ошибкой**.
6. Оцените погрешность сопротивления известного резистора R . Если на корпусе резистора не указана его погрешность, выраженная в % от номинала, то в качестве оценки можно взять единицу последнего разряда номинала. Например, если номинал резистора 10, то приемлемой оценкой погрешности можно считать 1, а для номинала 5,6 – 0,1. Такое правило справедливо для любых значений, если для них не указывается погрешность. Результат оценки внесите в таблицу 4.3.
7. Ошибка, выраженная в долях (или процентах) от значения результата, называется **относительной ошибкой**.
8. Возьмите в качестве оценки относительной ошибки вычисления сопротивления неизвестного резистора сумму относительной ошибки сопротивления известного резистора и относительных ошибок напряжений. Рассчитайте абсолютную ошибку.
9. Как и для напряжений эта оценка тоже является завышенной. Более точная оценка требует использование специального метода математической обработки результатов и их погрешности. Ограничимся пока грубой оценкой.

10. Сравните со значением, указанным преподавателем. Говорить о совпадении результатов можно, если это значение попало в интервал $[R_x - \Delta R_x; R_x + \Delta R_x]$.

Таблица 4.2: Оценка погрешности результата

№	$U_x, В$	$\Delta U_x, В$	$U_R, В$	$\Delta U_R, В$	$U_0, В$	$\Delta U_0, В$	$U_{\Sigma}, В$	$\Delta U_{\Sigma}, В$

Таблица 4.3: Оценка погрешности результата

№	$R, Ом$	$\Delta R, Ом$	$\frac{\Delta R}{R}$	$\frac{\Delta U_x}{U_x}$	$\frac{\Delta U_R}{U_R}$	$\frac{\Delta R_x}{R_x}$	$\Delta R_x, Ом$

Задание 4(дополнительное). Моделирование схемы резистивного делителя в программе MicroCap 12

- Запустите программу MicroCap 12. Установите отображение сетки выбором элемента на панели инструментов или через следующий путь: **Options** -> **View** -> **GridBold6**.
- Добавьте на рабочее поле два резистора пользуясь элементом на панели инструментов или через следующий путь: **Component** -> **Analog Primitives** -> **Passive Components** -> **Resistor**.
- В открывшемся окне свойств резистора установите величину сопротивления в Омах в элементе **RESISTANCE**.
ВАЖНО! В случае необходимости можно использовать кратные и дольные приставки для обозначения величины сопротивления ("к" - кило, "М" - мега, "м" - милли, "у" - микро, "н" - нано, "р" - пико)
- Добавьте в схему источник питания (батарейку) пользуясь элементом с панели инструментов или через следующий путь: **Component** -> **Analog Primitives** -> **Waveform Sources** -> **Battery**. Установите величину напряжения источника аналогичную предыдущим заданиям.
- Включите режим **Wire Mode** на панели инструментов или сочетанием клавиш **Ctrl+W**.
- Соедините установленные элементы цепи между собой. Установите заземление в цепи (для формирования точки отсчета).
- В разделе **Analysis** выберите элемент **Dynamic DC**. Установите в параметрах отображение тока в ветвях и напряжения в узлах цепи.
- Сравните полученные токи и напряжения в цепи с результатами заданий 1-3. Сделайте выводы о соотношении результатов моделирования и эксперимента.

Расчетные формулы:

$$\Delta U_{\Sigma} \approx \Delta U_R + \Delta U_x = 2 \cdot \Delta U_{\text{прибор}}$$

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} \approx \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta U_R}{U_R} + \frac{\Delta U_x}{U_x}$$

Контрольные вопросы

1. Почему цепь, состоящую из последовательно соединенных резисторов, подключенных к источнику напряжения, называют делителем напряжения?
2. В каком случае можно говорить о совпадении двух экспериментальных значений, а в каком случае о совпадении говорить нельзя?
3. В каких инженерных системах применяется резистивный делитель?
4. Можно ли сделать резистивный делитель из потенциометра?

Литература

1. Мякишев, Г. Я. Физика 10 класс. Базовый уровень: учебник для общеобразовательных организаций / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский / под ред. проф. Н. А. Парфентьевой. – Москва: Просвещение, 2014. – 420 с.
2. Касьянов, В. А. Физика: 11 класс: углубленный уровень: учебник: издание в pdf-формате / В. А. Касьянов. – 10-е изд., стер. – Москва: Просвещение, 2022. – 493 с.

4.3 Лабораторная работа №10 Изучение температурной зависимости сопротивления проводника

Цель работы: провести измерения вольт-амперной характеристики лампы накаливания и проверить соблюдение линейной зависимости силы тока от напряжения.

Введение

Для того, чтобы в проводнике существовал электрический ток, необходимо создать напряжение на его концах. Для каждого проводника (и, вообще говоря, для любого электрического элемента) существует определенная зависимость силы тока от приложенного к нему напряжения. Такая зависимость и называется вольт-амперной характеристикой (ВАХ).

Для резистора постоянного сопротивления ВАХ представляет собой линейную зависимость (рис. 4.2 слева) силы тока от напряжения, а, например, ВАХ диода – некоторая сложная кривая (рис. 4.2 справа).

Получим зависимость силы тока I от приложенного напряжения U для металлического проводника длиной l и площадью поперечного сечения S . Под действием электрического поля с напряженностью $E = U/l$ свободные электроны приобретают ускорение:

$$a = \frac{F_{\text{эл}}}{m} = \frac{eE}{m} = \frac{eU}{ml}$$

Электроны постоянно сталкиваются с неоднородностями кристаллической решетки или атомами примесей другого элемента, по этой причине их траектория представляет собой сложную кривую.

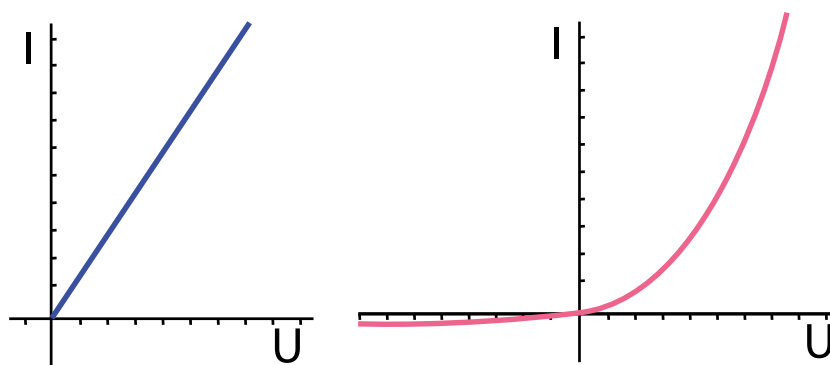


Рис. 4.2: Примеры ВАХ резистора и диода

Пусть τ_c – промежуток времени между столкновениями. За этот промежуток электрон приобретает среднюю скорость:

$$v = \frac{a\tau_c}{2} = \frac{eU}{2ml}\tau_c$$

Сила тока по определению:

$$I = enSv,$$

где n — концентрация свободных электронов в проводнике. Подставляя в это уравнение выражение для скорости, получим:

$$I = \frac{ne^2\tau_c}{2m} \frac{S}{l} U$$

Коэффициент пропорциональности между силой тока и напряжением обозначают $1/R$.

$$R = \frac{2m}{ne^2\tau_c} \frac{l}{S}$$

где R — электрическое сопротивление проводника, единица измерения которого называется Ом. Из формулы следует, что сопротивление проводника определяется геометрическими параметрами (длиной и площадью поперечного сечения), а также параметрами материала.

Удельное сопротивление ρ — скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади. Другими словами, это коэффициент перед $\frac{l}{S}$:

$$\rho = \frac{2m}{ne^2\tau_c}$$

Оказывается, что удельное сопротивление металлического проводника линейно возрастает с температурой:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при комнатной температуре, α — температурный коэффициент сопротивления. Для большинства чистых металлов температурный коэффициент сопротивления $\alpha \approx \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$.

Попробуем разобраться, почему эта зависимость носит именно линейный характер. Частота столкновений электронов — это величина, обратная τ_c . Она складывается из частоты столкновений с неоднородностями, которая от температуры никак не зависит, а также частоты столкновений с атомами и ионами.

При малых температурах амплитуда тепловых колебаний атомов и ионов около положения равновесия мала, поэтому электроны почти беспрепятственно движутся в решетке металла. С увеличением температуры растет амплитуда колебаний, движение электронов в кристаллической решетке затрудняется, следовательно, сопротивление движению возрастает.

В работе предлагается провести измерения напряжения и силы тока на лампе накаливания, по экспериментальным значениям вычислить электрическое сопротивление, а также по шкале оценить примерное значение температуры. Полученную экспериментально температурную зависимость сопротивления сравнить с теоретической и сделать выводы, выполняется ли линейный закон $R(T) = R_0(1 + \alpha T)$.

Описание установки

Приборы и принадлежности: источник напряжения регулируемый, вольтметр, амперметр, лампа накаливания, ключ, температурная шкала цвета нагретого металла, мультиметр,

макетная плата (в случае штырькового подключения лампы), цифровая лаборатория UniTrain с приставкой Experimenter или EloTrain (при наличии).

Схематически экспериментальная установка изображена на рис. 4.4.

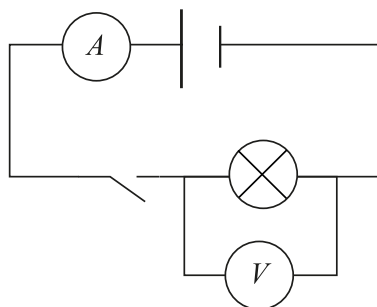


Рис. 4.3: Схема экспериментальной установки

Источник напряжения 1 подключен последовательно с ключом 2, лампой накаливания 3 и амперметром 4, вольтметр 5 подключен к лампе параллельно. В случае использования цифровой лаборатории UniTrain в качестве источника питания используется выход V1, в качестве вольтметра - выходы A+ и A-, в качестве амперметра - выходы E+ и E-. Лампу следует разогревать постепенно, регулируя напряжение питания ручками (или кнопками) плавной регулировки. Нить лампы должна быть хорошо различима для определения цвета.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Сборка схемы для снятия ВАХ нити лампы

1. По термометру внутри лаборатории определите комнатную температуру T_0 . Запишите результат в лабораторный журнал.
2. С помощью мультиметра определите сопротивление лампы накаливания при комнатной температуре R_0 . Для этого следует выбрать соответствующий режим измерений, обозначенный символом Ω . Измерительные щупы мультиметра должны быть подключены следующим образом: черный — в порт COM, красный — в порт с символом Ω . Запишите результат в лабораторный журнал.
3. Соберите электрическую схему в соответствии с рис. 4.4. **НЕ ВКЛЮЧАЙТЕ** питание до проверки схемы преподавателем!
4. После проверки схемы преподавателем включите питание и плавно увеличивайте напряжение на источнике и визуально отслеживайте изменение цвета нити накаливания. Отрегулируйте напряжение на источнике таким образом, чтобы цвет нити соответствовал **коричнево-красному** (по приведенной температурной шкале). Запишите показания напряжения U_1 и силы тока I_1 . Значение температуры T_1 примите равным среднему значению для коричнево-красного цвета.
5. По полученным данным с помощью закона Ома рассчитайте экспериментальное сопротивление нити R_1^3 .

6. По формуле $R(T) = R_0(1 + \alpha T)$ рассчитайте теоретическое значение R_1^T . Погрешность измерения температуры следует принять равной $\Delta T = 30$ К. По формуле $\Delta R = R_0 \alpha \Delta T$ рассчитайте погрешность расчета R_1^T . Сравните с экспериментально полученным значением и сделайте вывод.

Задание 2. Получение ВАХ нити накаливания

1. Проведите измерения напряжения и силы тока для десяти значений температуры от коричнево-красного до светло-желтого. Внесите значения в таблицу 4.4.

Таблица 4.4: Измерение ВАХ нити накаливания

№	U , В	I , А	R , Ом	T , К
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

2. С использованием температурной шкалы нагретого металла заполните столбец температур (среднее значение из диапазона).
3. Постройте ВАХ (зависимость силы тока от напряжения). Имеется ли отклонение от линейного закона для резистора? Сделайте вывод.

Задание 3. Проверка линейной зависимости сопротивления проводника от температуры

1. С помощью закона Ома рассчитайте для каждой пары напряжения и силы тока сопротивление.
2. Постройте график зависимости сопротивления от температуры. Подчиняется ли эта экспериментальная зависимость линейному закону? По экспериментальным точкам проведите «на глаз» прямую. Определите угловой коэффициент k . Для оценки температуры используется шкала цвета нагретого металла (Рис. 4.4).

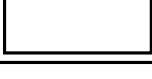
Цвет каления	Название цвета	Температура, °C
	темно-коричневый	520 - 580
	корично-красный	600 - 610
	темно-красный	650 - 710
	темно-вишнёвый	710 - 770
	вишнёвый	740 - 800
	светло-вишнёвый	770 - 830
	светло-красный	820 - 880
	ярко-красный	870 - 930
	оранжевый	920-980
	желтый	970-1030
	светло-желтый	1090 - 1150
	желто-белый	1170- 1230
	белый	1300 и более

Рис. 4.4: Шкала цвета нагретого металла

3. Рассчитайте температурный коэффициент сопротивления и его погрешность по формулам:

$$\alpha_3 = \frac{k}{R_0}$$

$$\Delta\alpha_3 = \alpha \frac{\Delta T}{T}$$

4. Сравните α_3 с теоретическим значением и сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
2. Как зависит сопротивление проводника от его длины и площади поперечного сечения?

3. Дайте определение вольт-амперной характеристике.
4. Как зависит от температуры сопротивление металлов? Почему эта зависимость именно такая?
5. Что такое температурный коэффициент сопротивления? Каково его численное значение для большинства металлов

Литература

1. Мякишев, Г. Я. Физика 10 класс. Базовый уровень: учебник для общеобразовательных организаций / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский / под ред. проф. Н. А. Парфентьевой. – Москва: Просвещение, 2014. – 420 с.
2. Касьянов, В. А. Физика: 11 класс: углубленный уровень: учебник: издание в pdf-формате / В. А. Касьянов. – 10-е изд., стер. – Москва: Просвещение, 2022. – 493 с.

4.4 Лабораторная работа №11 Определение сопротивления по схеме измерительного моста (Моста Уитстона)

Цель работы: Определить сопротивление неизвестного резистора по схеме измерительного моста.

Введение

О резистивном делителе напряжения подробно рассказано в лабораторной работе №8. На схеме на рисунке 4.5 показан мост Уитстона. Два резистора R_1 и R_2 образуют делитель напряжения между точками A и D (левое плечо моста). Аналогичный делитель образуют два резистора R_3 и R_x , подключенные к тем же точкам (правое плечо моста). Если отношение сопротивлений R_1/R_2 будет равно отношению сопротивлений R_x/R_3 , то точки C и B будут иметь одинаковый потенциал и вольтметр покажет значение разности потенциалов $U_{CB} = 0$.

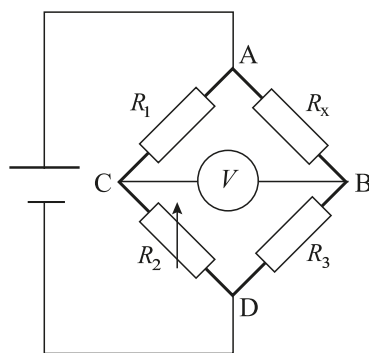


Рис. 4.5: Мост Уитстона

Таким образом, при известных сопротивлениях R_1 и R_3 , подбирая сопротивление R_2 , можно добиться нулевого показания вольтметра. Тогда:

$$\frac{U_x}{U_3} = \frac{R_x}{R_3} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{U_1}{U_2},$$

откуда можно вычислить R_x .

Мост Уитстона — это один из самых известных и широко применяемых инструментов для точных измерений сопротивления в электрических цепях. Его универсальность и высокая точность делают его незаменимым элементом в различных системах и устройствах, как в научных исследованиях, так и в промышленности. Он используется для определения сопротивлений, которые слишком малы для точного измерения обычными методами. Это может быть полезно, например, при проверке качества проводников или пайки в электрических цепях, где точное значение сопротивления имеет решающее значение. В таких устройствах, как тензодатчики, мост Уитстона применяется для измерения деформации материалов. Когда материал подвергается растяжению или сжатию, изменяется сопротивление встроенного датчика, и мост Уитстона позволяет определить эту разницу с высокой точностью. Это находит применение в строительной инженерии, робототехнике, медицине и авиации. На том

же принципе основана измерительная система промышленных терморезисторов и датчиков давления. Мостовые схемы могут быть использованы в датчиках уровня жидкости, где сопротивление изменяется в зависимости от высоты столба жидкости. Такие системы нашли свое активное применение в сельском хозяйстве и в быту для организации систем автополива и иной автоматизации. Знание принципов работы мостовой схемы - залог качественной подготовки будущего инженера.

Описание установки

Приборы и принадлежности: резисторы с известным сопротивлением, вольтметр, резистор с неизвестным сопротивлением, потенциометр или реостат, цифровая лаборатория UniTrain с приставкой Experimenter или EloTrain (при наличии).

Порядок выполнения работы

Задание 1. Проверки линейности характеристики потенциометра

1. Подключите потенциометр крайними выводами к источнику напряжения. Подключите вольтметр между минусом источника и ползунком потенциометра.
2. Установите на источнике минимальное напряжение. Включите источник напряжения.
3. Изготовьте для потенциометра бумажную шкалу с делениями. Цена деления шкалы должна соответствовать не более чем $\frac{1}{8}$ длины всей длины дуги, по которой движется ползунок.
4. Измерьте напряжение при пяти положениях ползунка: два крайних, посередине, $\frac{1}{4}$ и $\frac{3}{4}$ длины потенциометра (отсчитывать от минусовой клеммы). Заполните таблицу 4.5.

Таблица 4.5: Проверка линейности характеристики потенциометра

Часть длины дуги бегунка потенциометра	0	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1
$U, \text{В}$					

5. Постройте график $U(x)$, где U — измеренное значение напряжений, а x — это координата ползунка.

Задание 2. Сборка моста Уитстона и определение сопротивления потенциометра

1. Соберите схему моста Уитстона на макетной плате, подключив в качестве неизвестного резистора потенциометр (в крайний и средний выходы).
2. Подключите схему к источнику напряжения. Включите источник и установите напряжение 5 В.

3. Перемещая ползунок потенциометра, проверьте, действительно ли меняются показания вольтметра.
4. Подберите положение ползунка, при котором вольтметр показывает ноль.
5. Измените на источнике напряжение, увеличив или уменьшив его на 2 В. Убедитесь, что состояние баланса моста не зависит от напряжения источника питания.
6. Выключите источник напряжения. Отключите от схемы потенциометр не изменяя положение бегунка.
7. Пользуясь формулами, проведите расчет сопротивления потенциометра на основании измерений.
8. Пользуясь мультиметром в режиме омметра проведите измерение сопротивления потенциометра (части, которая была включена в схему).
9. Сравните полученные значения сопротивления потенциометра с номинальным, измеренным с помощью мультиметра. Сделайте вывод о точности проведенного эксперимента.

Задание 3. Калибровка потенциометра и измерение сопротивления неизвестного резистора

1. Пользуясь мультиметром в режиме омметра и сделанной ранее (или изготовленной заново) шкалой, выполните калибровку потенциометра (градуировку шкалы потенциометра). Для этого задания возможно также использовать шаговый потенциометр.
2. Соберите схему моста Уитстона на макетной плате, подключив потенциометр в качестве переменного резистора и неизвестное сопротивление.
3. Подключите схему к источнику напряжения. Включите источник и установите напряжение 5 В.
4. Перемещая ползунок потенциометра, проверьте, действительно ли меняются показания вольтметра.
5. Подберите положение ползунка, при котором вольтметр показывает ноль. Определите сопротивление потенциометра по выбранной шкале и рассчитайте величину неизвестного сопротивления. Все данные занесите в таблицу 4.6.

Таблица 4.6: Измерение сопротивлений неизвестных резисторов

№	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_p , Ом	R_x , Ом	ΔR_x , Ом
1					
2					

6. Выключите источник напряжения. Замените неизвестный резистор другим неизвестным резистором. Повторите измерения с другим резистором. Данные занесите в таблицу 4.6.
7. Сравните полученные значения сопротивлений неизвестных резисторов с номиналами, указанными преподавателем. Оцените погрешности измерения неизвестного сопротивления.

Контрольные вопросы

1. Какое соединение резисторов называют резистивным делителем напряжения?
2. При каком условии вольтметр моста Уитстона будет показывать нулевое значение?
3. Возможно ли использовать реостат в качестве делителя напряжения? Нарисуйте схему моста Уитстона с реостатом в качестве одного из плечей моста.
4. Можно ли использовать вместо вольтметра амперметр в данной цепи?

Литература

1. Мякишев, Г. Я. Физика 10 класс. Базовый уровень: учебник для общеобразовательных организаций / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский / под ред. проф. Н. А. Парфентьевой. – Москва: Просвещение, 2014. – 420 с.
2. Касьянов, В. А. Физика: 11 класс: углубленный уровень: учебник: издание в pdf-формате / В. А. Касьянов. – 10-е изд., стер. – Москва: Просвещение, 2022. – 493 с.

4.5 Проектные и кейсовые задания

4.6 Кейс №3 Увеличение предела измерения электроизмерительных приборов. Шунтирование амперметра.

1.Актуальность

Сила тока и напряжение — ключевые физические параметры любой без исключения электрической схемы. Аналоговые амперметры и вольтметры в силу своих конструктивных особенностей имеют ограничение на максимально возможные для измерения величины силы тока и напряжения.

Из курса школьной физики нам известно, что амперметр подключается в цепь последовательно, а вольтметр — параллельно измеряемому элементу. Для измерения большей силы тока параллельно амперметру присоединяют **шунт**, через который проходит часть измеряемого тока.

Шунт - проводник, присоединяемый параллельно амперметру для увеличения его предела измерения.

Аналоговый вольтметр работает по тому же принципу, что и амперметр. По этой причине для увеличения предела измерения вольтметра последовательно к нему подключают **добавочное сопротивление**.

Добавочное сопротивление – проводник, присоединяемый последовательно с вольтметром для увеличения его предела измерения.

Особую актуальность данный вопрос приобретает при переходе к работе с аналого-цифровыми преобразователями, микроконтроллерами типа Arduino или ESP32, которые не измеряют ток напрямую, а могут измерить лишь разность потенциалов (напряжение). Таким образом, для измерения тока с помощью этой системы нам необходимо подбирать соответствующие шунты и вносить изменения в программный код для расчета необходимых параметров. Кроме того, любой порт имеет возможное ограничение по напряжению, в связи с чем для измерения больших напряжений также понадобится добавочное сопротивление для подключения к измерительному модулю.

Подключение шунтов снижает ток или напряжение, проходящее через чувствительные элементы приборов, что предотвращает их перегрузку и повреждение. Это особенно актуально для дорогостоящих высокоточных устройств, таких как осциллографы, вольтметры и амперметры. В системах с большими токами значительная часть энергии выделяется в виде тепла. Шунтирование помогает перераспределить ток так, чтобы минимизировать нагрев измерительного прибора, что увеличивает его долговечность и стабильность работы. То же самое относится и к работе систем управления электрогенераторами или АКБ. В высокоточных измерительных системах шунты помогают устранить погрешности, связанные с особенностями самого прибора. Например, использование прецизионных шунтов с низким

температурным коэффициентом позволяет добиться стабильности измерений даже при значительных температурных колебаниях.

Таким образом, шунтирование измерительных приборов является важным инструментом для обеспечения их функциональности, защиты и точности. Это критически важно в инженерных системах, где измерения токов и напряжений играют ключевую роль в мониторинге, управлении и диагностике различных процессов. В рамках этого исследования предлагается изучить, что такое шунт, как его правильно подключать в цепь и проводить измерения с его помощью.

2. Этапы работы

Задание 1. Определение характеристик измерительных приборов

1. Запишите в лабораторный журнал пределы измерений амперметра I_{max} и вольтметра U_{max} .
2. Используя мультиметр, измерьте и запишите в лабораторный журнал значения внутренних сопротивлений R_A и R_V приборов. **Примечание:** в данной работе мультиметр используется исключительно как средство экономии времени на действиях, которые можно проделать и без него. Как правило, на самих приборах указаны значения их внутренних сопротивлений.
3. Соберите схему для расчета сопротивления неизвестного резистора.
4. Используя закон Ома для участка цепи, рассчитайте сопротивление неизвестного резистора.
5. Оцените значения силы тока и напряжения в случае резистора, номинал которого в 100 раз меньше данного. Хватит ли предела измерений приборов в данной работе? Предложите решение подобной проблемы.

Задание 2. Расчет сопротивления шунта и добавочного сопротивления

1. Известно, что максимальная сила тока, которую может измерять данный амперметр, равна I_{max} , а сопротивление прибора равно R_A . Рассчитайте сопротивление шунта $R_{ш}$, необходимое для увеличения предела измерения амперметра в n раз. Запишите полученную формулу:

$$R_{ш} =$$

2. Какое дополнительное сопротивление R_d необходимо для увеличения предела измерения вольтметра U_{max} в n раз, если сопротивления прибора R_V ? Запишите полученную формулу:

$$R_d =$$

3.

Задание 3. Увеличение пределов измерения приборов

1. Используя подходящие шунт и добавочное сопротивление (если необходимо), соберите схему для измерения силы тока и напряжения резистора малого номинала.
2. Запишите результаты измерений в лабораторный журнал.
3. Рассчитайте сопротивление резистора с помощью закона Ома и сравните с табличным значением.
4. Сделайте вывод о применимости схемы с шунтом и добавочным сопротивлением.
5. Как внутри измерительных приборов происходит варьирование пределов измерений? Дайте развернутый ответ.

Задание 4. Измерение тока в цепи с помощью микроконтроллера Arduino/ESP32

1. Изучите параметры аналогового входа микроконтроллера Arduino/ESP32 или аналогичного, определите входное сопротивление и принцип измерения напряжения.
2. Выполните моделирование предполагаемой измерительной схемы и проферируйте её работоспособность.
3. Выполните калибровку данных, получаемых с микроконтроллера Arduino/ESP32 для получения истинного значения напряжения.
4. Используя подходящие шунт и добавочное сопротивление (если необходимо), соберите схему для измерения силы тока и напряжения резистора малого номинала с помощью микроконтроллера Arduino.
5. Выполните измерения тока и напряжения для нескольких разных цепей, определите границы применимости разработанного вами мультиметра.
6. Исследуйте, как выбор сопротивления влияет на точность получаемого результата по току и напряжению.
7. Спроектируйте набор подключаемых шунтов для микроконтроллера Arduino, для создания 2 измерительных токовых каналов с помощью платы расширения (Proto Shield). Спроектируйте и распечатайте корпус изделия для придания ему конечного вида.

3. Примерный перечень средств и материалов для выполнения задания

- Источник питания
- Ключ
- Соединительные провода
- Набор резисторов
- Амперметр
- Вольтметр

- Мультиметр
- Плата Arduino Uno R3 или аналог
- Компьютер с установленной программой Arduino IDE

4. Требования к предоставлению решения задания

По итогам выполнения кейсовой задачи оформляется отчет о работе проектной команды, включающий в себя как разработанные системы и устройства, так и корректно оформленную документацию по кейсу. Документация в обязательном порядке должна включать в себя:

1. Титульный лист (школа, авторы, название кейса, название команды, руководитель).
2. Описание команды, распределение ролей, функций и обязанностей каждого участника команды.
3. Теоретическое Введение. В разделе «Введение» обосновывается Актуальность исследования, формулируются цель и задачи работы, а также предоставляется краткий литературный обзор темы исследования.
4. Методику проведения исследования. В разделе «Методика исследования» описывается порядок выполнения экспериментов, экспериментальная установка, приводится ее схема, указываются расчетные формулы, использованные для обработки полученных данных, а также приводится описание методики оценки погрешностей экспериментальных результатов.
5. Результаты проведенного исследования. В разделе «Результаты» необходимо представить полученные данные, а также результаты их обработки в виде таблиц и/или графиков, привести интерпретацию и физическое объяснение результатов. Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и подписаны.
6. Разработанные 3D-модели в форматах .obj, .stl или .step, скриншоты разработанных 3D-моделей (как системы в целом, таким и отдельный ее частей, при наличии). 3D-модели должны находиться в репозитории проекта в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.).
7. Описание схемы разработанной установки в виде изображений общей схемы установки, электрической принципиальной схемы, монтажной схемы, оптической схемы (если имеется) и т.д.
8. В случае разработки программного обеспечения, должен быть приведен алгоритм его работы в виде блок-схем.
9. Код разработанного программного обеспечения должен быть представлен в виде ссылки на репозиторий проекта с кодом в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.). Любые архивы с загруженными исходными кодам (.zip, .rar и т.п.) загружать в другие хранилища данных запрещается.

10. Фотографии разработанной установки и ее составных частей.
11. Видеоролик, демонстрирующий выполнение экспериментальных измерений в соответствии с требованиями кейса. На видео необходимо продемонстрировать прохождение каждого, описанного в задании, эксперимента или отдельных его частей. Видео с проведенным экспериментом должно однозначно подтверждать авторство участников (во время записи ролика необходимо четко произнести название команды, ФИО участников, номер школы, ФИО руководителя). Видеоролик располагается на стороннем видеохостинге (ВКонтакте, Rutube и др.), ссылка на видеоролик располагается в репозитории в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.). Весь эксперимент, от подготовки к работе до завершения последнего этапа, должен быть записан на видео одним дублем без склейки и монтажа. В течении всего видео в кадре должны быть разработанная командой установка и как минимум один из участников команды, выполняющий все операции с ней. Вход и выход участников, передача инструмента, деталей и других вещей из кадра недопустимо. Допускается использование второй камеры для более детализированной демонстрации ключевых моментов. Видео должно быть со звуком, на котором отчетливо слышны подаваемые голосовые команды и действия команды. На видеозаписи должно быть хорошо различимы все элементы, влияющие на оценивание результативности. В случае, если эксперты не смогут по видеозаписи однозначно понять результат выполнения задания, принимается решение не в пользу участника.
12. Заключение, включающее краткое изложение результатов работы, подведение итогов исследования, обсуждение его практической и теоретической значимости. Также могут быть предложены дополнительные направления исследований.
13. Список литературных источников. В этом разделе приводится список использованных источников, статей, книг и другой литературы, на которые ссылается исследование. Кроме того, работа может содержать приложения с иллюстративным материалом (рисунки, схемы, таблицы, фотографии и т. п.). На каждое приложение должна быть дана ссылка в тексте работы.

5. Список рекомендуемой литературы

1. Иванов, П. А. Основы теории электроизмерительных приборов и измерений / П. А. Иванов. — М.: МИФИ, 2022. — 214 с.
2. Справочник по электроизмерительным приборам / Под ред. А. И. Козлова. — М.: Энергия, 2018. — 376 с.
3. Журавлев, А. В. Электроизмерительные приборы и методы измерений : учебник для вузов / А. В. Журавлев. — М.: Высшая школа, 2020. — 412 с.
4. Gyver, Alex. Analog pins: Все, что нужно знать про аналоговые пины // AlexGyver. URL: <https://alexgyver.ru/lessons/analog-pins/> (дата обращения: 13.07.2024)

-
5. Мякишев, Г. Я. Физика 10 класс. Базовый уровень: учебник для общеобразовательных организаций / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский / под ред. проф. Н. А. Парфентьевой. – Москва: Просвещение, 2014.
 6. Касьянов, В. А. Физика: 11 класс: углубленный уровень: учебник: издание в pdf-формате / В. А. Касьянов. – 10-е изд., стер. – Москва: Просвещение, 2022.

4.7 Темы проектно-исследовательских работ для самостоятельного изучения

Выполнение собственных исследовательских проектов — это увлекательный и важный шаг в изучении электрических цепей и подготовке к будущей инженерной деятельности. Исследования помогают не просто узнать теорию, но и увидеть, как законы физики работают в реальной жизни.

Простые электрические цепи лежат в основе всех современных технологий. Изучая их, вы знакомитесь с такими важными понятиями, как электрический ток, напряжение, сопротивление и мощность. Вы узнаете, как применять законы Ома и Кирхгофа, чтобы анализировать и проектировать цепи. Но самое главное — вы сможете сами создавать устройства и исследовать, как они работают, а это захватывающе!

Работа над проектами позволяет вам самостоятельно искать ответы на важные вопросы. Как сделать систему энергосбережения эффективнее? Как уменьшить потери энергии в проводниках? Как разработать простую, но надёжную схему измерения параметров? Эти задачи требуют от вас аналитического и творческого подхода, навыков планирования и проведения экспериментов. В процессе работы вы научитесь не только анализировать цепи, но и делать выводы, которые можно применить в реальной инженерной практике. Иногда ваши эксперименты могут показать неожиданные результаты, не совпадающие с теорией. Но именно в таких ситуациях рождаются новые идеи и понимание процессов. Например, вы можете обнаружить, что на работу цепи влияют внешние факторы, такие как температура или качество соединений. Решая эти проблемы, вы узнаете больше о реальных условиях эксплуатации инженерных систем.

Проекты по цепям постоянного тока показывают, как знания превращаются в реальные устройства, которые могут быть полезны в повседневной жизни. Они вдохновляют на дальнейшее изучение электротехники и позволяют понять, как инженеры создают технологии, которые меняют мир. Этот опыт станет для вас важным шагом на пути к будущей инженерной профессии и поможет увидеть, как ваши идеи могут воплощаться в реальность.

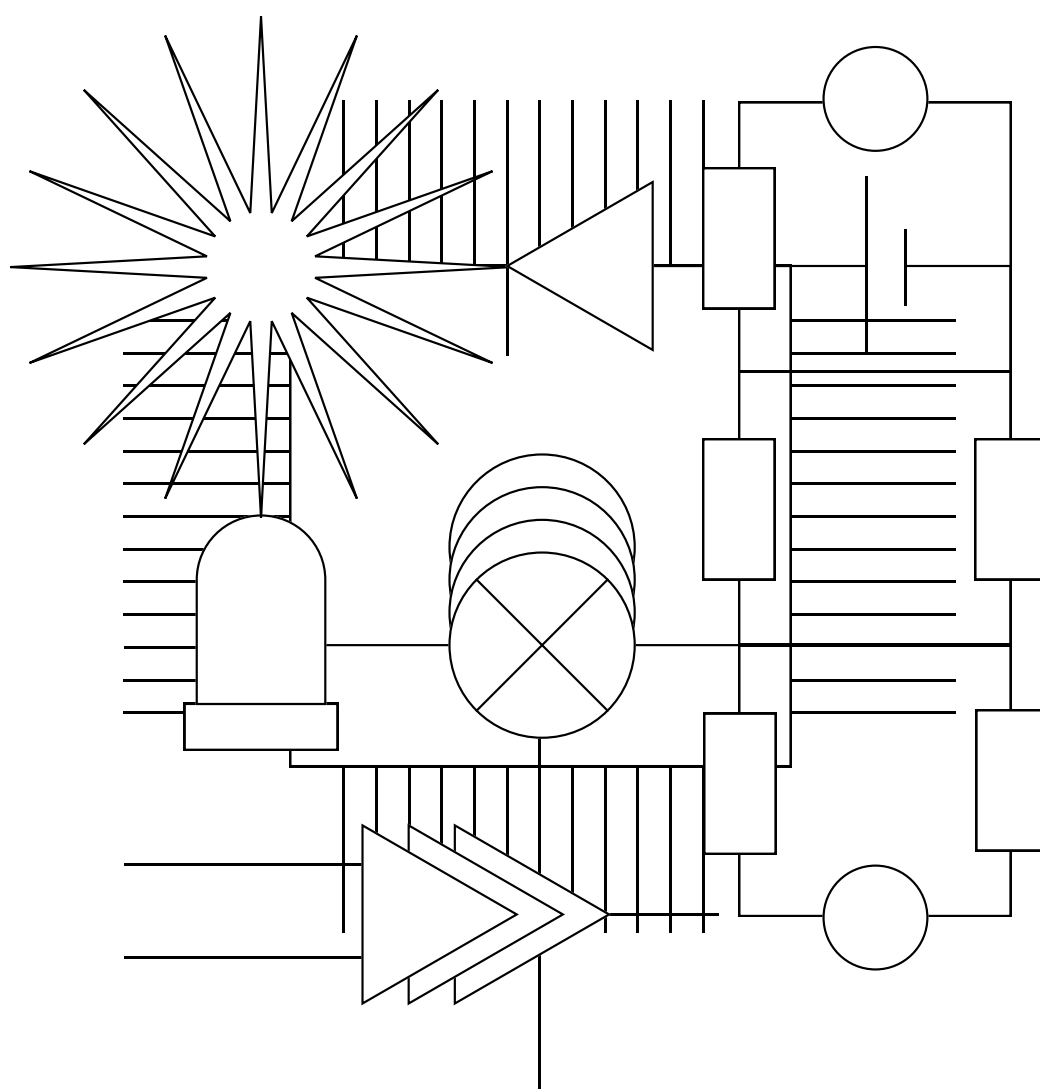
Темы проектных и исследовательских работ к разделу:

1. **Разработка точного омметра по схеме моста Уитстона.** Выполняя лабораторную работу с мостом Уитстона можно было заметить, что точность определения сопротивления в мостовой схеме напрямую зависит от точности выбранного потенциометра. В рамках проекта предлагается исследовать, как именно от точности потенциометра зависит точность результата, а также предложить способы увеличения точности с помощью 2-3 или более потенциометров.
2. **Разработка мультиметра с высокоточным амперметром на основе микроконтроллера ESP32.** При работе с электрическими схемами зачастую возникает задача измерения малых токов. Предлагается разработать схему мультиметра (приоритетно, вольтметра и амперметра), позволяющего измерять малые токи, на основе микроконтроллера ESP32 и исследовать, от чего будет зависеть его точность.
3. **Построение прототипа системы измерения уровня жидкости на основе проводимости.** Как было показано в работах раздела, существует несколько разных устройств,

использующих достаточно простые и понятные схемы включения для осуществления своей работы. Одним из таких устройств является измеритель уровня жидкости, который предлагается разработать в этом проекте. Кроме непосредственной разработки предлагается исследовать, какие параметры влияют на точность измерений в данной установке и как её можно повысить простыми средствами.

4. **Создание модели системы защиты электрической цепи от перегрузок.** Как известно, перегрузки в цепи могут приводить к излишнему нагреву её элементов, повреждениям проводов, пожарам. В связи с этим важно вовремя отключать цепь при возникновении перегрузок. В работе предлагается разработать модель системы защиты электрической цепи от перегрузок и исследовать её параметры.
5. **Исследование поведения цепей с различными источниками питания.** Как известно, источники питания, с одной стороны, все одинаковые, с другой - имеют свои особенности. В работе предлагается изучить с помощью моделирования и эксперимента поведение электрической схемы при подключении различных источников питания - батарейки, лабораторного блока питания, школьных БП постоянного тока (выпрямителя), аккумулятора и других. Предлагается ответить на несколько ключевых вопросов: Как источники питания влияют на стабильность цепи? Каково соотношение между ёмкостью источника и временем его работы? Как выбрать оптимальный источник питания для конкретных задач?.
6. **Создание модели датчика наклона на основе сопротивления.** При выполнении логистических операций, для некоторых грузов критически важно сохранять вертикальное или горизонтальное положение на всех этапах перевозки. В работе предлагается создать простейший датчик наклона в котором изменение сопротивления происходит за счёт перемещения проводника или жидкости. Таким образом можно измерить сопротивление в зависимости от угла наклона и сигнализировать о его изменении.

5 ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ В ЦИФРОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ UNITRAIN



5.1 Введение

Электроника занимает центральное место в современных ядерных технологиях, обеспечивая безопасность, стабильность и эффективность атомной энергетики и других направлений науки. Сегодня невозможно представить эксплуатацию ядерных реакторов, производство ядерных материалов и проведение научных исследований в ядерной сфере без использования сложных электронных систем и устройств. Электроника используется буквально везде, начиная от бытовых устройств, имеющих программное управление и заканчивая сложными промышленными установками и даже космическими аппаратами.

Ядерные реакторы, используемые на атомных электростанциях, представляют собой высокотехнологичные установки, где электронные системы управления играют важную роль на всех стадиях: от запуска реактора до его эксплуатации и остановки. Основной задачей таких систем является поддержание стабильного состояния реактора и управление его мощностью. Современные ядерные установки оснащены многочисленными датчиками, которые постоянно контролируют критически важные параметры реактора, такие как температура, давление, уровень радиации и нейтронный поток. Эти данные передаются на центральные системы управления, где обрабатываются компьютерами, и затем принимаются решения.

В случае отклонений от нормы системы могут автоматически активировать защитные механизмы, чтобы предотвратить аварию или минимизировать её последствия. Например, в реакторах типа ВВЭР, которые широко используются в России и за её пределами, электронные системы обеспечивают поддержание уровня воды в активной зоне реактора, управление количеством вводимых регулирующих стержней и контроль за температурой охлаждающей жидкости. Электроника помогает минимизировать человеческий фактор в ядерной энергетике. Автоматизированные системы могут принимать решения быстрее и точнее, чем человек, что особенно важно в условиях аварийных ситуаций, когда время играет решающую роль. Кроме того, с их помощью осуществляется контроль состояния оборудования и диагностика неисправностей. Современные системы мониторинга отслеживают состояние оборудования в режиме реального времени и выявляют потенциальные проблемы на ранней стадии. Это позволяет проводить профилактическое обслуживание и предотвращать поломки, которые могут привести к остановке реактора или аварийной ситуации.

Однако для корректной работы любого электронного устройства его необходимо правильно спроектировать и протестировать в условиях, приближённых к реальным, чтобы понять поведение электронной системы в различных режимах эксплуатации.

Проектирование электронных схем с использованием SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) моделирования представляет собой важный этап разработки и анализа электронных устройств. SPICE — это программа, используемая инженерами для симуляции поведения электрических схем до их физического производства, что позволяет проверять корректность работы схемы, исследовать ее поведение в различных режимах и оптимизировать параметры. Рассмотрим процесс проектирования электронных схем с ис-



**Узнать больше о
экстремальной
электронике в
космических и ядерных
технологиях**

пользованием SPICE на каждом из его этапов.

1. Постановка задачи и разработка схемы

Первым шагом в проектировании любой электронной схемы является постановка задачи. Инженер должен определить, какую функцию будет выполнять схема: усиление сигнала, фильтрация, генерация тактового сигнала и т. д. На основе этого разрабатывается топология схемы, которая включает компоненты, такие как транзисторы, резисторы, конденсаторы, источники питания и сигнала.

2. Подготовка схемы для симуляции

После того как схема разработана, ее необходимо подготовить для моделирования. Это включает создание ее виртуальной модели в SPICE или его графических интерфейсах, таких как LTspice, PSpice или SPICE-подобных программах, таких как MicroCap или DesignSoft TINA. Здесь инженер определяет компоненты схемы, их номиналы и соединения между ними.

Определение компонентов

SPICE использует библиотеку стандартных компонентов — резисторов, конденсаторов, индуктивностей, транзисторов, диодов и источников напряжения/тока. Компоненты схемы задаются текстовыми моделями, называемыми нетлистами. Каждая строка в таком файле описывает один компонент схемы и его параметры. Рассмотрим некоторые примеры таких строк.

```
R1 N001 N002 1k ; Резистор номиналом 1 кОм между узлами N001 и N002
C1 N002 GND 1uF ; Конденсатор номиналом 1 мкФ между узлом N002 и землей (GND)
V1 N001 GND DC 5 ; Источник постоянного напряжения 5 В
```

Инженер также должен задать узлы (точки соединений), которые определяют, как компоненты связаны между собой. Это делается с помощью номера узла (например, «N001», «GND»). **Определение моделей полупроводников**

Если схема содержит сложные компоненты, такие как транзисторы, инженер должен выбрать соответствующие модели транзисторов (например, MOSFET или BJT), которые предоставляют более детализированное описание поведения полупроводников. Эти модели могут включать нелинейные параметры, например, пороговое напряжение, насыщение и температурные зависимости.

3. Задание условий симуляции

После того как схема смоделирована, необходимо задать условия для ее симуляции. В SPICE моделировании существуют несколько типов анализа, которые можно применить к схеме в зависимости от цели исследования.

- **DC-анализ (анализ постоянного тока)** — используется для изучения постоянных режимов работы схемы, таких как режимы смещения транзисторов или операционных усилителей.

```
.DC V1 0 10 0.1 ; Постепенное увеличение источника напряжения V1 от 0 до 10 В с шагом 0.1 В
```

- **AC-анализ (анализ переменного тока)** — позволяет исследовать частотные характеристики схемы. Он используется для анализа усилителей, фильтров и других схем, работающих на высоких частотах.

.AC DEC 10 10 100k ; AC-анализ с декрементом 10 точек на декаду в диапазоне от 10 Гц до 100 кГц

- **Анализ переходных процессов (Transient)** — оценивает поведение схемы во времени, что особенно важно для схем с переключением, импульсными источниками или схем с динамическими процессами.

.TRAN 1u 10m ; Анализ переходных процессов (Transient) с шагом 1 мкс на протяжении 10 мс

- **Тепловой анализ** — используется для моделирования тепловых эффектов в компонентах, таких как увеличение сопротивления при нагреве или изменение параметров полупроводников.

4. Выполнение симуляции

После задания схемы и условий анализа симуляция может быть запущена. SPICE выполняет численные расчеты на основе уравнений Кирхгофа и моделей компонентов. Процесс моделирования включает несколько этапов:

- Составление системы уравнений на основе топологии схемы (например, уравнений напряжений и токов).
- Решение системы уравнений для различных временных шагов или частот (в зависимости от типа анализа).
- Вывод данных, таких как напряжение и токи в узлах схемы.

5. Анализ результатов

Результаты моделирования представляются в виде графиков или таблиц. Например, можно построить график зависимости напряжения на выходе схемы от времени или частоты, чтобы оценить ее характеристики. SPICE позволяет строить такие графики автоматически.

- Анализ переходных процессов – графики сигналов во времени (например, импульсные отклики, напряжения и токи).
- AC-анализ – амплитудно-частотные характеристики, показывающие, как схема реагирует на сигналы разной частоты.
- DC-анализ – статические характеристики, например, вольт-амперные зависимости для активных компонентов.
- Инженер может исследовать, как изменения параметров компонентов влияют на поведение схемы, что даёт возможность оптимизировать её работу.

6. Оптимизация и корректировка схемы

Если результаты симуляции показывают, что схема не работает так, как планировалось, инженер может изменить параметры компонентов или топологию схемы и повторить

симуляцию. Например, можно варьировать значения резисторов, конденсаторов или параметры транзисторов для достижения оптимальных характеристик. SPICE также поддерживает параметрические исследования, которые позволяют автоматически варьировать один или несколько параметров схемы и анализировать влияние этих изменений на результат.

7. Валидация и подготовка к производству

Когда симуляция подтверждает корректность работы схемы, следующий шаг — это валидация. На этом этапе могут использоваться другие симуляции, такие как тепловое моделирование или проверка на электромагнитные помехи (ЕМС). После успешной симуляции схема может быть подготовлена для физической реализации, включая проектирование печатной платы (PCB) и выбор реальных компонентов.

Преимущества использования SPICE моделирования

- **Снижение затрат:** Моделирование позволяет выявить ошибки на ранних стадиях разработки, избегая затрат на производство неисправных прототипов.
- **Быстрая оптимизация:** Инженеры могут легко изменять параметры схемы и видеть результаты сразу, что ускоряет процесс проектирования.
- **Точное предсказание:** SPICE моделирование учитывает нелинейные эффекты и взаимодействия между компонентами, что делает результаты максимально приближенными к реальным.
- **Гибкость:** Возможность моделирования как аналоговых, так и цифровых схем, а также схем с совместными сигналами (Mixed-Signal).

SPICE моделирование является неотъемлемым инструментом современного проектирования электронных схем, позволяя инженерам разрабатывать высокоэффективные устройства с минимальными затратами времени и ресурсов. В этом разделе пособия вы сможете познакомиться с элементами SPICE моделирования на примере программы Micro Cap 12, а также провести проверку реализации ваших схем на лабораторном модуле с интерактивной лабораторной платформой (ЛМИЛ) UniTrain-II. Предлагаемые в блоке лабораторные работы можно также реализовать с помощью практически любой системы сбора данных, позволяющей измерять ток и напряжение в некотором диапазоне величин, в том числе реализовать измерительную систему на микроконтроллере типа Arduino пользуясь материалами из кейса 3.

5.2 Лабораторная работа №12 Изучение NTC и PTC терморезисторов

Цель работы: Изучить явление изменения сопротивления проводника под воздействием температуры и измерить ВАХ NTC и PTC терморезисторов.

Введение

Терморезистор (термистор) — полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется в зависимости от его температуры. Обозначение терморезистора на электронных схемах приведено на рисунке 5.1.

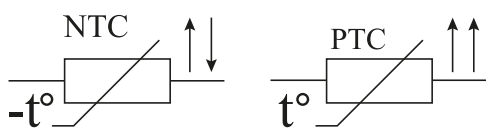


Рис. 5.1: Обозначение терморезистора на схемах

Основная характеристика терморезистора — это его температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Он показывает, на какую величину изменяется сопротивление терморезистора при изменении температуры на 10°C (1°) или 1. Терморезисторы изготавливаются из материалов с высоким ТКС, который обычно на порядки выше, чем ТКС металлов и металлических сплавов.

Различают терморезисторы с отрицательным ТКС (Negative Thermal Coefficient NTC), сопротивление которых падает с возрастанием температуры, часто называемые термисторами, и терморезисторы с положительным ТКС (Positive Thermal Coefficient — PTC), сопротивление которых увеличивается с возрастанием температуры. Такие терморезисторы называются позисторами. Терморезисторы обоих типов изготавливаются из полупроводниковых материалов.

NTC изготавливаются из оксидов металлов с незаполненными электронными уровнями, и при достаточно низких температурах обмен электронами соседних ионов затрудняется, при этом электропроводность вещества мала. Если температура увеличивается, то электроны приобретают энергию в виде тепла, процесс обмена ионов электронами становится интенсивнее, поэтому резко увеличивается подвижность носителей заряда. На сопротивление полупроводника оказывает влияние температура (Рис. 5.2). Если температура подходит к абсолютному нулю, то полупроводник имеет свойство диэлектрика. При сильном нагревании он идеально проводит ток. Основной особенностью терморезистора является то, что его сопротивление наиболее заметно зависит от температуры в обычном интервале температур ($-50^{\circ} \div +100^{\circ}$).

Терморезисторы с положительным ТКС можно разделить на 2 группы:

1. Терморезисторы из полупроводникового материала (обычно Si) в форме небольших пластин с двумя выводами на противоположных сторонах. Их применение основано на том, что легированные кристаллы Si (кремния) как n-, так и p- типа имеют положительный ТКС

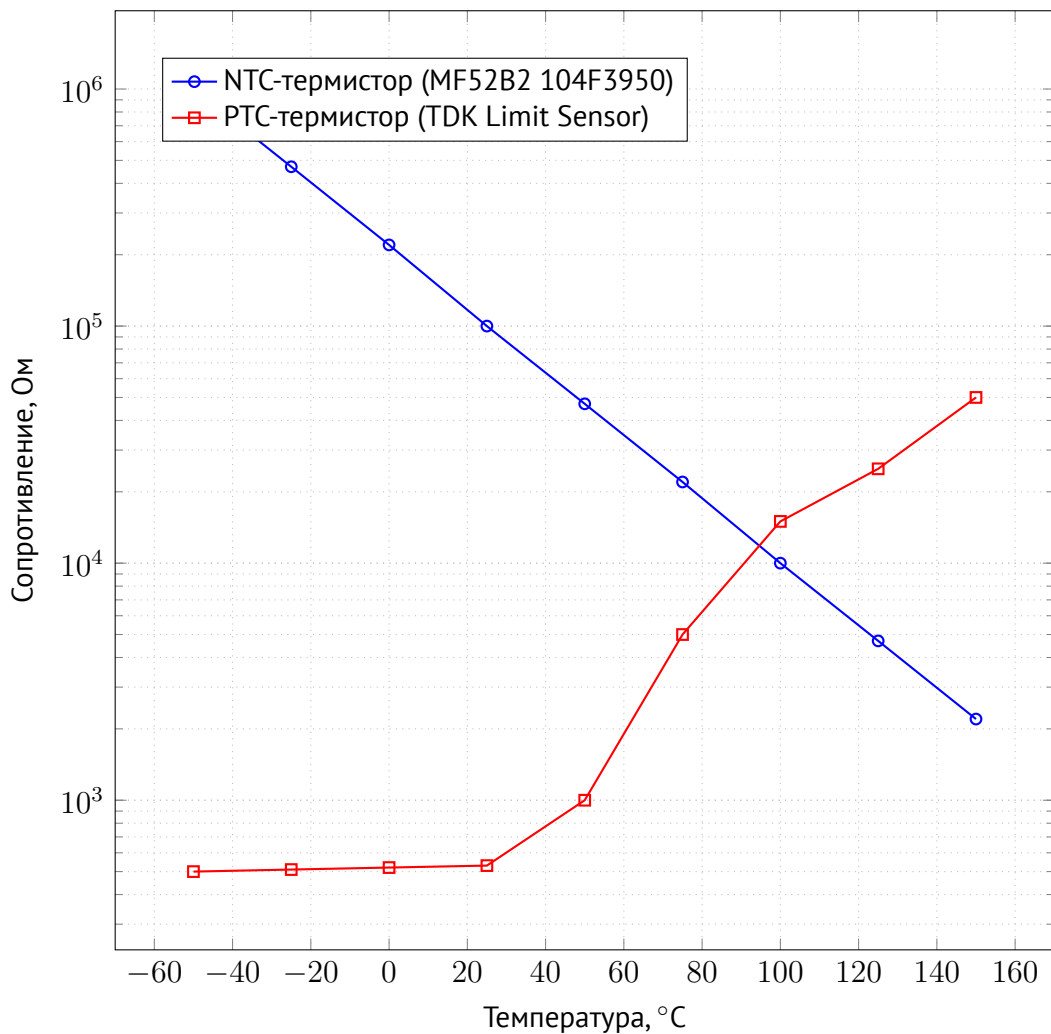


Рис. 5.2: Зависимость сопротивления от температуры для NTC и PTC термисторов. Источники данных: TME. NTC Thermistor MF52 Series Datasheet, TDK. PTC Limit Temperature Sensors Datasheet.

при температуре от криогенных до 150°C и выше, причем ТКС при комнатной температуре примерно равен $0,8\%$ на 1°C .

2. Терморезисторы с большим ТКС (до 70% на 1°C), но в более ограниченном диапазоне температур. Материалом в данном случае является поликристаллический полупроводниковый титанат бария с большим изменением ТКС при температуре 120°C , соответствующей сегнетоэлектрической точке Кюри этого материала. Добавляя другие материалы, например титанат свинца или стронций, такое изменение ТКС можно получить при температурах от -100° до $+250^{\circ}$. Можно также изменить наклон кривой сопротивления так, что большое изменение температур будет происходить в более узком интервале температур, например $0 \div 100^{\circ}\text{C}$.

Описание установки

В работе изучаются терморезисторы с положительным и отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. В первой части работы производится снятие статической характеристики терморезистора с отрицательным ТКС. Во второй части работы про-

изводится изучение изменения сигнала на терморезисторе с положительным ТКС при его нагреве. Для изучения NTC-резистора используется схема, приведенная на рисунке 3а, для РТС – на рисунке 3б.

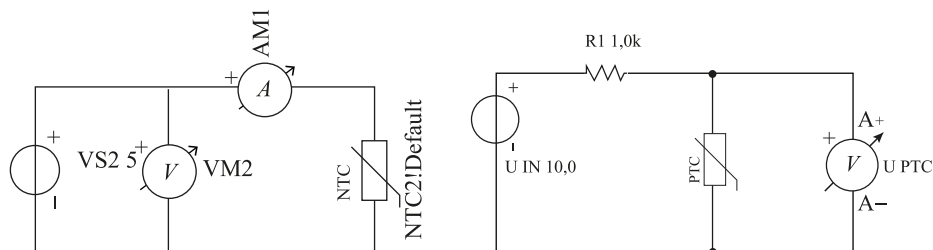


Рис. 5.3: Схемы для измерения характеристик NTC (слева) и РТС (справа) термисторов

Порядок выполнения работы

Задание 1. Изучение NTC-терморезистора

1. Соберите на макетной плате схему для измерений статической характеристики термистора (Рис. 5.3 слева). Для подключения вольтметра используйте клеммы "А" на макете, а для подключения амперметра – клеммы "В". Обратите внимание, что через клеммы "В" амперметр подключается в схему через шунтирующее сопротивление 10 . Подключение амперметра без шунта можно реализовать через клеммы "Е" или "F".
2. Откройте параметры источника питания и установите на нем величину напряжения 10 . На измерительных приборах установите необходимый предел измерения и режимы работы AV и DC.
3. Определите ток и напряжение на «холодном» терморезисторе. Запишите результаты измерений в таблицу 5.1.

Таблица 5.1: Измерения "холодного" терморезистора

$U_{\text{хол}}, \text{В}$		$U_{\text{гор}}, \text{В}$	
$I_{\text{хол}}, \text{мА}$		$I_{\text{гор}}, \text{мА}$	

4. Нагрейте терморезистор, зажав его между пальцами, и добейтесь стабилизации тока и напряжения на терморезисторе. Запишите значения тока и напряжения на резисторе в «горячем» состоянии.
5. Снимите вольт-амперную характеристику терморезистора, изменяя напряжение питания от 0,5 до 5 с шагом 0,5 . Между каждым измерением должно пройти не меньше минуты. Запишите результаты в таблицу 5.2.
6. Постройте график вольт-амперной характеристики терморезистора.

Таблица 5.2: Измерения ВАХ терморезистора

$U, \text{В}$										
$I, \text{мА}$										

7. Сделайте вывод о принципе работы NTC-терморезистора.

Задание 2. Изучение PTC-терморезистора

1. Соберите на макетной плате схему для измерений статической характеристики термистора (Рис. 5.3 справа). В качестве вольтметра в данной работе будет использован осциллограф. Для его подключения используются клеммы "А" измерительного стенда.
2. Откройте параметры источника питания и установите на нем величину напряжения 10 . На осциллографе установите следующие параметры:
 - Volts/div: 1 V
 - DC
 - Time/div: 2 s
 - Mode: X/T
 - Trigger: OFF
3. Включите источник питания и наблюдайте на осциллографе картину напряжения.
4. Нагрейте терморезистор, зажав его между пальцами. Добейтесь качественного изменения картины напряжения на осциллографе. Зарисуйте полученную осциллограмму в тетрадь и измерьте её характеристики.
5. Сделайте вывод о принципе работы PTC терморезистора.
6. Напишите заключение к работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое ТКС? В чем его физический смысл?
2. Какие материалы могут использоваться для изготовления терморезисторов?
3. Приведите пример использования терморезистора в быту или промышленности. Нарисуйте схему предлагаемого устройства.

Литература

1. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк.с углубл. изучением физики / Под. ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина. – М. Просвещение, 2011.
2. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Чаругин В.М. Физика-11. М.:Просвещение, 2014.

3. Королев Н.А., Огороков В.А., Тимошенко С.Л. Обработка результатов измерений: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017.
4. Кембровский Г.С. Приближенные вычисления, методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в физике. – М.: Оракул, 1997.
5. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики: профил. уровень / О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов, Э.Е. Эвенчик и др. под ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина; Рос. акад. наук, Рос. акад. образования, изд-во «Просвещение». – 13-е изд.– М.:Просвещение, 2011.

5.3 Лабораторная работа №13 Измерение характеристик фоторезистора

Цель работы: изучение принципов работы фоторезистора, определение темнового сопротивления резистора.

Введение

Фоторезистор (фотосопротивление, LDR) – это элемент, электрическое сопротивление которого изменяется под влиянием световых лучей, падающих на светочувствительную поверхность, и не зависит от приложенного напряжения, как у обычного резистора. Фоторезисторы чаще всего используются для определения наличия или отсутствия света или для измерения интенсивности света. В темноте их сопротивление очень высокое, иногда достигает до 1 М, но когда датчик LDR подвергается воздействию света, его сопротивление резко падает, вплоть до нескольких десятков ом в зависимости от интенсивности света.



Рис. 5.4: Пример фоторезистора

Фоторезисторы имеют чувствительность, зависящую от длины волны света. Они используются во многих устройствах, хотя уступают по своей популярности фотодиодам и фототранзисторам. На основании материалов, используемых при производстве, фоторезисторы могут быть разделены на две группы:

- с внутренним фотоэффектом
- с внешним фотоэффектом.

В производстве фоторезисторов с внутренним фотоэффектом используют нелегированные материалы, такие как кремний или германий. Принцип работы фоторезистора заключается в следующем. Фотоны, которые попадают на устройство, заставляют электроны перемещаться из валентной зоны в зону проводимости. В результате этого процесса появляется большое количество свободных электронов в материале, тем самым улучшается электропроводность и, следовательно, уменьшается сопротивление.

Фоторезисторы с внешним фотоэффектом производятся из материалов, с добавлением примеси, называемой легирующей добавкой. Легирующая добавка создает новую энергетическую зону поверх существующей валентной зоны, заселенную электронами. Им требуется меньше энергии, чтобы совершить переход в зону проводимости благодаря меньшей энергетической щели. Результат этого состоит в том, что фоторезистор чувствителен к различным длинам волн света.

Оба типа демонстрируют уменьшение сопротивления при освещении. Чем выше интенсивность света, тем больше падает сопротивление. Следовательно, сопротивлением фоторезистора является обратная, нелинейная функция интенсивности света. Фоторезистор на схемах обозначается следующим образом:

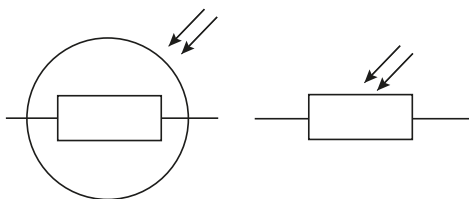


Рис. 5.5: Обозначение фоторезистора на схемах

Чувствительность фоторезистора зависит от длины волны света. Если длина волны находится вне рабочего диапазона, то свет не будет оказывать никакого действия на LDR. Можно сказать, что LDR не чувствителен в этом диапазоне длин волн света. Различные материалы имеют различные уникальные спектральные кривые отклика волны, по сравнению с чувствительностью. Внешне светозависимые резисторы, как правило, предназначены для больших длин волн с тенденцией в сторону инфракрасного (ИК).

При работе в ИК-диапазоне необходимо соблюдать осторожность, чтобы избежать перегрева. Это явление может повлиять на измерения из-за изменения сопротивления фоторезистора от теплового эффекта. На рисунке 5.6 показана спектральная характеристика фотопроводящих детекторов, изготовленных из различных материалов.

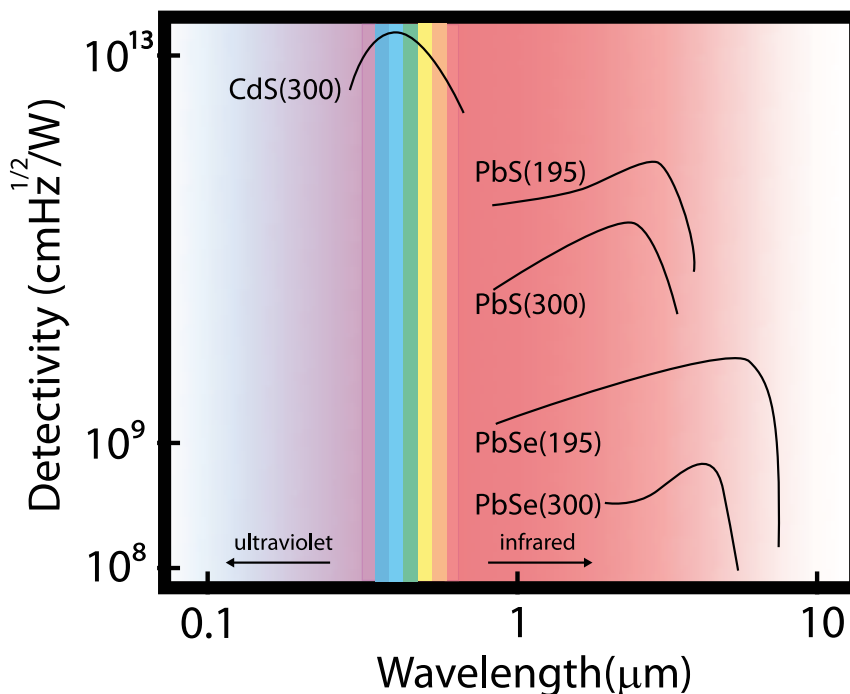


Рис. 5.6: Зависимость пороговой чувствительности от длины волны для различных материалов фоторезисторов

В фоторезисторах существует инертность (время задержки) между изменениями в освещении и изменением сопротивления. Для того чтобы сопротивление упало до минимума при полном освещении необходимо около 10 и около 1 для того, чтобы сопротивление

фоторезистора возросло до максимума после его затемнения. Таким образом, LDR не может использоваться в устройствах, где необходимо учитывать резкие перепады освещения.

Фоторезисторы чаще всего используются в качестве датчиков света, когда требуется определить наличие или отсутствие света или зафиксировать интенсивность света. Примерами являются автоматы включения уличного освещения и фотоэкспонетры.

Описание установки

Приборы и принадлежности: измерительный стенд, резистор, фоторезистор, лампа накаливания, компьютер с установленным ПО.

В работе будет изучаться фоторезистор на основе внутреннего фотоэффекта. Собрав схему, состоящую из источника питания, фоторезистора, нагрузочного сопротивления и вольтметра (Рис. 5.7), необходимо провести измерение темнового сопротивления, перекрыв доступ света в резистор, а также сопротивления резистора при различной интенсивности освещения.

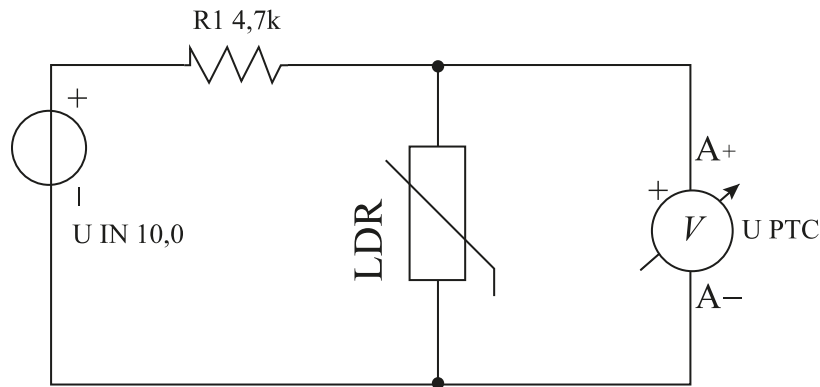


Рис. 5.7: Схема эксперимента

Интенсивность освещения будет регулироваться напряжением на лампе накаливания. По результатам измерений будет построена зависимость сопротивления фоторезистора от напряжения на лампе накаливания. Для измерений необходимо закрыть лампу и фоторезистор негорючим и не проводящим темным материалом (например, коробкой) для исключения фонового освещения в помещении. С помощью дополнительных проводов можно вынести макетную плату за пределы измерительного стенда для удобства затемнения.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Измерение характеристик фоторезистора

1. Зарисуйте в лабораторном журнале таблицу 5.3 для выполнения эксперимента.
2. Соберите на макетной плате схему, представленную на рисунке 5.7.
3. Подключите провода вольтметра к выходу "А" и к выходу "В" провода амперметра. Обратите внимание, что сопротивление 4,7 кОм является шунтом для амперметра.
4. Подключите источник питания к схеме через выходы «S» и «Земля».

Таблица 5.3: Измерение темновых характеристик фоторезистора

№ измерения	I , мА	U , В	$R_{\text{темн}}$, Ом
1			
2			
3			
Среднее значение $\pm$ погрешность			

- Откройте в среде VI-Starter измерительные приборы. Установите режим измерения «AV» и «DC», диапазон измерения 10 В для вольтметра и 4 мА для амперметра.
- Откройте в среде VI-Starter источник постоянного напряжения и установите на нем значение 10 В.
- Закройте ладонью окно фоторезистора так, чтобы свет не попадал на детектор. Проведите измерения тока и напряжения в цепи три раза. Результаты занесите в таблицу 5.3.
- Установите на фоторезистор крышку с встроенной лампой. Подключите лампу к выходам «V1» и «COM» стенда.
- Откройте в среде VI-Starter дополнительный источник питания. Убедитесь, что лампа разгорается при напряжении 1 В.
- Проведите измерения зависимости тока и напряжения в цепи фоторезистора от напряжения на лампе в диапазоне от 0 до 5 В. Получите 10 экспериментальных точек с равными промежутками между измерениями. Результаты занесите в таблицу 5.4.

Таблица 5.4: Измерение зависимости сопротивления от напряжения на лампе накаливания

$I_{\text{фр}}$, мА										
$U_{\text{фр}}$, В										
R , Ом										
$U_{\text{ламп}}$, В										

- По результатам измерений п. 7 рассчитайте значение темнового сопротивления фоторезистора.
- По результатам измерений п. 10 постройте график зависимости сопротивления фоторезистора от напряжения на лампе накаливания.

13. Напишите заключение к работе.

Расчетные формулы

$$\langle I \rangle = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}, \quad \Delta I = \max \left\{ \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2}; \Delta I_{\text{приб}} \right\}$$

$$\langle U \rangle = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2}, \quad \Delta U = \max \left\{ \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2}; \Delta U_{\text{приб}} \right\}$$

$$R = \frac{U}{I}, \quad \Delta R = R \sqrt{E_I^2 + E_U^2}$$

Контрольные вопросы

1. Что такое фоторезистор? Сформулируйте принцип работы фоторезистора.
2. Какой вид имеет зависимость сопротивления фоторезистора от интенсивности падающего света?
3. Что такое темновое сопротивление?
4. Можно ли использовать фоторезистор в качестве точного датчика освещенности?

Литература

1. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики / Под. ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина. – М. Просвещение, 2011.
2. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Чаругин В.М. Физика-11. М.: Просвещение, 2014.
3. Королев Н.А., Огороков В.А., Тимошенко С.Л. Обработка результатов измерений: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017.
4. Кембровский Г.С. Приближенные вычисления, методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в физике. – М.: Оракул, 1997.
5. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики: профил. уровень / О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов, Э.Е. Эвенчик и др. под ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина; Рос. акад. наук, Рос. акад. образования, изд-во «Просвещение». – 13-е изд. – М.: Просвещение, 2011.

5.4 Лабораторная работа №14 Изучение явления резонанса в последовательном колебательном контуре

Цель работы: определение резонансной частоты электрического колебательного контура.

Введение

Электрический колебательный контур представляет собой последовательно соединенные резистор с сопротивлением R , катушку с индуктивностью L и конденсатор емкостью C (рис. 5.8).

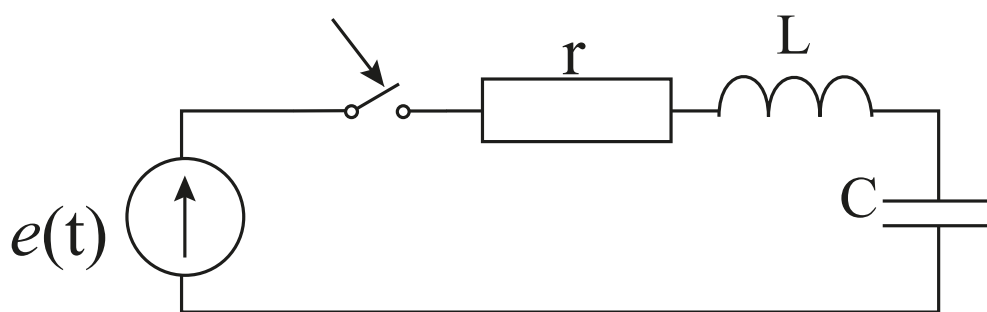


Рис. 5.8: Простой колебательный контур

Если к контуру подключить источник переменного тока, электродвижущая сила (ЭДС) которого меняется по гармоническому закону $\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t$, то в контуре будут происходить вынужденные электрические колебания с круговой частотой ω (с частотой ЭДС).

Амплитуда тока в контуре I_m связана с амплитудой переменной ЭДС соотношением:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{Z},$$

где величина Z , стоящая в знаменателе, является полным сопротивлением контура.

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2},$$

здесь R – активное сопротивление контура, X – реактивное сопротивление контура.

Соотношение для I_m называют законом Ома для амплитуд переменного тока. Из формул выше следует, что при выполнении условия

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0,$$

амплитуда тока I_m достигает своего максимального значения, поскольку Z уменьшается до минимума, равного активному сопротивлению R . При этом возникает резонанс, а соответствующее значение частоты внешней ЭДС называется резонансной частотой

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

Нетрудно видеть, что резонансная частота совпадает с частотой собственных колебаний в контуре ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Кривую зависимости амплитуды тока от частоты внешней ЭДС называют резонансной кривой или резонансной характеристикой данного контура. На рис. 5.9 приведены резонансные кривые для заданных значений L и C и для различных значений активных сопротивлений контура. Чем меньше активное сопротивление R контура, тем больше амплитуда тока при резонансе и тем острее выражен максимум на резонансной кривой. Однако само положение резонанса на оси частот не зависит от R .

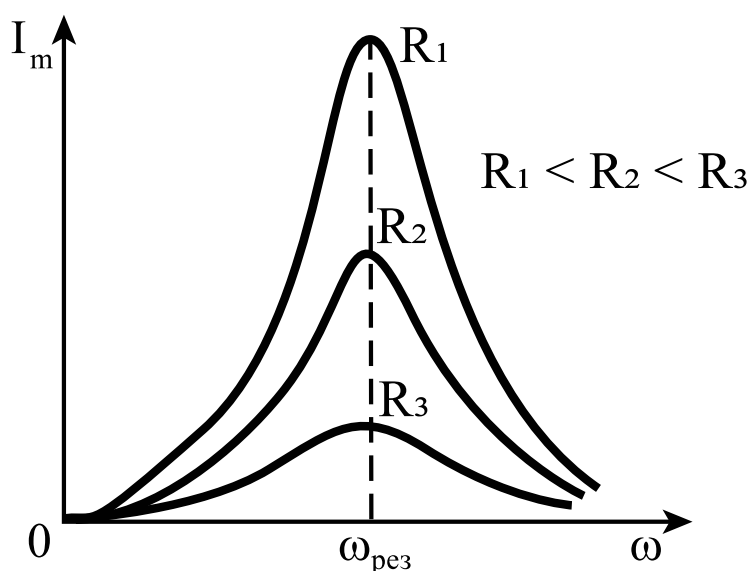


Рис. 5.9: Резонансные кривые

Напряжение на активном сопротивлении R , как и ток в контуре, меняется по гармоническому закону, причем значение амплитуды напряжения U_m связано с амплитудой тока соотношением $U_m = I_m R$.

Следовательно, резонансная кривая для амплитуды напряжения на активном сопротивлении имеет такой же вид, как и для амплитуды тока, то есть максимальное значение амплитуды напряжения на активном сопротивлении достигается при совпадении частоты внешней ЭДС с частотой собственных колебаний контура:

$$\omega = \omega_0$$

Явление увеличения амплитуды колебаний напряжения при настройке контура в резонанс с источником колебаний широко используется в радиотехнике: в схемах радиоприемников, усилителей, генераторов высокочастотных колебаний.

Описание установки

Приборы и принадлежности: набор резисторов, набор конденсаторов, набор индуктивностей, измерительный стенд UniTrain, макетная плата, провода для подключения стенда.

Исследование явления резонанса в электрическом колебательном контуре производится с помощью схемы, изображенной на рис. 5.10.

Источником переменной ЭДС, меняющейся по гармоническому закону, является генератор низкочастотных электрических колебаний (ГНЧ). Амперметр A служит для измерения тока в электрической цепи, а вольтметр V определяет падение напряжения на сопротивлении R . Частота генератора связана с круговой частотой соотношением:

$$\omega = 2\pi\nu$$

Изменяя частоту сигнала, подаваемого с генератора колебаний, измеряют силу тока в цепи $I(\nu)$ и падение напряжения $U(\nu)$ на сопротивлении R (для заданных значений L , C и R). Строят зависимости $I(\nu)$ и $U(\nu)$ для двух разных значений R и по графикам определяют ν .

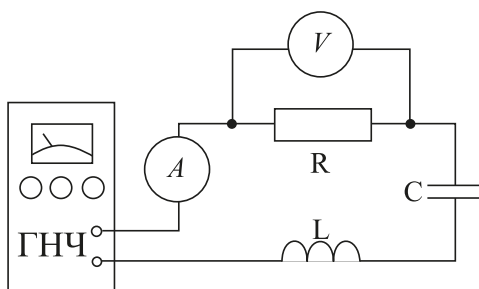


Рис. 5.10: Принципиальная схема макета

Порядок выполнения работы

Задание 1. Изучение зависимостей $I = f(\nu)$ и $U = f(\nu)$

1. Рассчитайте теоретическое значение резонансной частоты по формуле:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Значения L и C выбираются самостоятельно из доступных электронных компонент.

2. Соберите на макетной плате схему согласно рис. 5.10.
3. Установите на макетной плате сопротивление номиналом $R_1 = 100$ Ом.
4. В программе VI-Starter откройте измерительные приборы: вольтметр, амперметр. Установите вольтметр для измерения переменного (АС " ~ ") напряжения.
5. Установите на амперметре шунтирующее сопротивление 10 Ом. Выберите предел измерения амперметра ~ 20 мА.

6. Откройте в среде VI-Starter Генератор функций. Установите на генераторе значение амплитуды 20–25% и вид функции «SIN». Установите частотный диапазон «10 кГц».
7. Снимите зависимости $I = f(\nu)$ и $U = f(\nu)$. Для этого увеличивая постепенно частоту генератора, найдите максимальное значение тока по амперметру (резонанс). Затем, изменяя частоту в большую и меньшую сторону от резонансной, проведите измерения токов I и напряжений U в зависимости от частоты с шагом 1 кГц (не менее 5 измерений в каждую сторону). После этого проведите измерения на еще нескольких частотах с шагом 2–5 кГц, чтобы охватить диапазон от $0,7\nu_{\text{рез}}$ до $1,5\nu_{\text{рез}}$. Результаты запишите в таблицу 5.5.

Таблица 5.5: Измерение резонансной кривой для сопротивления $R = 100\text{Ом}$

ν , кГц												
I , мА												
U , В												

8. Установите на макетной плате сопротивление $R_2 = 200$, и повторите измерения п.7. Результаты запишите в таблицу 5.6. По окончании измерений выключите приборы.

Таблица 5.6: Измерение резонансной кривой для сопротивления $R = 200\text{Ом}$

ν , кГц												
I , мА												
U , В												

9. По полученным данным постройте графики зависимостей силы тока от частоты генератора $I = f(\nu)$ для обоих значений сопротивления R_1 и R_2 . Построение рекомендуется выполнять на одном листе/экране. Сравните обе кривые. По графикам определите экспериментальное значение резонансной частоты. Погрешность частоты определяется погрешностью генератора функций.
10. Постройте графики зависимостей силы тока от частоты генератора $U = f(\nu)$ для обоих значений сопротивления R_1 и R_2 . Построение рекомендуется выполнять на одном листе/экране. Сравните обе кривые. По графикам определите экспериментальное значение резонансной частоты. Погрешность частоты определяется погрешностью генератора функций.

Задание 2. Построение теоретических резонансных кривых методом моделирования в MicroCap

1. Запустите программу MicroCap 12. Установите отображение сетки выбором элемента на панели инструментов или через следующий путь: **Options** -> **View** -> **GridBold6**.

2. Добавьте на рабочее поле резистор пользуясь элементом на панели инструментов или через следующий путь: **Component** -> **Analog Primitives** -> **Passive Components** -> **Resistor**.
3. В открывшемся окне свойств резистора установите величину сопротивления в Омах в элементе **RESISTANCE**.
ВАЖНО! В случае необходимости можно использовать кратные и дольные приставки для обозначения величины сопротивления ("к" - кило, "М" - мега, "м" - милли, "у" - микро, "н" - нано, "р" - пико)
4. Добавьте на рабочее поле резистор пользуясь элементом на панели инструментов или через следующий путь: **Component** -> **Analog Primitives** -> **Passive Components** -> **Capacitor**.
5. В открывшемся окне свойств резистора установите величину емкости в Фарадах в элементе **CAPACITANCE**.
6. Добавьте на рабочее поле резистор пользуясь элементом на панели инструментов или через следующий путь: **Component** -> **Analog Primitives** -> **Passive Components** -> **Inductor**.
7. В открывшемся окне свойств резистора установите величину индуктивности в Генри в элементе **INDUCTANCE**.
8. Добавьте в схему источник питания (генератор синусоидального сигнала) пользуясь элементом с панели инструментов или через следующий путь: **Component** -> **Analog Primitives** -> **Waveform Sources** -> **Sine Source**. Установите параметры источника аналогично предыдущему заданию.
9. Включите режим **Wire Mode** на панели инструментов или сочетанием клавиш **Ctrl+W**.
10. Соедините установленные элементы цепи между собой. Установите заземление в цепи (для формирования точки отсчета).
11. В разделе **Analysis** выберите элемент **AC**. Установите следующие параметры анализа:
 - **Frequency Range** – В соответствии с ожидаемой резонансной частотой в диапазоне сотен Гц в положительную и отрицательную сторону от резонансной частоты. Указывается в формате **fmax, fmin**.
 - **P** – Указывается как будет построен график (в какой группе графиков). Для отображения графиков на разных листах укажите в одной строке - 1, а в другой - 2.
 - **X Expression** – F – Указывается, что по оси X будет расположена частота.
 - **Y Expression** – Для первого графика V(R1) - по оси Y будет указываться напряжение на сопротивлении R1. Для второго графика I(R1) - по оси Y будет указываться ток в цепи.
12. Для сохранения теоретических данных в текстовом формате выберите элемент **Numeric output** в разделе настроек графика.
13. Нажмите на кнопку **Run** для запуска моделирования. В случае, если у вас не отобразился резонансный пик на графике, подберите соответствующее значение частоты, чтобы пик отображался.

14. Сравните экспериментально полученные значения с теоретическими. Убедитесь в том, что при резонансной частоте и $R = \text{const}$ ток и напряжение связаны между собой соотношением $U = IR$.
15. Напишите заключение к работе.

Контрольные вопросы

1. При каком условии наступает резонанс в электрическом колебательном контуре?
2. Как определяется резонансная частота?
3. От чего зависит амплитуда силы тока в контуре при резонансе?
4. Что такое резонансная кривая? Как меняется резонансная кривая при различных активных сопротивлениях контура?

Литература

1. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики / Под. ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина. – М. Просвещение, 2011.
2. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Чаругин В.М. Физика-11. М.:Просвещение, 2014.
3. Королев Н.А., Окороков В.А., Тимошенко С.Л. Обработка результатов измерений: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017.
4. Кембровский Г.С. Приближенные вычисления, методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в физике. – М.: Оракул, 1997.
5. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики: профил. уровень / О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов, Э.Е. Эвенчик и др. под ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина; Рос. акад. наук, Рос. акад. образования, изд-во «Просвещение». – 13-е изд. – М.:Просвещение, 2011.

5.5 Лабораторная работа №15 Изучение выпрямляющих свойств полупроводниковых диодов

Цель работы: исследование схем однофазных однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей; анализ влияния различных факторов на характеристики выпрямителей.

Введение

Для преобразования переменного напряжения питающей сети в постоянное чаще всего используются полупроводниковые выпрямители. Структурная схема однофазного выпрямительного устройства (Рис. 5.11) состоит из трансформатора, выпрямительного блока, сглаживающего фильтра и стабилизатора.

Трансформатор (Тр) предназначен для изменения уровня переменного напряжения и гальванической развязки выпрямителя и питающей сети. Выпрямитель преобразует переменное напряжение синусоидальной формы в пульсирующее напряжение одной полярности. Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации на выходе выпрямителя. Стабилизатор поддерживает выпрямленное напряжение на заданном фиксированном уровне при различных отклонениях на входе вторичного источника питания. В зависимости от условий работы и требований, предъявляемых к выпрямительным устройствам, отдельные его блоки могут отсутствовать.

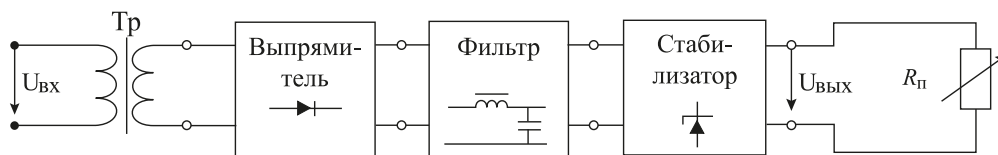


Рис. 5.11: Структурная схема источника вторичного питания

Однополупериодный выпрямитель

Схема однополупериодного выпрямителя представляет собой диод, включенный последовательно с нагрузкой (рисунок 5.12). При рассмотрении работы выпрямителя примем, что диод идеальный, т.е. его сопротивление в прямом направлении равно нулю, а в обратном направлении бесконечно велико. В этом случае ток в положительном направлении проходит в нагрузку без потерь, а в отрицательную весь «падает» на диоде.

Одним из основных параметров, характеризующих выпрямитель, является коэффициент пульсаций q . **Двухполупериодный мостовой выпрямитель** Схема двухполупериодного выпрямителя приведена на рисунке 5.13. В этом случае при положительной полуволне входного напряжения работает цепочка $VD1 - R_H - VD3$, а при отрицательной $VD2 - R_H - VD4$. Сопоставляя направление тока при разных полуволнах входного сигнала с заданным направлением тока в нагрузке, можем утверждать, что форма тока (напряжения) на нагрузке соответствует форме двухполупериодного выпрямления. Для двух схем выпрямления коэффициенты пульсаций составляют 1,57 и 0,67 соответственно.

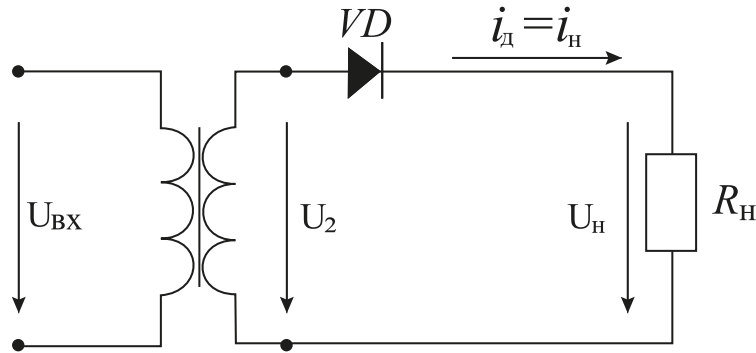


Рис. 5.12: Схема однополупериодного выпрямителя

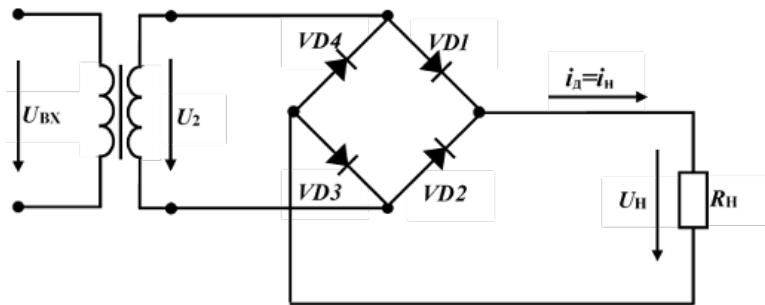


Рис. 5.13: Схема двухполупериодного выпрямителя

Для уменьшения уровня пульсаций, а также для повышения среднего значения выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя включается сглаживающий фильтр. Простейшим вариантом фильтра является C -фильтр (рис. 5.14), сглаживание в котором происходит за счет периодической зарядки конденсатора C (когда напряжение на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение на нагрузке) и последующей его разрядки на сопротивление нагрузки. Для подобных устройств чем больше время разрядки на сопротивление, тем ближе выходное напряжение к прямой линии. Эффективность фильтра может быть оценена коэффициентом сглаживания

$$K_{\text{сгл}} \approx \frac{q_{\text{вх}}}{q_{\text{вых}}}$$

где $q_{\text{вх}}$ - коэффициент пульсаций схемы до включения фильтра, $q_{\text{вых}}$ - коэффициент пульсаций схемы с фильтром.

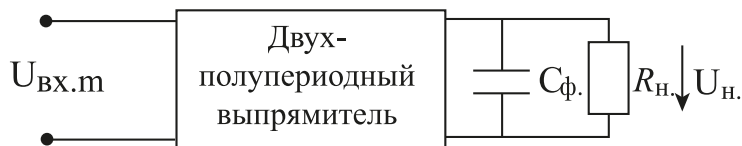


Рис. 5.14: Схема двухполупериодного выпрямителя с фильтром

Внешняя характеристика выпрямителя (Рис. 5.15), то есть зависимость $U_{\text{ср}} = f(I_{\text{ср}})$ существенно зависит от параметров выпрямительного устройства.

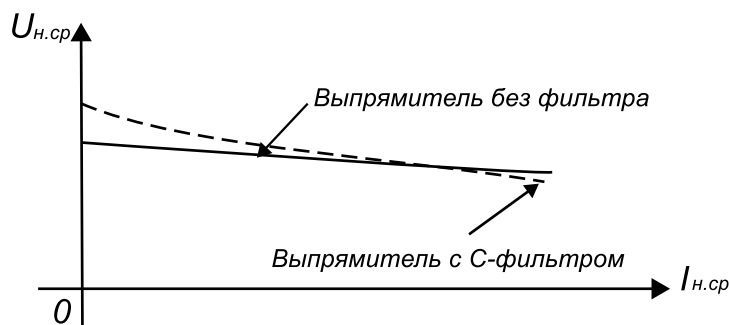


Рис. 5.15: Внешняя характеристика выпрямителя

Описание установки

Приборы и принадлежности: набор резисторов, полупроводниковые диоды, трансформатор, набор конденсаторов, измерительный стенд UniTrain, макетная плата, провода для подключения стенда.

При помощи программной среды MicroCap проводится моделирование работы однополупериодного и двухполупериодного выпрямителя. Определяются основные параметры выпрямительных схем. Далее схема двухполупериодного выпрямителя собирается на макетной плате и проверяется при помощи измерительного стенда UniTrain. По результатам измерений вычисляются значения основных параметров выпрямителя и сравниваются с результатами, полученными моделированием.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Исследование однополупериодного выпрямителя в программной среде MicroCap

1. Запустите программу MicroCap 12. Установите отображение сетки выбором элемента на панели инструментов или через следующий путь: **Options** -> **View** -> **GridBold6**.
2. Добавьте на рабочее поле компоненты схемы пользуясь элементом на панели инструментов или через следующий путь: **Component** -> **Analog Primitives** -> **Passive Components** для пассивных элементов (резисторы, конденсаторы, диоды)
3. Добавьте в схему источник питания (генератор синусоидального сигнала) пользуясь элементом с панели инструментов или через следующий путь: **Component** -> **Analog Primitives** -> **Waveform Sources** -> **Sine Source**. Установите параметры источника аналогично предыдущему заданию.
4. Соберите схему однополупериодного выпрямителя без фильтра (ключ K1 – разомкнут), представленную на рисунке 5.16. Если необходимых приборов нет на панели быстрого доступа сверху программы, их следует выбрать из библиотеки элементов **Component**. Ключ для включения схемы можно найти в разделе **Component** -> **Animation**
5. Подготовьте схему к проведению эксперимента, для чего установите параметры компонентов схемы:

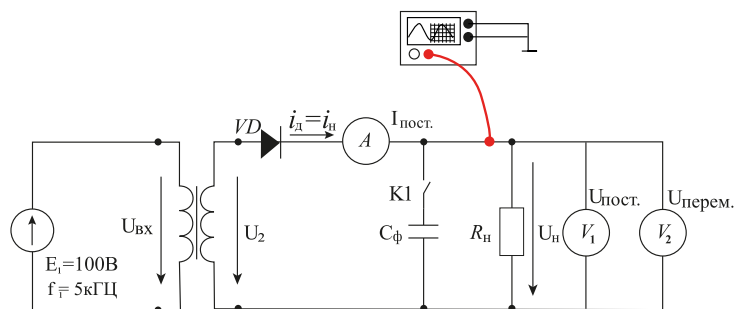


Рис. 5.16: Схема однополупериодного выпрямителя

- Амплитуду источника напряжения: A , (в программной среде задается амплитудное значение напряжения)
 - частота: $f = 50\text{Гц}$
 - сопротивление нагрузки: R_n [(в соответствии с выбранными номиналами сопротивлений)].
 - модель диода подбирается исходя из диодов, имеющихсся в наличии на макете или GENERIC
6. Запустите режим анализа переходных процессов, выбрав в разделе **Analysis** элемент **Transient**. Установите следующие параметры анализа:
- **Maximum Run Time** – Для частоты в 50 Гц установите значение 0.1
 - **P** – Указывается как будет построен график (в какой группе графиков). Для отображения графиков на разных листах укажите в одной строке - 1, а в другой - 2.
 - **X Expression** – T – Указывается, что по оси X будет расположено время.
 - **Y Expression** – Для первого графика $V(R1)$ - по оси Y будет указываться напряжение на сопротивлении R1. Для второго графика $I(R1)$ - по оси Y будет указываться ток в цепи.
7. Для сохранения теоретических данных в текстовом формате выберите элемент **Numeric output** в разделе настроек графика.

Таблица 5.7: Результаты для однополупериодного выпрямителя

	$U_{вх}, \text{В}$	$f, \text{кГц}$	$R, \text{Ом}$	$C_{\phi}, \text{мкФ}$	$U_{\text{RMS}}, \text{В}$	$U_A, \text{В}$	q	$K_{\text{сгл}}$
Без филь-тра								
С филь-тром								

8. Нажмите на кнопку **Run** для запуска моделирования. Полученные графики постройте в электронном виде или зарисуйте в лабораторную тетрадь.

9. Подключите в схему емкостной фильтр (K1 – замкнут). Исследуйте его влияние на коэффициент пульсаций выпрямительного устройства. Занесите измеренные значения в таблицу 5.7.
10. Изменяя сопротивление нагрузки R проведите измерения тока и напряжения на нагрузке для построения внешней характеристики выпрямителя $U_{cp} = f(I_{cp})$. Полученные данные занести в таблицу 5.8.

Таблица 5.8: Изучение влияния величины сопротивления нагрузки

$R, \text{Ом}$	100 Ом	250 Ом	500 Ом	750 Ом	1 кОм	2,5 кОм	5 кОм	7,5 кОм	10 кОм
$I, \text{мА}$									
$U, \text{В}$									

Задание 2. Исследование двухполупериодного мостового выпрямителя

1. По аналогии с предыдущим заданием, соберите схему двухполупериодного мостового выпрямителя (рис. 5.17, K1 – разомкнут):

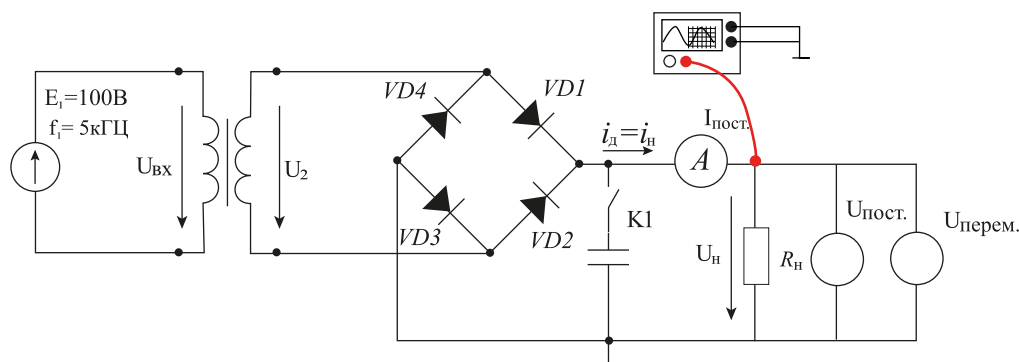


Рис. 5.17: Схема исследования двухполупериодного выпрямителя

2. Запустите режим анализа переходных процессов, выбрав в разделе **Analysis** элемент **Transient**. Установите следующие параметры анализа:
 - **Maximum Run Time** – Для частоты в 50 Гц установите значение 0.1
 - **P** – Указывается как будет построен график (в какой группе графиков). Для отображения графиков на разных листах укажите в одной строке - 1, а в другой - 2.
 - **X Expression** – T – Указывается, что по оси X будет расположено время.
 - **Y Expression** – Для первого графика V(R1) - по оси Y будет указываться напряжение на сопротивлении R1. Для второго графика I(R1) - по оси Y будет указываться ток в цепи.

3. Для сохранения теоретических данных в текстовом формате выберите элемент **Numeric output** в разделе настроек графика.
4. Нажмите на кнопку **Run** для запуска моделирования. Полученные графики постройте в электронном виде или зарисуйте в лабораторную тетрадь.

Таблица 5.9: Результаты для однополупериодного выпрямителя

	$U_{вх}, В$	$f, кГц$	$R, Ом$	$C_{\phi}, мкФ$	$U_{RMS}, В$	$U_A, В$	q	$K_{сгл}$
Без филь-тра								
С филь-тром								

5. Исследуйте влияние емкостного фильтра на коэффициент пульсаций выпрямительного устройства (рис. 5.17, K1 – замкнут). Занесите измеренные значения в таблицу 5.9.
6. Изменяя сопротивление нагрузки R провести измерения для построения внешней характеристики выпрямителя $U = f(I)$. Полученные данные занести в таблицу 5.10.

Таблица 5.10: Изучение влияния величины сопротивления нагрузки

$R, Ом$	100 Ом	250 Ом	500 Ом	750 Ом	1 кОм	2,5 кОм	5 кОм	7,5 кОм	10 кОм
$I, мА$									
$U, В$									

Задание 3. Проверка работы двухполупериодного (мостового) выпрямителя на диодах Д220 при помощи измерительного стенда

1. Соберите на макетной плате схему мостового выпрямителя в соответствии с рисунком 7. В качестве диодов используются полупроводниковые диоды Д220. Трансформатор в данной схеме отсутствует и на вход выпрямителя подается сигнал с выходов генераторов сигнала "S" измерительного стенда.
2. Откройте в программе VI-Starter измерительные приборы: осциллограф, амперметр, двойной вольтметр. Установите на приборах режим измерения AV.
3. Откройте в программе VI-Starter генератор функций. Установите значение амплитуды 40%, частоту 50 , в качестве функции выберите SIN.
4. На измерительных приборах установите режим измерения AV и AC. На приборе, измеряющем постоянную составляющую, выберите режим DC.

- Запустите источник питания и снимите осциллограмму напряжения на входе и выходе выпрямителя. Зарисуйте полученную картину в тетрадь.
- Исследуйте влияние емкостного фильтра на коэффициент пульсаций выпрямительного устройства (рисунок 7, К1 – замкнут). Занести измеренные значения в таблицу 5.11.

Таблица 5.11: Результаты для однополупериодного выпрямителя

	$U_{вх}, В$	$f, кГц$	$R, Ом$	$C_{\phi}, мкФ$	$U_{RMS}, В$	$U_A, В$	q	$K_{сгл}$
Без филь-тра								
С филь-тром								

- Изменяя сопротивление нагрузки R_n проведите измерения для построения внешней характеристики выпрямителя $U_{ср} = f(I_{ср})$. Полученные данные занести в таблицу 5.12.

Таблица 5.12: Изучение влияния величины сопротивления нагрузки

$R, Ом$	100 Ом	250 Ом	500 Ом	750 Ом	1 кОм	2,5 кОм	5 кОм	7,5 кОм	10 кОм
$I, мА$									
$U, В$									

- Постройте график зависимости $U_{ср} = f(I_{ср})$ на том же листе или экране, где и аналогичный график, построенный по результатам моделирования. Сравните вид обеих зависимостей.
- По окончании измерений выключите приборы.
- Напишите заключение к работе.

Контрольные вопросы

- Какие преимущества имеют двухполупериодные выпрямители перед однополупериодными?
- Как определить коэффициент пульсаций выпрямителя?
- Какие преимущества имеет мостовая схема по сравнению с выпрямителем с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора?

4. По каким параметрам выбирают диоды для выпрямителей?
5. Как влияет емкость сглаживающего конденсатора на амплитуду пульсаций выпрямленного напряжения?

Литература

1. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк.с углубл. изучением физики / Под. ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина. – М. Просвещение, 2011.
2. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Чаругин В.М. Физика-11. М.:Просвещение, 2014.
3. Королев Н.А., Окороков В.А., Тимошенко С.Л. Обработка результатов измерений: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017.
4. Кембровский Г.С. Приближенные вычисления, методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в физике. – М.: Оракул, 1997.
5. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики: профил. уровень / О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов, Э.Е. Эвенчик и др. под ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина; Рос. акад. наук, Рос. акад. образования, изд-во «Просвещение». – 13-е изд.– М.:Просвещение, 2011.

5.6 Лабораторная работа №16 Исследование переходных процессов в RC-цепи

Цель работы: Изучение закона изменения напряжения при разрядке конденсатора, определение постоянной времени RC-цепи и ее сопротивления R .

Введение

Рассмотрим контур, состоящий из конденсатора емкостью C , резистора сопротивлением R , ключа K и источника тока (см. рис. 5.11). В положении, когда ключ замкнут, в цепи происходит зарядка конденсатора, если ключ находится в разомкнутом состоянии, то конденсатор разряжается.

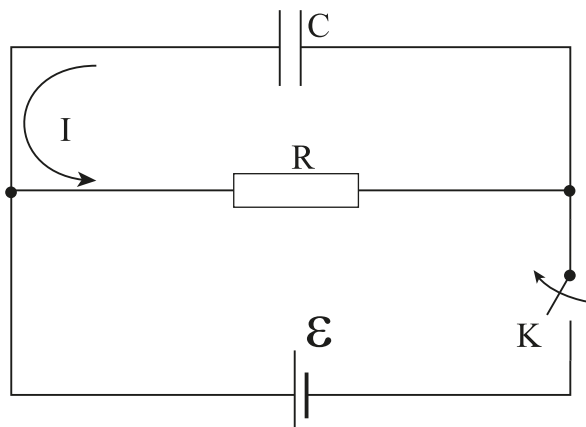


Рис. 5.18: Схема RC-контура

При зарядке или разрядке конденсатора в контуре протекает изменяющийся электрический ток. Если этот ток I изменяется не слишком быстро и так, что в каждый момент времени величина тока одинакова во всех точках контура, то для мгновенных значений I справедливы законы постоянного тока. Такие токи называются медленно меняющимися или квазистационарными. Таким образом, все изменения во времени должны происходить настолько медленно, чтобы распространение электромагнитных колебаний (токов) можно было считать мгновенным.

При разряде конденсатора через резистор R в цепи протекает электрический ток:

$$I = -\frac{dq}{dt}$$

Здесь q — заряд конденсатора, пропорциональный напряжению U на его обкладках:

$$q = CU$$

где C — емкость конденсатора.

В выражении для тока входит знак минус, так как выбранное положительное направление тока соответствует уменьшению заряда конденсатора. Согласно закону Ома для внешнего участка цепи, ток равен:

$$I = \frac{U}{R}$$

Из соотношения (1) с учетом выражений (2) и (3), получаем следующее дифференциальное уравнение, описывающее изменение напряжения конденсатора при его разряде с течением времени t :

$$\frac{U}{R} = -C \frac{dU}{dt}$$

Решением уравнения (4) является функция:

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

где U_0 — начальное напряжение, которое было на конденсаторе до разрядки, e — число Эйлера. Константа $\tau = RC$, имеющая размерность времени и характеризующая скорость разрядки конденсатора, называется постоянной времени RC-цепи, или временем релаксации.

Из уравнения (5) видно, что напряжение на конденсаторе после размыкания ключа убывает по экспоненциальному закону, график зависимости которого приведен на рис. 5.19 а. Постоянная времени показывает, за какое время после выключения источника питания напряжение (ток в цепи) уменьшается в e раз.

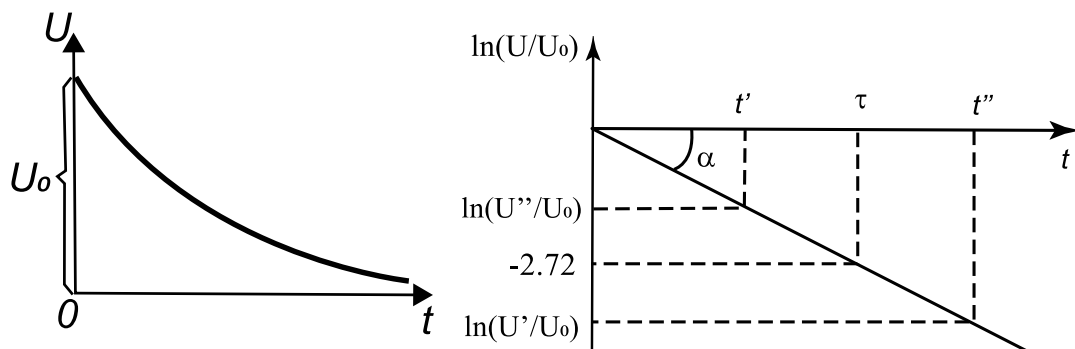


Рис. 5.19: Временные зависимости: а) U и б) $\ln \left(\frac{U}{U_0} \right)$ в RC-цепи.

Полученные результаты показывают, что разряд конденсатора происходит не мгновенно, а с конечной скоростью. В данной работе исследуется зависимость напряжения на конденсаторе от времени и экспериментально определяются постоянная времени RC-цепи и сопротивление цепи R .

Описание установки

Приборы и принадлежности: источник питания, вольтметр (или мультиметр), ключ, секундомер, набор резисторов, набор конденсаторов, измерительный стенд UniTrain, макетная плата, провода для подключения стенда.

Исследование переходных процессов в цепи, содержащих резистор и конденсатор, проводится с помощью схемы, которая представлена на рис. 5.20.

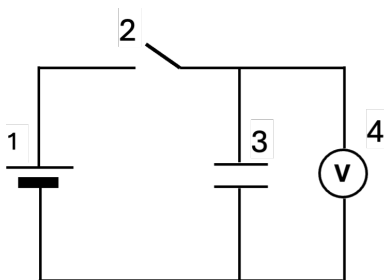


Рис. 5.20: Схема установки

Конденсатор 3 заряжается до напряжения U_0 от регулируемого источника постоянного напряжения 1 через замкнутый ключ 2. Затем ключ размыкают, и конденсатор начинает разряжаться через подключенный к нему вольтметр 4, имеющий большое входное сопротивление. В эксперименте с помощью вольтметра измеряется текущее значение напряжения на конденсаторе в зависимости от времени, которое фиксируется секундомером.

Для того чтобы убедиться, что напряжение с увеличением времени действительно уменьшается по экспоненциальному закону, следует построить график зависимости $\ln \frac{U}{U_0}$ от t . Из формулы (5) после линеаризации путем логарифмирования следует, что:

$$\ln \frac{U}{U_0} = -\frac{t}{\tau}$$

Из выражения (6) получаем:

$$\tau = \frac{\Delta t}{\left| \Delta \ln \frac{U}{U_0} \right|} = \frac{t' - t''}{\ln \frac{U'}{U_0} - \ln \frac{U''}{U_0}}$$

Величина τ пропорциональна котангенсу угла α (см. рис. 2б), коэффициент пропорциональности зависит от масштаба. Следовательно, постоянная времени может быть найдена графически по экспериментальной зависимости $\ln \frac{U}{U_0}$ от t .

Измерения возможно проводить как с помощью мультиметра и источника питания, так и с помощью измерительного стенда UniTrain.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Измерение характеристик разрядки конденсатора на измерительном стенде

1. Соберите электрическую схему согласно рис. 5.20, подключив конденсатор. После сборки схемы ключ переведите в разомкнутое положение.
2. Включите источник питания и вольтметр. Установите на источнике питания напряжение от 10 до 15 В (по указанию преподавателя).
3. Замкните ключ, зарядив конденсатор от источника питания до исходного напряжения.
4. После зарядки конденсатора отключите его от регулируемого источника питания постоянного напряжения, разомкнув ключ, и одновременно включите секундомер. По мере разряда конденсатора, через каждые 5 секунд, записывайте показания вольтметра в таблицу 5.13.

Таблица 5.13: Изучение влияния величины сопротивления нагрузки

$t, \text{с}$	$U, \text{В}$			$\langle U \rangle \pm \Delta U, \text{В}$	$\ln \frac{U}{U_0} \pm \Delta(\ln \frac{U}{U_0})$
	1	2	3		
0				1	0
5					
10					
...					
60					

- Повторите измерения еще два раза, результаты запишите в таблицу 5.13.
- По окончании измерений **не забудьте выключить** источник питания и вольтметр.
- Рассчитайте $\ln \frac{U}{U_0}$ для всех значений t . Оцените погрешность $\Delta \left(\ln \frac{U}{U_0} \right)$.
- Постройте графики временные зависимости U и $\ln \frac{U}{U_0}$. Сравните полученные графики с графиками, представленными на рис. 5.19.
- По графику функции $U(t)$ определите постоянную времени τ , при которой напряжение уменьшается в e раз.
- Используя график зависимости $\ln \frac{U}{U_0}$ от t и формулу (7), рассчитайте постоянную времени τ . Сравните ее с полученной в п. 10.
- Рассчитайте сопротивление вольтметра R и оцените его погрешность:

$$R = \frac{\tau}{C}$$

$$\Delta R = R \sqrt{\left(\frac{\Delta \tau}{\tau} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C} \right)^2}$$

- Напишите заключение к работе.

Контрольные вопросы

- По какому закону изменяются со временем при разрядке конденсатора напряжение, заряд и ток в RC-цепи?
- Выведите зависимость напряжения от времени при зарядке конденсатора в RC-цепи.
- Какую величину называют постоянной времени цепи и что она означает?

4. С какой целью в работе строят график зависимости $\ln U/U_0$ от t ?
5. Как экспериментально определяют постоянную времени в RC-цепи?

Литература

1. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики / Под. ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина. – М. Просвещение, 2011.
2. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Чаругин В.М. Физика-11. М.:Просвещение, 2014.
3. Королев Н.А., Окороков В.А., Тимошенко С.Л. Обработка результатов измерений: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017.
4. Кембровский Г.С. Приближенные вычисления, методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в физике. – М.: Оракул, 1997.
5. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики: профил. уровень / О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов, Э.Е. Эвенчик и др. под ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина; Рос. акад. наук, Рос. акад. образования, изд-во «Просвещение». – 13-е изд. – М.:Просвещение, 2011.

5.7 Лабораторная работа №17 Изучение сглаживающих фильтров

Цель работы: Изучить схемы сглаживающих фильтров низких и высоких частот на основе RC и RL цепей; определить граничную частоту.

Введение

Простейшие сглаживающие фильтры представляют собой катушку индуктивности, включенную последовательно с нагрузкой R или конденсатор C , включенный параллельно нагрузке (рис. 5.21).

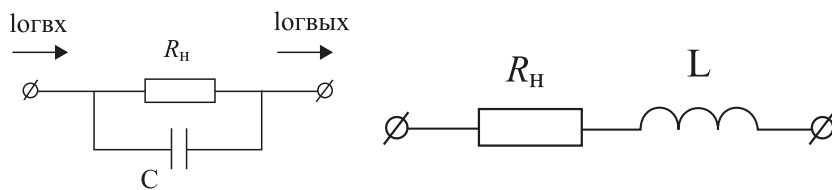


Рис. 5.21: Сглаживающие RC- и RL-фильтры

Коэффициент пульсации на выходе емкостного фильтра:

$$K_{n\text{вых}} = \frac{H \cdot 10^{-6}}{rC}$$

где r — сопротивление фазы выпрямителя; H — параметр, зависящий от угла отсечки тока диода, индуктивности рассеяния обмотки трансформатора и параметра:

$$A = \frac{\pi r}{mR_n}$$

Коэффициент сглаживания индуктивного фильтра:

$$q_L = \frac{2\pi f m L}{R_n}$$

где m — отношение частоты основной гармоники выпрямленного напряжения к частоте сети (в двухполупериодных схемах $m = 2$); f — частота сети.

Для лучшего сглаживания пульсаций индуктивным фильтром необходимо выполнение условия $2\pi f m L \gg R_n$. Это условие легко выполнить при малых сопротивлениях нагрузки, то есть при больших токах. По этой причине индуктивный фильтр применяют, главным образом, в мощных выпрямительных установках.

Для лучшего сглаживания пульсаций емкостным фильтром должно соблюдаться условие $\frac{1}{2\pi f m C} \ll R$, выполняемое при больших сопротивлениях нагрузки, то есть при малых токах. Следовательно, емкостный фильтр применяют, в основном, в выпрямителях небольшой мощности.

Для получения больших коэффициентов сглаживания применяют схемы, состоящие из нескольких катушек индуктивности и конденсаторов.

Коэффициент сглаживания Г-образного LC-фильтра:

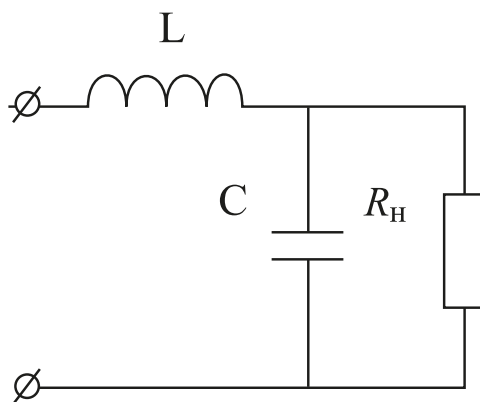


Рис. 5.22: Г-образный LC-фильтр

$$q = LCm^2(2\pi f_c)^2 - 1$$

При заданном q определяют произведение LC . Одним из основных условий выбора L и C является обеспечение индуктивной реакции фильтра, что выполняется при критическом значении индуктивности катушки:

$$L \geq \frac{K_{n\text{ВЫХ}} R_H}{2\pi f m}$$

П-образный LC-фильтр (рис. 5.23) можно рассматривать как сочетание емкостного и Г-образного LC-фильтра, его коэффициент сглаживания определяется произведением коэффициентов сглаживания этих фильтров:

$$q = q_c \cdot q_{LC} = \frac{K_{n\text{ВЫХ}} r C}{H \cdot 10^{-6}} (LCm^2(2\pi f_c)^2 - 1)$$

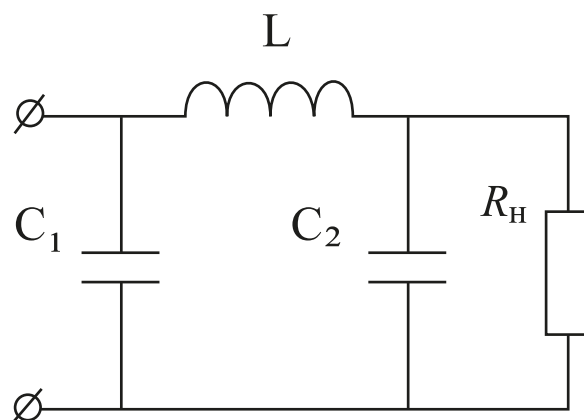


Рис. 5.23: П-образный LC-фильтр

В выпрямителях небольшой мощности с целью уменьшения размеров и массы фильтра вместо катушки индуктивности часто применяют резисторы. Коэффициент сглаживания Г-образного RC-фильтра:

$$q = 2\pi f_c m \frac{R_\Phi R_H}{R_\Phi + R_H} C$$

где R_Φ – сопротивление резистора R_Φ , которое выбирается из условия $R_\Phi = (0,1 \div 0,9)R_n$.

Постоянное напряжение на выходе RC-фильтра:

$$U_0 = \frac{U_{0\text{вх}}R}{R_\Phi + R_n}$$

RC-фильтры могут выполняться по П-образной схеме. Расчет производится в той же последовательности, как и расчет П-образных LC-фильтров. Кроме рассмотренных схем, существуют еще два вида фильтров, в которых для улучшения сглаживания пульсаций используются резонансные явления.

Если параллельно катушке индуктивности LC-фильтра включить конденсатор C_K такой величины, чтобы параллельный контур LC_K был настроен в резонанс на частоте основной гармоники, то переменная составляющая напряжения на нагрузке существенно снизится. Такой фильтр называется «фильтр-пробка». Его коэффициент фильтрации:

$$q = \frac{2\pi f_c m L C}{r_L C_K}$$

где r_L – активное сопротивление катушки индуктивности.

У таких фильтров есть свои недостатки: нарушение резонанса при изменении частоты тока сети и связанное с этим ухудшение фильтрации; нарушение резонанса при изменении тока нагрузки выпрямителя (тока подмагничивания индуктивности), а значит и q ; значительное снижение сопротивления резонансного контура для высших гармоник переменной составляющей выпрямленного напряжения и связанное с этим значительное ухудшение фильтрации.

Если последовательно с конденсатором LC-фильтра включить катушку с индуктивностью L_K такой величины, чтобы контур был настроен в резонанс с частотой $m f_c$, то сглаживающие свойства существенно улучшатся, а коэффициент фильтрации будет примерно равен:

$$q \approx \frac{2\pi f_c m L}{r_K}$$

где r_K – сопротивление потерь в последовательном резонансном контуре.

Фильтр с последовательным резонансным контуром лишен двух основных недостатков, присущих фильтру с параллельным резонансным контуром, так как его коэффициент сглаживания не зависит от нагрузки, а сопротивление для высших гармоник при введении резонансного контура практически не снижается. Недостатком фильтра является лишь ухудшение фильтрации при изменении частоты тока в сети.

Описание установки

Приборы и принадлежности: набор резисторов различных номиналов, набор конденсаторов различных номиналов, набор индуктивностей различных номиналов, макетная плата, соединительные провода, измерительный стенд UniTrain (или аналог: генератор низкой частоты, осциллограф).

В работе проводится расчет различных схем сглаживающих фильтров (Г-, П-образные, RC и LC). Далее при помощи программной среды MicroCap выполняется моделирование работы сглаживающего фильтра. Производится теоретическое определение коэффициента пуль-

сации. Далее один из фильтров собирается на макетной плате и проверяется экспериментально. По результатам проверки определяются экспериментальные коэффициенты фильтрации, которые сравниваются с величинами, полученными в ходе моделирования.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Моделирование сглаживающих RC- и LC- фильтров в программной среде MicroCap

1. Определите параметры простейшего фильтра. Учитывая параметры нагрузки, рассчитайте индуктивность катушки для L- и емкость конденсатора для C-фильтра. Напряжение на нагрузке $U_0 = 10$ В, частота тока $f_c = 50$ Гц, выпрямитель собран по мостовой схеме. Величина параметра $H = 200$, сопротивление фазы выпрямителя $r = 30$ Ом. Данные для расчета простейших фильтров приведены в таблице 5.14.

Таблица 5.14: Данные для расчета фильтров

Фильтр	Сопротивление R_n Ом	Коэффициент пульсаций q
C	430	0,006
L	100	0,08

2. Нарисуйте в тетради схемы фильтров в соответствии с данными таблицы 2. Рассчитайте коэффициент сглаживания q и коэффициент пульсаций на выходе каждого из фильтров. Напряжение на выходе выпрямителя $U_0 = 10$ В, частота тока $f = 50$ Гц, выпрямитель собран по мостовой схеме.
3. Определите напряжение на выходе фильтра и его КПД. Данные для расчета параметров пассивных фильтров приведены в таблице 5.15.
4. Составьте таблицы для записи результатов экспериментального определения зависимостей коэффициента пульсаций на выходе, КПД, коэффициента сглаживания q от тока нагрузки. В таблицах должны быть графы для внесения показаний приборов, по которым будут рассчитаны указанные зависимости, а также результаты расчетов.
5. Соберите схему эксперимента на рабочем поле в программной среде MicroCap. Выберите для экспериментального исследования два фильтра из рассчитанных. Для создания схемы выпрямителя используйте готовый элемент из библиотеки элементов программы MicroCap или схему из лабораторной работы №15.
6. Установите параметры выбранных приборов в соответствии с исследуемым вариантом фильтра. На источнике питания установите напряжение в цепи 10 В и частоту тока 50 Гц.
7. Запустите режим анализа переходных процессов, выбрав в разделе **Analysis** элемент **Transient**. Установите следующие параметры анализа:

Таблица 5.15: Данные для расчета параметров пассивных фильтров

Сопротивление R_n Ом	Параметры фильтра	Тип фильтра
430	$C_1 = C_2 = 1000$ мкФ $L = 1,3$ Гн $r_L = 10$ Ом	П-образный LC-фильтр
100	$C = 1000$ мкФ $L = 1,2$ Гн $r_L = 80$ Ом	Г-образный LC-фильтр
430	$C_1 = C_2 = 1000$ мкФ $L = 1,3$ Гн $C_k = 10$ мкФ $r_L = 40$ Ом	П-образный LC-фильтр с последовательным резистором
100	$C_k = 10$ мкФ $L = 1,2$ Гн $r_L = 40$ Ом	Г-образный LC-фильтр с последовательным резистором
430	$C_1 = C_2 = 1000$ мкФ $R_\Phi = 30$ Ом	П-образный RC-фильтр
100	$C = 1000$ мкФ $R_\Phi = 30$ Ом	Г-образный RC-фильтр

- **Maximum Run Time** – Для частоты в 50 Гц установите значение 0.1 (если принимать параметры выпрямителя из лабораторной работе №15, в ином случае подберите параметры исходя из своей установки).
 - **P** – Указывается как будет построен график (в какой группе графиков). Для отображения графиков на разных листах укажите в одной строке - 1, а в другой - 2.
 - **X Expression** – T – Указывается, что по оси X будет расположено время.
 - **Y Expression** – Для первого графика $V(R1)$ - по оси Y будет указываться напряжение на сопротивлении R_n нагрузки. Для второго графика $I(R1)$ - по оси Y будет указываться ток в цепи.
- Для сохранения теоретических данных в текстовом формате выберите элемент **Numeric output** в разделе настроек графика.
 - По полученным зависимостям проверьте, что расчетные параметры схемы подтверждаются в процессе моделирования.
 - Сделайте вывод о принципах функционирования различных сглаживающих фильтров.

Задание 2. Проверка результатов моделирования с использованием измерительного стенда UniTrain

- Исходя из параметров фильтра, которые были рассчитаны в предыдущем задании, выберите необходимый комплект элементов схемы для сборки фильтра.

2. При помощи комплекта для сборки схемы мостового выпрямителя соберите на макетной плате данный блок таким образом, чтобы осталось свободное пространство для сборки схемы фильтра.
3. Запишите в лабораторный журнал параметры выпрямителя, который будет использован в данной работе.
4. Соберите на макетной плате схему выбранного фильтра. Подключите на выход фильтра выбранное сопротивление нагрузки. Подключите вход канала "А" осциллографа к выходным клеммам выпрямителя, а канал "В" осциллографа к выходным клеммам фильтра (параллельно сопротивлению нагрузки).
5. Откройте в программе VI-Starter осциллограф и генератор функций. Установите на генераторе следующие параметры: 40% амплитуда, 50 Гц частота, функция – SIN.
6. Запустите генератор сигналов. Замкните ключ на макетной плате. Получите на осциллографе картину выпрямленного синусоидального сигнала. Зарисуйте полученную картину в тетрадь.
7. При замыкании ключа на втором канале осциллографа также появится картина фильтрованного сигнала. Сравните полученную картину с изначальным сигналом на выходе выпрямителя. Зарисуйте полученную картину в тетрадь.
8. Сохраните картинку с осциллографа. Откройте режим измерения «бегунком». Определите коэффициент сглаживания фильтра (см. рисунок 5.24 по следующей формуле:

$$S = \frac{q_{п.вх}}{q_{п.вых}} = \frac{U_{02}}{U_{01}} \cdot \frac{U_{11}}{U_{12}}$$

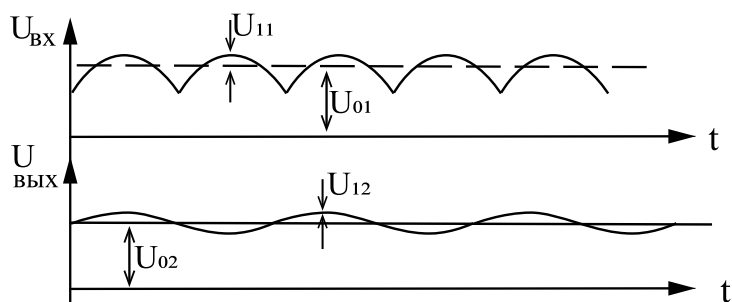


Рис. 5.24: Определение коэффициента сглаживания

9. Сравните полученный коэффициент фильтрации с результатами моделирования. Сделайте вывод о качестве фильтрации сигнала выбранным видом фильтра.
10. Напишите заключение к работе

Контрольные вопросы

1. Какие сглаживающие фильтры используются в радиотехнике?

2. Какие условия применения RC- и LC-фильтров?
3. Как определяется коэффициент фильтрации?

Литература

1. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк.с углубл. изучением физики / Под. ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина. – М. Просвещение, 2011.
2. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Чаругин В.М. Физика-11. М.:Просвещение, 2014.
3. Королев Н.А., Окороков В.А., Тимошенко С.Л. Обработка результатов измерений: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017.
4. Кембровский Г.С. Приближенные вычисления, методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в физике. – М.: Оракул, 1997.
5. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики: профил. уровень / О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов, Э.Е. Эвенчик и др. под ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина; Рос. акад. наук, Рос. акад. образования, изд-во «Просвещение». – 13-е изд.– М.:Просвещение, 2011.

5.8 Лабораторная работа №18 Включение транзистора в схеме с общей базой

Цель работы: Снять входную и выходную характеристики биполярного транзистора в схеме с общей базой.

Введение

Транзистором называют полупроводниковый прибор с двумя p - n -переходами, который обладает усилительными свойствами. Транзистор имеет трехслойную структуру. В зависимости от чередования слоев различают p - n - p и n - p - n транзисторы (рис. 5.25), которые отличаются полярностью напряжений и направлением рабочих токов при включении в электронную схему.

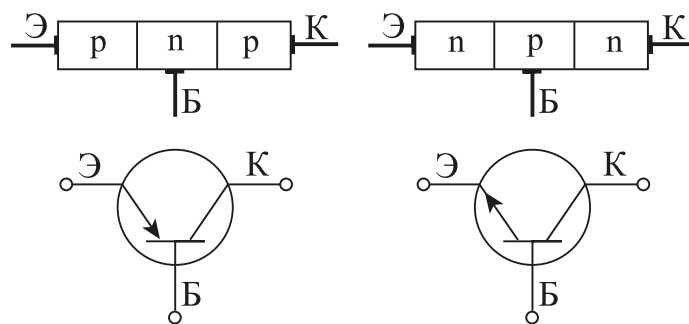


Рис. 5.25: Виды биполярных транзисторов

Средний слой транзистора называют базой (Б), крайние — эмиттером (Э) и коллектором (К). p - n -переход между эмиттером и базой называют эмиттерным, между базой и коллектором — коллекторным.

Транзистор можно использовать в трех схемах включения: в схеме с общей базой (ОБ), в схеме с общим эмиттером (ОЭ) и в схеме с общим коллектором (ОК). Каждая из этих схем имеет свои особенности, характеристики и параметры.

При включении по схеме ОБ общий электродом для входа и выхода является база (рис. 5.26 (верхний)). Входной сигнал поступает на переход эмиттер — база. Такое включение транзистора позволяет наиболее наглядно изучать его физические свойства.

В схеме ОБ эмиттерный переход включен в прямом направлении, а коллекторный — в обратном (рис. 5.26 (нижний)). При этом в цепи эмиттера должен протекать большой прямой ток $I_{\text{Э}}$.

Дырки — это основные носители заряда в эмиттерной области транзистора типа p - n - p . При создании напряжения между эмиттером и базой они проникают в базу, где являются неосновными носителями. Поскольку толщина базы очень мала, попавшие в нее дырки почти не рекомбинируют с электронами базы и проходят к коллекторному переходу.

Коллекторный переход включен в обратном направлении, он закрыт для основных носителей заряда базы — электронов (но не для дырок). Почти все дырки попадают в кол-

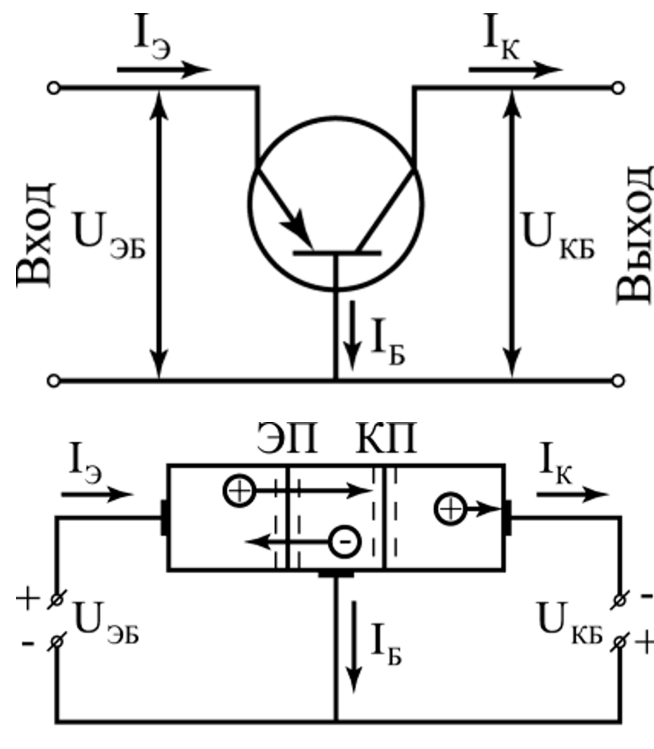


Рис. 5.26: Подключение транзистора на электрических схемах

латорную область, увлекаются полем коллектора и замыкают цепь. В цепи коллектора протекает ток I_K , чуть меньше эмиттерного, так что в первом приближении можно считать, что $I_K \approx I_Э$.

Сила тока в цепи коллектора I_K будет изменяться при изменениях тока эмиттера $I_Э$. Если в цепь эмиттера включить источник переменного напряжения, а в цепь коллектора резистор R , то при изменении тока $I_Э$ можно получить синхронное изменение падения напряжения на резисторе. При большом сопротивлении резистора изменение напряжения на нем может в тысячи раз превышать изменение напряжения сигнала в цепи эмиттера. Это означает усиление напряжения.

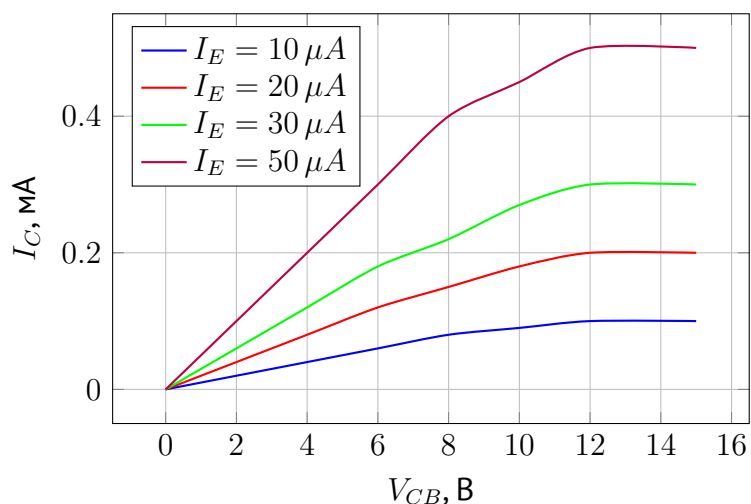
Выходная характеристика транзистора в схеме ОБ показывает зависимость тока коллектора I_K от напряжения $U_{КБ}$ (рис. 5.27а). При токе эмиттера $I_Э = 0$ выходная характеристика фактически не отличается от характеристики $p-n$ -перехода при обратном включении. Однако в ином случае, когда эмиттер поставляет носители зарядов в базу, выходная характеристика существенно отличается: чем больше ток эмиттера $I_Э$, тем выше располагается кривая.

Входная характеристика транзистора в схеме ОБ показывает зависимость тока эмиттера $I_Э$ от напряжения $U_{ЭБ}$ (рис. 5.27б), она практически не отличается от характеристики $p-n$ -перехода при прямом включении.

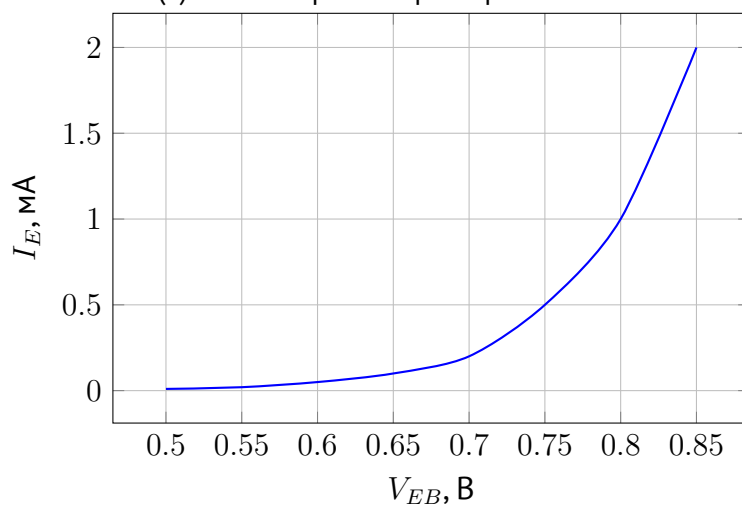
Описание установки

Приборы и принадлежности: набор резисторов разных номиналов, PNP-транзистор, макетная плата, соединительные провода, измерительный стенд UniTrain (или при его отсутствии - источник питания регулируемый (2 шт.), мультиметр (3 шт.)).

В работе необходимо исследовать входную и выходную характеристики транзистора в схеме ОБ. Характеристики снимают по схеме, показанной на рисунке 5.28.



(a) Коллекторные характеристики



(b) Эмиттерная характеристика

Рис. 5.27: ВАХ биполярного транзистора 2N3906

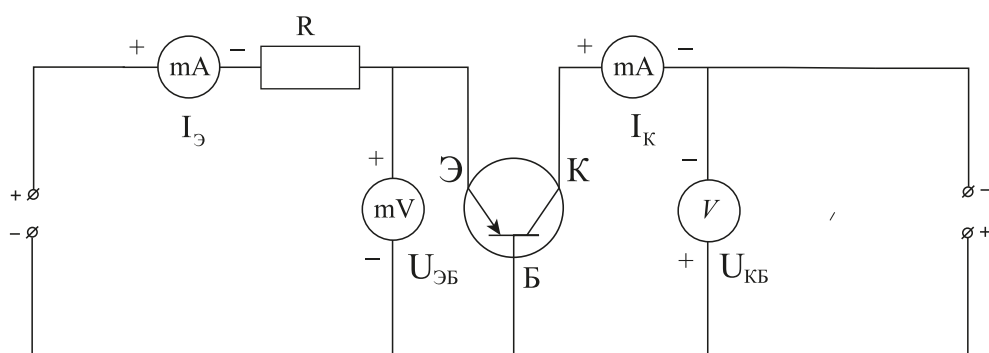


Рис. 5.28: Схема измерений

Порядок выполнения работы

Задание 1. Построение модели эксперимента в программной среде MicroCap

1. Откройте программную среду MicroCap. Разместите на рабочем поле необходимые элементы для сборки схемы (рис. 5.28). Для создания U_{CB} и U_{EB} используются источ-

ники постоянного напряжения (батарейка).

2. Соберите схему измерений. Выберите модель исследуемого транзистора в свойствах элемента. Транзистор можно найти в меню компонент: **Component** -> **Analog Primitives** -> **Active Devices** -> **PNP** Модель транзистора указывается преподавателем.
3. На источнике питания установите напряжение $U_{КБ} = 5 \text{ В}$.
4. Снимите входную характеристику транзистора, задавая силу тока эмиттера $I_Э$ через каждые $0,5 - 1 \text{ мА}$ и измеряя при этом значения напряжения между эмиттером и базой $U_{ЭБ}$. Для этого необходимо запустить анализ по постоянному току **Analysis** -> **DC**. Для запуска анализа укажите следующие параметры измерения:
 - **Variable 1** – Задаем изменение тока базы в параметре **Range** в указанных пределах. Формат задается по следующей схеме: **Окончание, Начало, Шаг**.
 - **P** – Указывается как будет построен график (в какой группе графиков). Укажите в первой строке цифру 1.
 - **X Expression** – Указывается напряжение V_{be} эмиттер-база.
 - **Y Expression** – Указывается ток на базе I_b
5. Подберите параметры моделирования так, чтобы график был похож на рисунок 5.6 а. Сохраните полученный рисунок и численные данные с помощью **Numeric Output**.
6. Снимите выходную характеристику транзистора, задавая силу тока коллектора $I_К$ при изменении напряжения между коллектором и базой $U_{КБ}$. Для этого необходимо запустить анализ по постоянному току **Analysis** -> **DC**. Для запуска анализа укажите следующие параметры измерения:
 - **Variable 1** – Задаем изменение тока коллектора в параметре **Range** в указанных пределах. Формат задается по следующей схеме: **Окончание, Начало, Шаг**.
 - **P** – Указывается как будет построен график (в какой группе графиков). Укажите в первой строке цифру 1.
 - **X Expression** – Указывается напряжение V_{bc} коллектор-база.
 - **Y Expression** – Указывается ток коллектора I_c
7. Подберите параметры моделирования так, чтобы график был похож на рисунок 5.6 б. Сохраните полученный рисунок и численные данные с помощью **Numeric Output**.
8. Рассчитайте, воспользовавшись снятой входной характеристикой транзистора, сопротивление эмиттерного p - n -перехода при $I_Э = 3 \text{ мА}$ по формуле:

$$r_Э = \frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta I_Э}$$

где $\Delta U_{ЭБ}$ и $\Delta I_Э$ – небольшие интервалы изменения напряжения и тока вблизи заданной точки. Для упрощения расчетов можно воспользоваться встроенной функцией трассировки на панели инструментов.

9. Рассчитайте, воспользовавшись снятой выходной характеристикой транзистора, сопротивление коллекторного p - n -перехода при $U_{КБ} = 3$ В по формуле:

$$r = \frac{\Delta U_{КБ}}{\Delta I_K}$$

$\Delta U_{ЭБ}$ и $\Delta I_Э$ — небольшие интервалы изменения напряжения и тока вблизи заданной точки. В схеме с общей базой должно выполняться условие $r_Э < r_K$. Для упрощения расчетов можно воспользоваться встроенной функцией трассировки на панели инструментов.

10. Сделайте выводы на основании проведенного моделирования. **Задание 2. Измерение характеристик транзистора в схеме с общей базой**
11. Соберите схему измерений в соответствии с рисунком 5.28. На стенде UniTrain в качестве источников питания используйте источник напряжения V1 и V2. В качестве амперметров используйте выходы "Е" и "F", в качестве вольтметров выходы "А" и "В".
12. Откройте на панели виртуальных приборов двойной амперметр (установите предел измерения 300 мА), Вольтметр А и Вольтметр В, источник постоянного тока.
13. Снимите входную характеристику транзистора, задавая силу тока эмиттера $I_Э$ через каждые 0,5 – 1 мА и измеряя при этом значения напряжения между эмиттером и базой $U_{ЭБ}$. Результаты измерений запишите в таблице 5.16. Напряжение между коллектором и базой поддерживается постоянным $U_{КБ} = 5$ В. Сила тока $I_Э$ не должна превышать 5 мА.

Таблица 5.16: Измерение входной характеристики

$U_{ЭБ}$, В								
$I_Э$, мА								

14. Снимите выходную характеристику транзистора, отмечая силу тока коллектора I_K при изменении напряжения между коллектором и базой $U_{КБ}$. Результаты измерений запишите в таблицу 5.17. Напряжение $U_{КБ}$ не должно превышать 5 В. Ток эмиттера должен быть постоянен и равен $I_Э = 5$ мА.

Таблица 5.17: Измерение выходной характеристики

$U_{КБ}$, В								
I_K , мА								

15. По полученным данным постройте входную характеристику транзистора. По оси абсцисс отложите напряжение $U_{ЭБ}$ в милливольтмах, а по оси ординат силу тока эмиттера $I_Э$ в миллиамперах.

16. Рассчитайте, воспользовавшись снятой входной характеристикой транзистора, сопротивление эмиттерного p - n -перехода при $I_Э = 3$ мА по формуле:

$$r_Э = \frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta I_Э}$$

где $\Delta U_{ЭБ}$ и $\Delta I_Э$ — небольшие интервалы изменения напряжения и тока вблизи заданной точки.

17. По полученным данным постройте выходную характеристику транзистора. По оси абсцисс отложите напряжение $U_{КБ}$ в вольтах, а по оси ординат силу тока коллектора $I_К$ в миллиамперах.
18. Рассчитайте, воспользовавшись снятой выходной характеристикой транзистора, сопротивление коллекторного p - n -перехода при $U_{КБ} = 3$ В по формуле:

$$r = \frac{\Delta U_{КБ}}{\Delta I_К}$$

$\Delta U_{ЭБ}$ и $\Delta I_Э$ — небольшие интервалы изменения напряжения и тока вблизи заданной точки. В схеме с общей базой должно выполняться условие $r_Э < r_К$.

19. Сравните результаты моделирования и измерений. Сделайте вывод по результатам работы.
20. Напишите заключение к работе.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные вольтамперные характеристики транзистора в схеме ОБ?
2. Как подсчитать величины сопротивлений эмиттерного и коллекторного p - n -переходов?
3. Каковы усилительные свойства транзистора в схеме ОБ? Можно ли усиливать ток, напряжение, мощность?

Литература

1. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк.с углубл. изучением физики / Под. ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина. – М. Просвещение, 2011.
2. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Чаругин В.М. Физика-11. М.:Просвещение, 2014.
3. Королев Н.А., Окороков В.А., Тимошенко С.Л. Обработка результатов измерений: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017.
4. Кембровский Г.С. Приближенные вычисления, методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в физике. – М.: Оракул, 1997.

5. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики: профил. уровень / О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов, Э.Е. Эвенчик и др. под ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина; Рос. акад. наук, Рос. акад. образования, изд-во «Просвещение». – 13-е изд. – М.: Просвещение, 2011.

5.9 Лабораторная работа №19 Включение транзистора в схеме с общим эмиттером

Цель работы: Исследовать передачу тока в схеме с общим эмиттером.

Введение

Принцип действия транзистора, его устройство, распределение токов в структуре транзистора, основные параметры транзистора приведены в описании лабораторной работы №18.

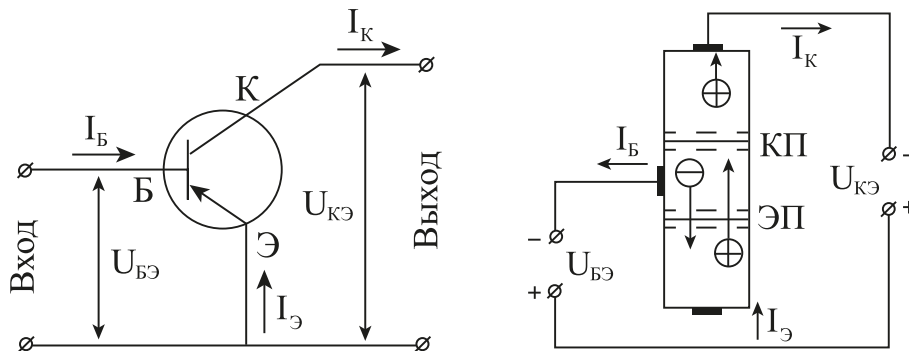


Рис. 5.29: Транзистор в схеме с общим эмиттером

При включении транзистора по схеме с общим эмиттером (ОЭ) общим электродом для входа и выхода является эмиттер (5.29 слева). В схеме с ОЭ эмиттерный переход включен в прямом направлении, а коллекторный в обратном (5.29 справа). При этом в цепи базы протекает ток I_B , в цепи коллектора I_K , а в цепи эмиттера ток $I_Э = I_K + I_B$. Таким образом, ток $I_Б = I_Э - I_K$.

Так как токи $I_Э$ и I_K примерно равны, то ток $I_Б$ очень мал по сравнению с токами $I_Э$ и I_K , и изменения этого тока также малы, причем $\Delta I_Б = \Delta I_Э - \Delta I_K$ ($\Delta I_Э$ и ΔI_K – изменения токов $I_Э$ и I_K). Следовательно, $\Delta I_Б \ll \Delta I_Э$. Действительно,

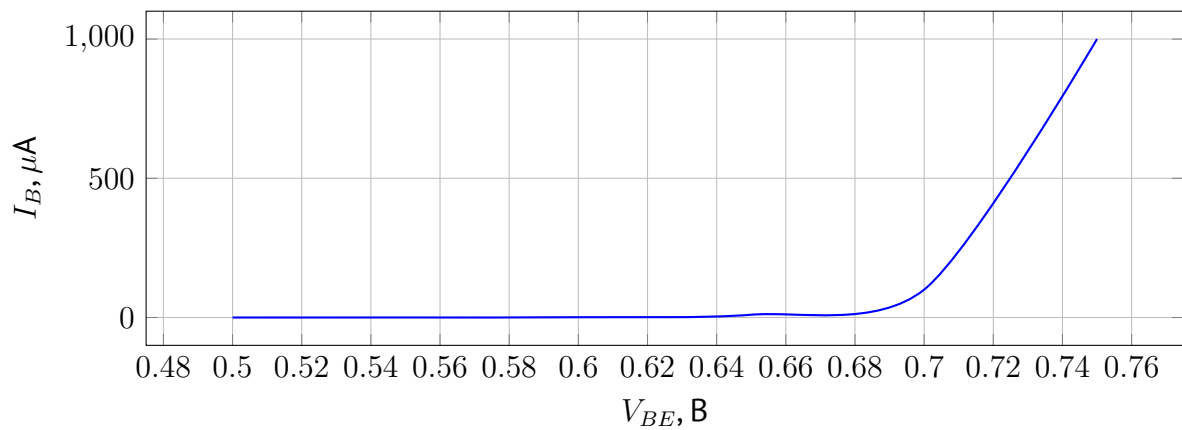
$$\frac{\Delta I_K}{\Delta I_Б} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Э - \Delta I_K} = \frac{\frac{\Delta I_K}{\Delta I_Э}}{1 - \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Э}}$$

Так как $I_Э \approx I_K$ и $\Delta I_Э \approx \Delta I_K$, то $\frac{\Delta I_K}{\Delta I_Б} \gg 1$.

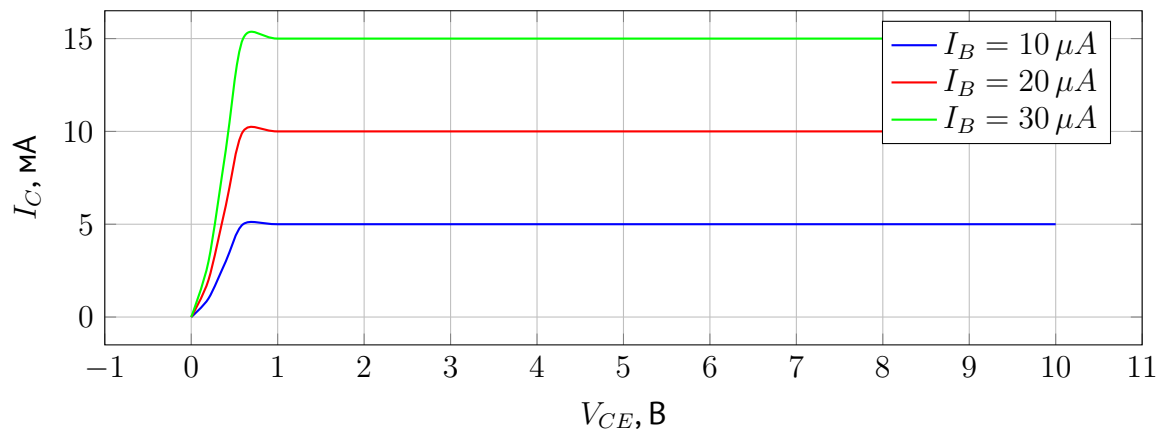
Таким образом, небольшое изменение тока базы $\Delta I_Б$ может приводить к значительному изменению коллекторного тока ΔI_K . Это означает, что в схеме включения транзистора с общим эмиттером достигается усиление по току. Отношение $\frac{\Delta I_K}{\Delta I_Б} = \beta$ называется коэффициентом усиления по току транзистора. В современных транзисторах $\beta \sim 20 \div 70$.

Основные вольтамперные характеристики транзистора в схеме ОЭ показаны на рис. 5.30. Входная характеристика показывает зависимость тока базы $I_Б$ от напряжения $U_{БЭ}$, она практически не отличается от характеристики $p-n$ перехода при прямом включении.

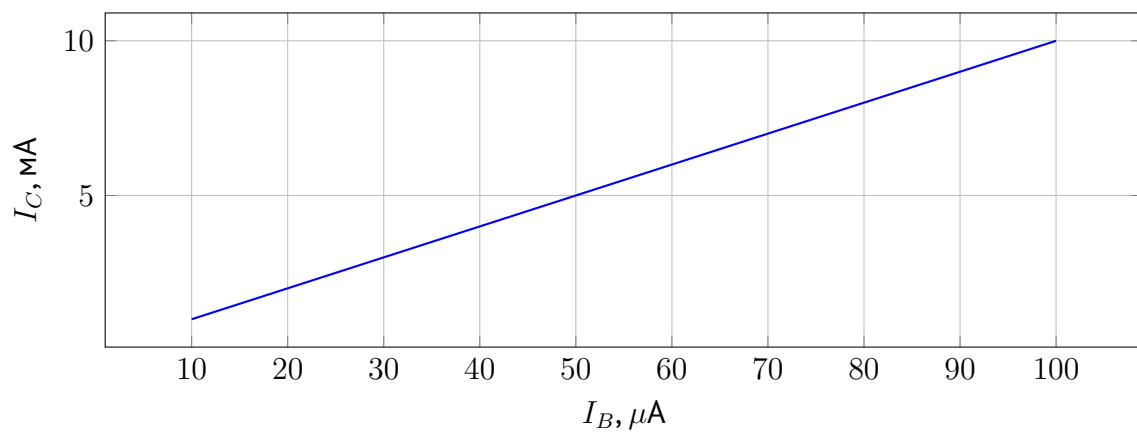
Выходная характеристика в схема ОЭ рис. 5.30b показывает зависимость тока коллектора I_K от напряжения $U_{КЭ}$. При токе базы $I_Б=0$ выходная характеристика не отличается



(а) Входная ВАХ для BC547



(b) Выходная ВАХ для BC547



(с) Передаточная характеристика для BC547

Рис. 5.30: Вольтамперные характеристики транзистора в схеме с ОЭ

от характеристики $p-n$ перехода при обратном включении. Чем больше ток базы I_B , тем выше располагается кривая. Характеристика передачи тока рис. 5.30с показывает зависимость тока коллектора I_K от тока базы I_B .

Описание установки

Приборы и принадлежности: набор резисторов разных номиналов, PNP-транзистор, макетная плата, соединительные провода, измерительный стенд UniTrain (или при его отсутствии - источник питания регулируемый (2 шт.), мультиметр (3 шт.)).

В работе будут исследоваться характеристики передачи тока $p-n-p$ или $n-p-n$ биполярного транзистора по схеме включения с общим эмиттером. В первом задании производится моделирование схемы измерений в программной среде MicroCap, во втором задании схема собирается на макетной плате. По результатам измерений на графике строят две кривые: теоретическую, полученную в результате моделирования, и экспериментальную, которые затем сравнивают на предмет отклонений.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Моделирование эксперимента в программной среде MicroCap

1. Откройте программную среду MicroCap. Разместите на рабочем поле необходимые элементы для сборки схемы (рис. 5.31). Для создания U_{KB} и $U_{ЭБ}$ используются источники постоянного напряжения (батарейка).

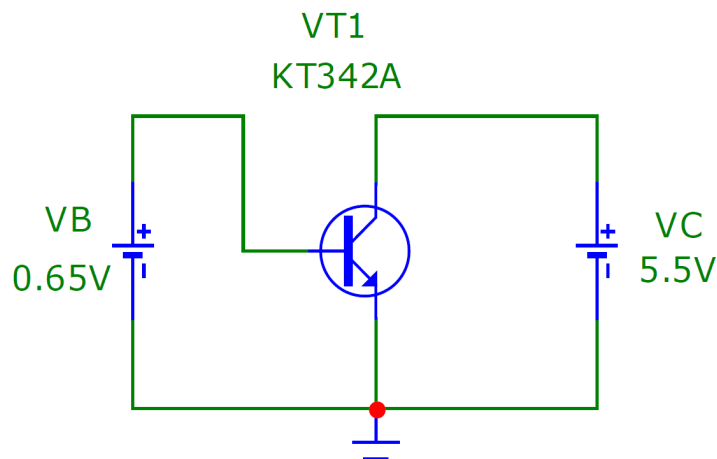


Рис. 5.31: Схема экспериментальной установки

2. Соберите схему измерений. Выберите модель исследуемого транзистора в свойствах этого элемента. Транзистор можно найти в меню компонент: **Component** -> **Analog Primitives** -> **Active Devices** -> **NPN** Модель транзистора указывается преподавателем.
3. На источнике питания установите напряжение $U_{КЭ} = 5$.

4. Снимите характеристику передачи тока базы транзистора, изменяя значения напряжения между эмиттером и базой $U_{эб}$. Для этого необходимо запустить анализ по постоянному току **Analysis** -> **DC**. Для запуска анализа укажите следующие параметры измерения:
 - **Variable 1** – Задаем изменение напряжения эмиттер-база (источник VB) в параметре **Range** в указанных пределах. Формат задается по следующей схеме: **Окончание, Начало, Шаг**.
 - **P** – Указывается как будет построен график (в какой группе графиков). Укажите в первой строке цифру 1.
 - **X Expression** – Указывается ток базы $I_b(VT1)$, где VT1 – наименование транзистора.
 - **Y Expression** – Указывается ток коллектора $I_c(VT1)$.
5. Подберите параметры моделирования так, чтобы график был похож на рис. 5.30в. Сохраните полученный рисунок и численные данные с помощью **Numeric Output**.
6. По полученной характеристике передачи тока определите коэффициент усиления по току β по формуле:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$$

Для определения коэффициента возьмите небольшое отклонение в большую и меньшую сторону от выбранной рабочей точки на середине кривой. Для упрощения расчетов можно воспользоваться встроенной функцией трассировки на панели инструментов.

7. Сделайте вывод о результатах моделирования.

Задание 2. Сборка экспериментального макета и экспериментальное определение передаточных характеристик

1. Соберите на макетной плате схему эксперимента в соответствии с рисунком рис. 5.32. Для подключения амперметров используйте входы А и В измерительного стенда. Источник питания подключите в выходы V_1 и V_2 измерительного стенда.
2. Откройте в программе VI-Starter следующие элементы: источник постоянного тока, амперметры А и Б. Обратите внимание на то, что амперметр требует подключения шунтирующего сопротивления 10 Ом.
3. Соберите схему измерений. Запишите в тетрадь модель исследуемого транзистора по маркировке на его корпусе. На источнике питания установите напряжение $U_{кэ} = 5$ В.
4. Запустите источник питания. Снимите характеристику передачи тока, задавая ток базы и отмечая значения тока коллектора. Напряжение $U_{кэ}$ при этом остается неизменным. Сила тока коллектора не должна превышать 10 мА. Значение тока базы не должно превышать 250 мА. Результаты измерений записываются в таблицу 5.18.

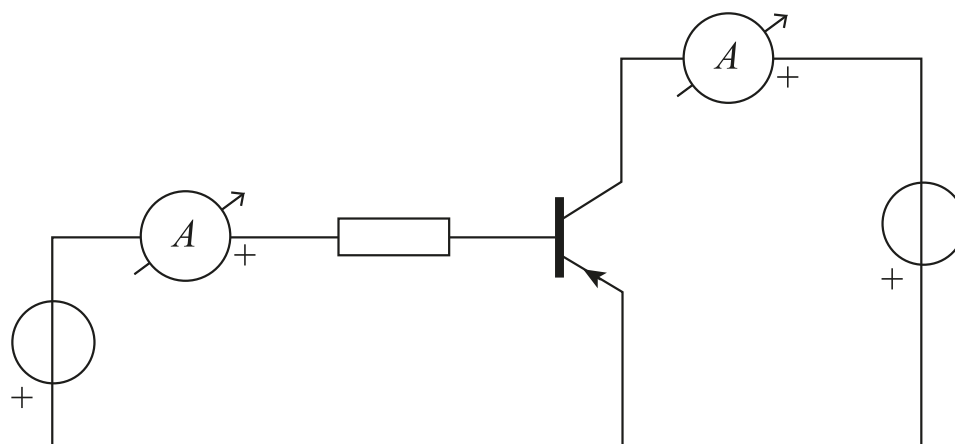


Рис. 5.32: Схема экспериментальной установки

Таблица 5.18: Измерение характеристики передачи тока

$I_B, \text{мА}$								
$I_K, \text{мА}$								

- Постройте на графике экспериментальную характеристику передачи тока транзистора, откладывая по оси абсцисс значения тока базы, а по оси ординат силу тока коллектора. На графике должны быть нанесены 2 кривые: по результатам моделирования и экспериментальная.
- По полученной характеристике передачи тока определите коэффициент усиления по току β по формуле:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$$

Для определения коэффициента возьмите небольшое отклонение в большую и меньшую сторону от выбранной рабочей точки на середине кривой.

- Напишите заключение к работе.

Контрольные вопросы

- Каковы основные характеристики транзистора в схеме ОЭ?
- Как подсчитать величину коэффициента усиления по току транзистора?
- Каковы усилительные свойства транзистора в схеме ОЭ?
- Можно ли усиливать ток, напряжение, мощность?

Литература

1. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк.с углубл. изучением физики / Под. ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина. – М. Просвещение, 2011.
2. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Чаругин В.М. Физика-11. М.:Просвещение, 2014.
3. Королев Н.А., Окороков В.А., Тимошенко С.Л. Обработка результатов измерений: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017.
4. Кембровский Г.С. Приближенные вычисления, методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в физике. – М.: Оракул, 1997.
5. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики: профил. уровень / О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов, Э.Е. Эвенчик и др. под ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина; Рос. акад. наук, Рос. акад. образования, изд-во «Просвещение». – 13-е изд.– М.:Просвещение, 2011.

5.10 Проектные и кейсовые задания

5.11 Кейс 4. Усилитель с общим эмиттером

1.Актуальность

Основным элементом установки является макетная плата, на которой собирается схема (рис. 5.33) усилителя с общим эмиттером. Сборка схемы проводится с использованием элементов и соединительных шин.

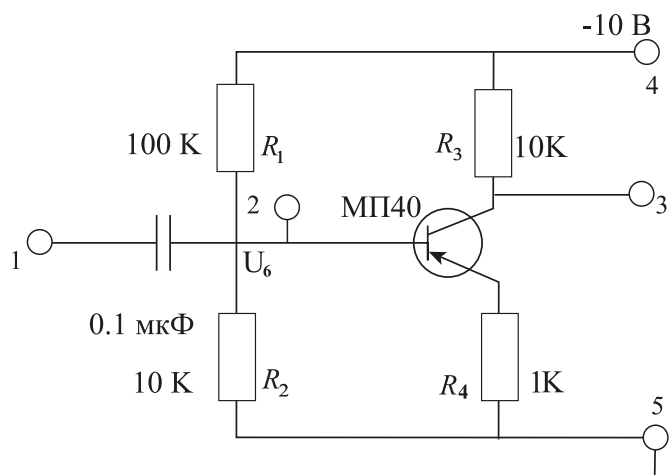


Рис. 5.33: Усилитель с общим эмиттером

Напряжение питания усилителя 10 В. Выходной сигнал снимается с резистора R_3 через выход 3. Резистор R_4 в цепи базы необходим для стабилизации тока коллектора для обеспечения постоянства коэффициента усиления по току β . Резисторы R_1 и R_2 обеспечивают необходимое значение напряжения для установления режима работы транзистора (рабочая точка). Входной сигнал подается на вход 1 через конденсатор, который нивелирует влияние на рабочую точку постоянной составляющей сигнала.

Выбор рабочей точки осуществляется так, чтобы при отсутствии входного сигнала выходное напряжение было равно половине напряжения питания, при этом обеспечивается максимальная амплитуда сигнала, передающегося без искажений (максимальная величина выходного сигнала ограничена напряжением питания, минимальная 0 В). При этом на выходе при отсутствии входного сигнала присутствует напряжение, равное половине напряжения питания, а при изменении входного сигнала в большую или меньшую сторону происходит соответствующее изменение выходного сигнала.

При этом входной сигнал управляет передачей мощности от источника питания на выход, так происходит усиление входного сигнала практически без искажения его формы.

При дальнейшем увеличении амплитуды входного сигнала его величина в некоторые моменты времени становится таковой, что усилитель уже не может обеспечить сохранение формы сигнала (выходной сигнал «обрезается» напряжением питания и 0 В). Это явление называют нелинейными искажениями сигнала.

2. Этапы работы

При помощи осциллографа измеряется максимальная амплитуда неискаженного сигнала, далее снимается зависимость амплитуды входного сигнала от амплитуды выходного сигнала и строится передаточная амплитудная характеристика усилителя. По наклону прямой определяется коэффициент усиления по напряжению.

Теоретическая часть. Моделирование схемы усилителя

1. Откройте программную среду MicroCap. Разместите на рабочем поле необходимые элементы для сборки усилителя.
2. Откройте свойства каждого элемента и установите параметры, соответствующие рисунку 1. Произведите сборку схемы.
3. Добавьте на рабочее поле источник постоянного напряжения и установите на нем величину напряжения 10 В. Данный элемент будет являться источником питания усилителя.
4. Добавьте на рабочее поле элемент «Генератор напряжения». В свойствах данного элемента установите вид сигнала: синусоидальный с частотой 500 Гц и амплитудой сигнала 5 В. Подключите генератор на вход усилителя.
5. Установите на входе и выходе усилителя внешние выводы для измерения напряжения из раздела «измерительные приборы».
6. Запустите интерактивный режим. Откройте осциллограф и убедитесь, что на экране наблюдается вид входного и выходного сигналов.
7. Используя регулировку амплитуды генератора сигналов найти максимальную амплитуду $U_{\max}$, для которой сигнал передается без искажений. Зарисовать форму сигналов с искажениями и без с соблюдением масштаба.
8. Меняя произвольно значение амплитуды от нуля до $U_{\max}$, измерить по осциллографу амплитуды входных и выходных сигналов. Результаты измерений занести в таблицу 1.
9. Построить график зависимости амплитуды сигнала на выходе усилителя от амплитуды входного сигнала. По наклону полученной прямой определить коэффициент усиления по напряжению и его погрешность. Сравнить полученное значение с рассчитанным по формуле.
10. Отключите интерактивный режим. Сделайте вывод о результатах моделирования работы усилителя

Практическая часть. Определение коэффициента усиления по напряжению усилителя с общим эмиттером на стенде UniTrain

1. Соберите на макетной плате схему усилителя с общим эмиттером.
2. Подключите клеммы V_1 и «Земля» на блоке UniTrain к выходам 4 и 5 схемы соответственно.

3. Подключите клеммы S и «земля» к выходам 1 и 5 соответственно.
4. Подключите клеммы A+ и A- к выходам 2 и 5 схемы. Подключите клеммы B+ и B- к выходам 3 и 5 схемы.
5. Рассчитайте коэффициент усиления усилителя по напряжению:

$$K_U = \frac{R_K}{R_3} = \frac{R_3}{R_4}$$

6. В разделе «Источники питания» выберите элемент «Источник постоянного тока». На источнике питания V_1 (ИП) установите напряжение 10 В.
7. В разделе «Источники напряжения» выберите элемент «Генератор функций». Установите функцию «SIN».
8. На генераторе сигналов установите частоту 500 Гц.
9. В разделе «Измерительные приборы» откройте элемент «Осциллограф».
10. Включите источник питания и генератор функций.
11. Используя регулировку амплитуды генератора сигналов, найдите максимальную амплитуду $U_{\max}$, для которой сигнал передается без искажений. Зарисуйте форму сигналов с искажениями и без с соблюдением масштаба.
12. Меняя произвольно значение амплитуды от нуля до $U_{\max}$, измерьте по осциллографу амплитуды входных и выходных сигналов. Результаты измерений занести в таблицу 2.
13. Постройте график зависимости амплитуды сигнала на выходе усилителя от амплитуды входного сигнала. По наклону полученной прямой определите коэффициент усиления по напряжению и его погрешность. Сравните полученное значение с рассчитанным. По окончании измерений выключите источник питания, генератор функций.

3. Примерный перечень средств и материалов для выполнения задания

1. Цифровая лаборатория UniTrain
2. Устройство сбора данных (АЦП, Arduino, цифровая лаборатория с мультиметром или другой аналог в случае отсутствия цифровой лаборатории UniTrain)
3. Осциллограф двухканальный (в случае отсутствия цифровой лаборатории UniTrain)
4. Генератор сигналов низкочастотный (в случае отсутствия цифровой лаборатории UniTrain)
5. Мультиметр
6. Макетная плата
7. Электронные компоненты: резисторы, конденсаторы, транзисторы разных номиналов
8. Комплект соединительных проводов

Конструкторская часть. Разработка макета усилителя с общим эмиттером

1. На основе проведенных измерений предложите способы оптимизации схемы для получения максимального коэффициента усиления.
2. Подготовьте макет печатной платы для сборки схемы усилителя.
3. С помощью пайки соберите плату усилителя и проверьте ее работоспособность.
4. Разработайте корпус своего изделия и изготовьте его доступными способами.
5. Соберите финальный вариант усилителя в корпусе.

4. Требования к предоставлению решения задания

По итогам выполнения кейсовой задачи оформляется отчет о работе проектной команды, включающий в себя как разработанные системы и устройства, так и корректно оформленную документацию по кейсу. Документация в обязательном порядке должна включать в себя:

1. Титульный лист (школа, авторы, название кейса, название команды, руководитель).
2. Описание команды, распределение ролей, функций и обязанностей каждого участника команды.
3. Теоретическое Введение. В разделе «Введение» обосновывается Актуальность исследования, формулируются цель и задачи работы, а также предоставляется краткий литературный обзор темы исследования.
4. Методику проведения исследования. В разделе «Методика исследования» описывается порядок выполнения экспериментов, экспериментальная установка, приводится ее схема, указываются расчетные формулы, использованные для обработки полученных данных, а также приводится описание методики оценки погрешностей экспериментальных результатов.
5. Результаты проведенного исследования. В разделе «Результаты» необходимо представить полученные данные, а также результаты их обработки в виде таблиц и/или графиков, привести интерпретацию и физическое объяснение результатов. Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и подписаны.
6. Разработанные 3D-модели в форматах .obj, .stl или .step, скриншоты разработанных 3D-моделей (как системы в целом, таким и отдельный ее частей, при наличии). 3D-модели должны находиться в репозитории проекта в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.).
7. Описание схемы разработанной установки в виде изображений общей схемы установки, электрической принципиальной схемы, монтажной схемы, оптической схемы (если имеется) и т.д.

8. В случае разработки программного обеспечения, должен быть приведен алгоритм его работы в виде блок-схем.
9. Код разработанного программного обеспечения должен быть представлен в виде ссылки на репозиторий проекта с кодом в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.). Любые архивы с загруженными исходными кодам (.zip, .rar и т.п.) загружать в другие хранилища данных запрещается.
10. Фотографии разработанной установки и ее составных частей.
11. Видеоролик, демонстрирующий выполнение экспериментальных измерений в соответствии с требованиями кейса. На видео необходимо продемонстрировать прохождение каждого, описанного в задании, эксперимента или отдельных его частей. Видео с проведенным экспериментом должно однозначно подтверждать авторство участников (во время записи ролика необходимо четко произнести название команды, ФИО участников, номер школы, ФИО руководителя). Видеоролик располагается на стороннем видеохостинге (ВКонтакте, Rutube и др.), ссылка на видеоролик располагается в репозитории в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.). Весь эксперимент, от подготовки к работе до завершения последнего этапа, должен быть записан на видео одним дублем без склейки и монтажа. В течении всего видео в кадре должны быть разработанная командой установка и как минимум один из участников команды, выполняющий все операции с ней. Вход и выход участников, передача инструмента, деталей и других вещей из кадра недопустимо. Допускается использование второй камеры для более детализированной демонстрации ключевых моментов. Видео должно быть со звуком, на котором отчетливо слышны подаваемые голосовые команды и действия команды. На видеозаписи должно быть хорошо различимы все элементы, влияющие на оценивание результативности. В случае, если эксперты не смогут по видеозаписи однозначно понять результат выполнения задания, принимается решение не в пользу участника.
12. Заключение, включающее краткое изложение результатов работы, подведение итогов исследования, обсуждение его практической и теоретической значимости. Также могут быть предложены дополнительные направления исследований.
13. Список литературных источников. В этом разделе приводится список использованных источников, статей, книг и другой литературы, на которые ссылается исследование. Кроме того, работа может содержать приложения с иллюстративным материалом (рисунки, схемы, таблицы, фотографии и т. п.). На каждое приложение должна быть дана ссылка в тексте работы.

5. Список рекомендуемой литературы

1. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк.с углубл. изучением физики / Под. ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина. – М. Просвещение, 2011.
2. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Чаругин В.М. Физика-11. М.:Просвещение, 2014.

3. Королев Н.А., Огороков В.А., Тимошенко С.Л. Обработка результатов измерений: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017.
4. Кембровский Г.С. Приближенные вычисления, методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в физике. – М.: Оракул, 1997.
5. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений и шк. с углубл. изучением физики: профил. уровень / О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов, Э.Е. Эвенчик и др. под ред. А.А. Пинского, О.Ф. Кабардина; Рос. акад. наук, Рос. акад. образования, изд-во «Просвещение». – 13-е изд.– М.:Просвещение, 2011.

5.12 Темы проектно-исследовательских работ для самостоятельного изучения

Вы успешно освоили основные принципы аналоговой электроники, выполнили лабораторные работы и познакомились с ключевыми компонентами и схемами. Теперь настало время применить полученные знания в реальных условиях и развить свои навыки в рамках самостоятельных исследовательских проектов.

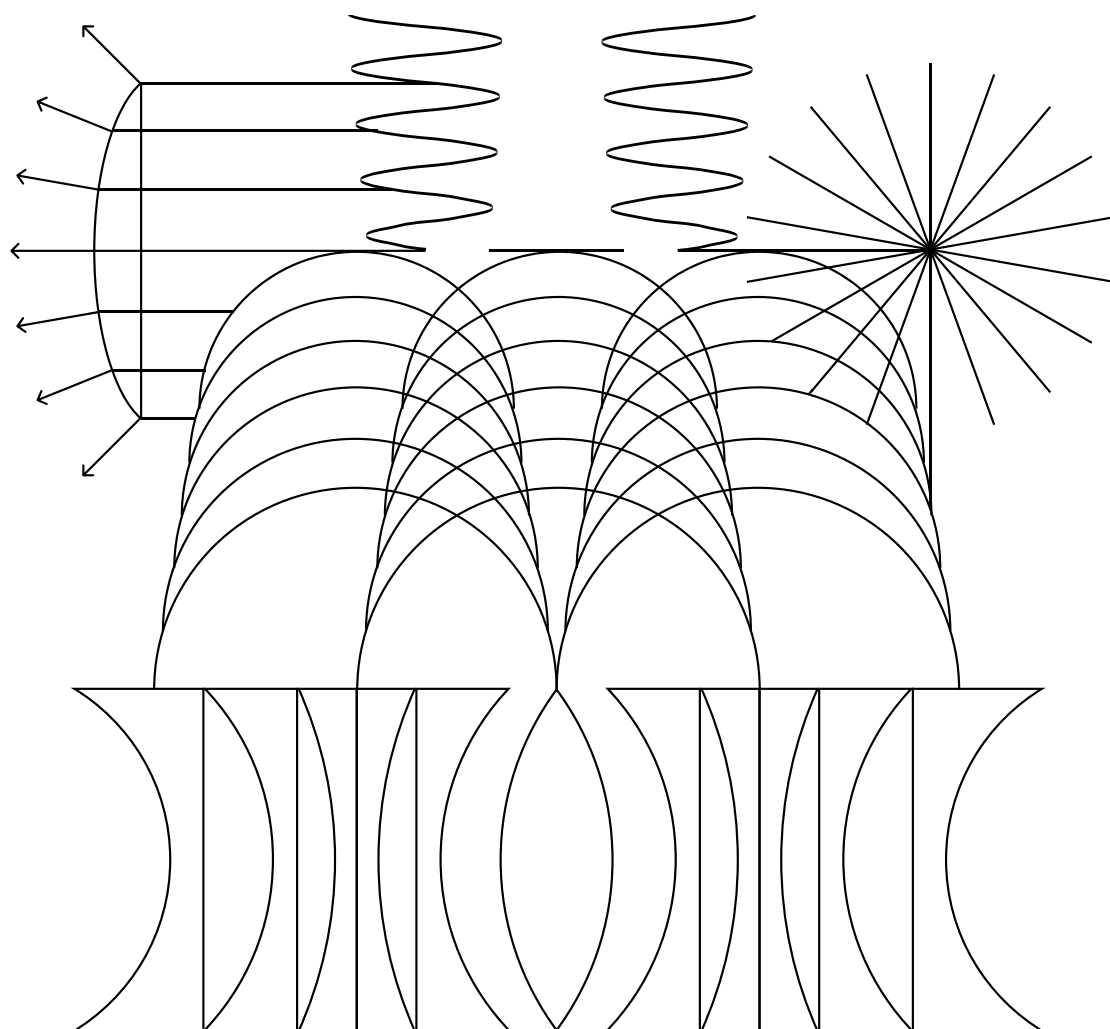
Этот раздел предлагает вам возможность выбрать тему, которая вас вдохновляет, и углубиться в изучение конкретных аспектов аналоговой электроники. Вы сможете разработать и собрать собственные устройства, провести эксперименты и проанализировать результаты.

Проекты помогут вам не только закрепить теоретические знания, но и развить критическое мышление, навыки проектирования и решения инженерных задач. Выберите тему, которая кажется вам наиболее интересной, или предложите свою идею — главное, чтобы она была связана с аналоговой электроникой и позволяла вам проявить творческий подход.

1. **Разработка и тестирование аудиоусилителя на базе операционного усилителя.** Предлагается создать простой аудиоусилитель и изучить его характеристики (коэффициент усиления, частотный диапазон), а также проверить его работу с различными источниками звука.
2. **Создание активного фильтра низких или высоких частот.** Как было показано в лабораторных работах, фильтры играют важную роль в аналоговой электронике. Предлагается разработать фильтр, который пропускает только определенный диапазон частот, и исследовать его параметры (частота среза, крутизна спада).
3. **Исследование работы RC- и LC-генераторов сигналов.** В лабораторных работах широко применялись генераторы сигналов для работы с цепями переменного тока. Однако строение генераторов нигде не разбиралось. Предлагается изучить строение RC- и LC-генераторов сигналов, а также исследовать их работу и ключевые параметры. На основе полученных результатов можно собрать генератор синусоидальных или прямоугольных сигналов и изучить влияние параметров компонентов на частоту и форму сигнала.
4. **Исследование работы дифференцирующих и интегрирующих цепей.** Предлагается собрать и проанализировать RC-цепи, которые дифференцируют или интегрируют входной сигнал, и изучить их применение в аналоговой электронике. В дополнение к проекту возможно исследовать как влияет на результат характеристика отдельного элемента системы, например резистора, а так же сопротивления нагрузки.
5. **Исследование влияния температуры на параметры полупроводниковых компонентов.** Полупроводники это материалы, характеристики которых могут меняться в зависимости от температуры окружающей среды. Таким образом, будут меняться и параметры приборов, сделанных из полупроводников. В работе предлагается изучить, как именно температура влияет на характеристики диодов, транзисторов или операционных усилителей (например, коэффициент усиления, ток утечки).

6. **Анализ искажений сигнала в аналоговых усилителях.** В любой аналоговой электрической цепи в силу ряда причин могут возникать искажения. Они серьезно влияют на работу устройств и могут привести к серьезным последствиям. В работе предлагается исследовать, как различные параметры усилителя (коэффициент усиления, нагрузка) влияют на искажение формы сигнала.
7. **Исследование работы аналоговых компараторов.** Компаратор - важный элемент аналоговой электрической цепи, позволяющий проводить сравнение двух сигналов. Предлагается изучить строение компаратора и исследовать как компараторы реагируют на изменение входных сигналов, а также рассчитать их пороги срабатывания.
8. **Анализ работы аналоговых модуляторов и демодуляторов.** В работе предлагается изучить понятие частотной и амплитудной модуляции сигнала, исследовать принципы амплитудной модуляции (АМ) и демодуляции, изучить искажения сигнала. На основе полученных данных необходимо создать собственный проект простого модулятора и демодулятора и провести анализ сигналов с помощью осциллографа.

6 ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ



6.1 Введение

Интерферометрия является научным инструментом, основанным на особом свойстве волн – способности интерферировать с другими волнами. Интерференция волн – явление перераспределения энергии колебаний при наложении нескольких волн в одной области пространства. Подобное перераспределение энергии зачастую проявляет себя как некоторая интерференционная картина – сложная структура из чередующихся областей высоких и низких интенсивностей колебаний.

Классический пример интерференционной картины, знакомой каждому – цветные разводы в тонких пленках масла или мыла (рис.6.1). На практике именно изучение параметров интерференционных картин оказывается полезным с точки зрения исследования физических свойств различных объектов.

Интерферометрические методы исследования позволяют проводить точные измерения малых перемещений, определять концентрацию веществ в газовых смесях с недостижимой для других способов чувствительностью, осуществлять кодирование информации в волоконно-оптических линиях связи и даже производить измерение свойств отдельных квантовых объектов. Данный список применений не является исчерпывающим и непрерывно дополняется по мере развития науки и технологического прогресса.

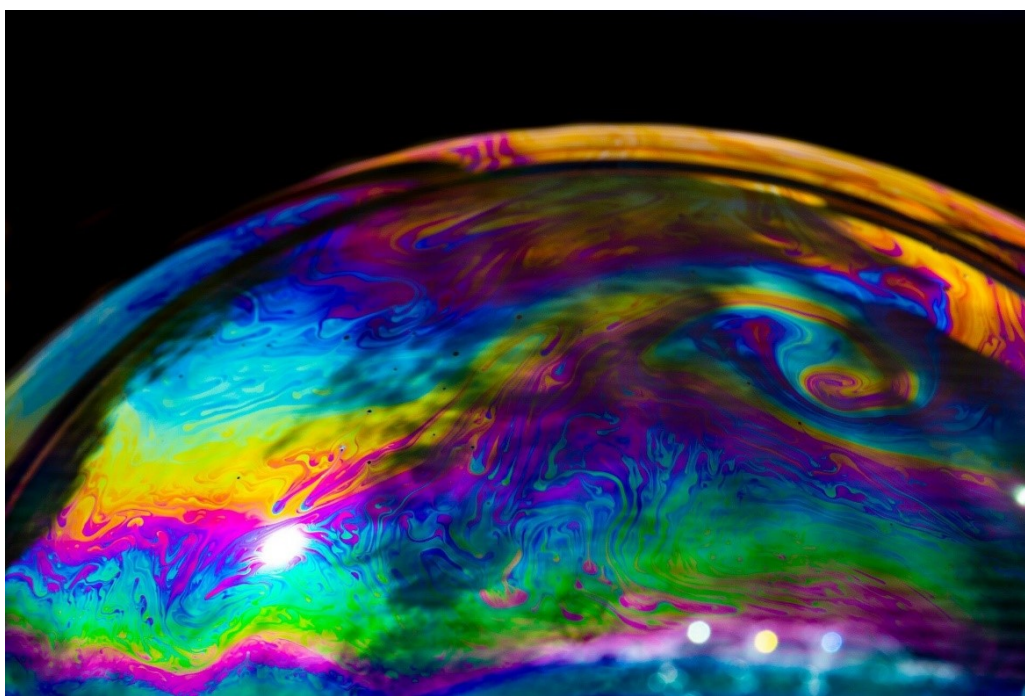


Рис. 6.1: Интерференция света на тонкой пленке мыльного пузыря

Общие свойства интерференции справедливы для волн любой физической природы, а потому экспериментальные методы и инструменты, основанные на интерференции, имеют одни и те же принципы работы. Однако же далее для определенности и наглядности речь будет идти о волнах электромагнитных – оптических или световых. Кроме того, основной прибор интерферометрических исследований (собственно, интерферометр) имеет множество различных схем исполнения: известны интерферометры Майкельсона, Фабри – Перо, Маха – Цендера, Саньяка и многие другие.

Простейшим из перечисленных является интерферометр Фабри – Перо, также известный как эталон или резонатор Фабри – Перо. Он представляет из себя два плоских зеркала, расположенных параллельно друг другу. Нередко одно или оба зеркала изготавливаются полупрозрачными, чтобы облегчить ввод или вывод света в интерферометр. Световая волна, попадающая в эталон Фабри – Перо, претерпевает множественные отражения между зеркалами. Отраженные волны многократно интерферируют между собой и с падающей волной. Нетрудно заметить, что интерференция падающей и отраженной волн вполне удовлетворяет условию формирования стоячих электромагнитных волн в объеме пространства, заключенном между зеркалами. В самом деле, если зеркала расположены на расстоянии l , то стоячая волна между ними образуется при выполнении следующего условия:

$$l = \frac{n\lambda}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

где λ – длина волны излучения.

Равенство (1) фактически означает, что в интерферометре устойчиво могут существовать только колебания со строго определенными длинами волн. Данное обстоятельство оказывается особенно полезным для спектрального анализа и выделения узких полос длин волн в световом излучении, по этой причине резонатор Фабри – Перо находит широкое применение в оптической и лазерной технике.

Рассмотрим теперь интерферометр Маха–Цендера. Базовые принципы его описания будут справедливы с небольшими изменениями для всех двухлучевых интерферометров.

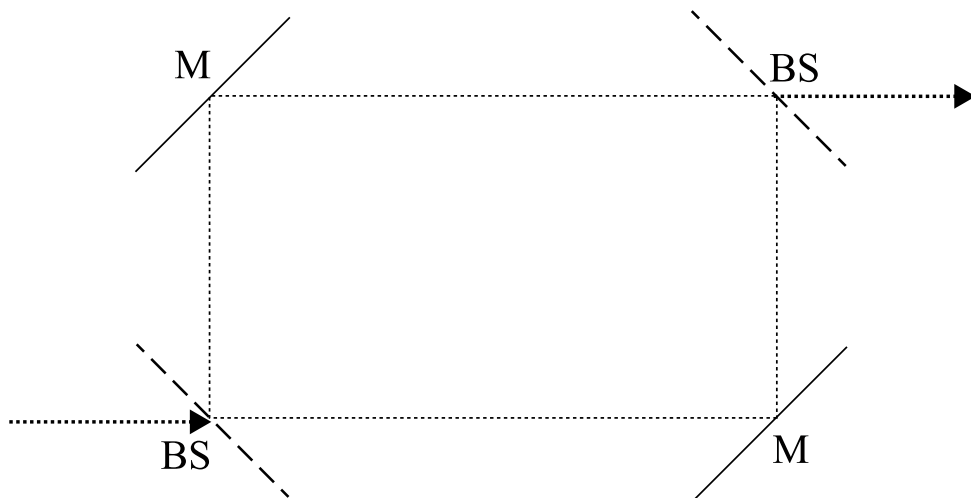


Рис. 6.2: Интерферометр Маха – Цендера

Принципиальная схема интерферометра Маха–Цендера представлена на рис. ?? Его основными элементами служат две полупрозрачные светоделительные пластинки (BS) и два глухих зеркала (M). Световая волна, схематично изображенная стрелкой, попадает на вход интерферометра слева, проходит через светоделительную пластинку и разделяется пополам между двумя плечами интерферометра (отсюда и происходит название класса интерферометров – двухлучевые). Затем свет отражается от двух зеркал и вновь сходится на второй полупрозрачной пластинке. Как правило, результат интерференции регистрируется на выходе цифровой фотокамерой, глазом или иным способом.

Очевидно, что выходная интерференционная картина будет зависеть от разности оптических путей между световыми волнами, распространявшимися через разные плечи интерферометра. Достаточно вспомнить условия максимумов и минимумов интерференции:

$$\text{max} : \Delta = \pm m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

$$\text{min} : \Delta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

где Δ – разность оптических путей.

На практике более удобным оказывается использование фазовых условий максимумов и минимумов следующего вида:

$$\text{max} : \Delta\varphi = \pm 2m\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

$$\text{min} : \Delta\varphi = \pm(2m + 1)\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз между волнами в плечах интерферометра.

Условия (2) – (5) справедливы для световых волн, распространяющихся в вакууме. Для учета наличия оптической среды в плечах интерферометра в условия следует добавить показатель преломления. Если плечи интерферометра имеют равную оптическую длину, то такой интерферометр называется сбалансированным, в противном случае – несбалансированным.

Зависимость результата интерференции от разности фаз между волнами в плечах интерферометра предоставляет широкие возможности по манипуляции результатом интерференции и, как итог, объясняет распространенность интерферометров в различных областях науки и техники. Так, например, в одно из плеч интерферометра может быть помещена емкость с газовой смесью. Применение подобных модифицированных интерферометров в совокупности с источниками излучения с высокой степенью монохроматичности позволяет проводить анализ состава газовой смеси с чувствительностью вплоть до единичных молекул веществ в исследуемом объеме.

Не менее примечательным является устройство так называемого модулятора Маха – Цендера. Данное устройство представляет собой сбалансированный интерферометр Маха – Цендера с установленным в одном из плеч электрооптическим фазовым модулятором (рисунок 3). Электрооптический фазовый модулятор, или ячейка Поккельса, фактически является двулучепреломляющим кристаллом, зажатым между обкладками плоского конденсатора. Ячейка Поккельса позволяет вызывать управляемую фазовую задержку проходящей через нее волны, что обуславливает широкую распространенность устройства в волоконно-оптических линиях связи в качестве кодирующих устройств.

Как правило, в составе модулятора Маха – Цендера ячейка Поккельса используется для переключения состояний конструктивной и деструктивной интерференции на выходе. В самом деле, пусть в отсутствие модуляции на выходе интерферометра наблюдается конструктивная интерференция. Если создать с помощью ячейки Поккельса дополнительный фазовый набег, кратный нечетному числу полуволн, то состояние интерференции сменится на деструктивную. Характерная частота смены состояний, достижимая при применении электрооптических модуляторов достигает десятков гигагерц. Обозначив конструктивную интерференцию логической единицей, а деструктивную – логическим нулем, можно получить простейшую систему для высокоскоростной передачи данных по оптоволоконному каналу.

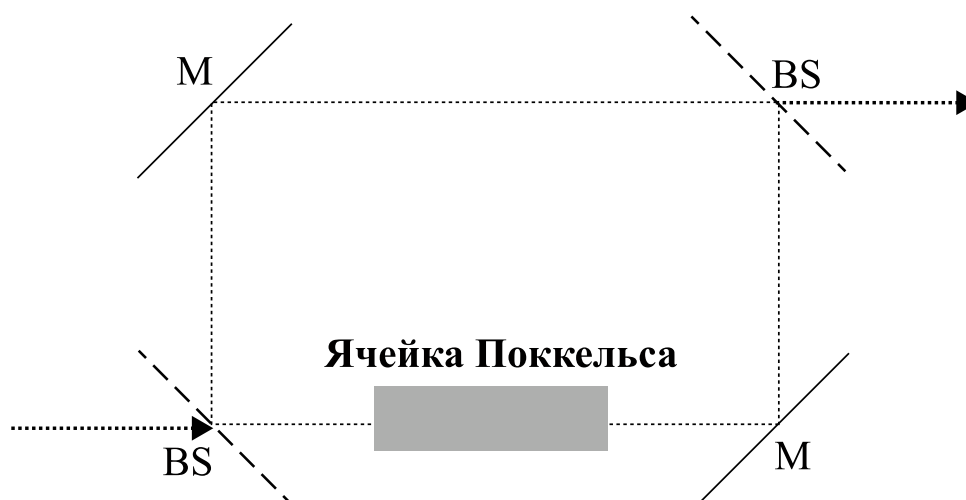


Рис. 6.3: Модулятор Маха – Цендера

Другим перспективным применением оптоволоконных модуляторов Маха – Цендера является построение абсолютно защищенных квантовых каналов связи по известному протоколу квантового распределения ключа BB84. Подробное рассмотрение вопросов, связанных с самим протоколом, выходит за рамки данного пособия. Тем не менее, техническую базу его реализации составляют в том числе и модуляторы Маха – Цендера, выполняющие случайный перебор фазовых сдвигов от 0 до 2π для манипулирования интерференцией одиночных фотонов – квантов света.

В данном случае интерференцию корректнее было бы рассматривать с квантовой точки зрения, пользуясь представлением о волнах вероятности. Однако же логические выкладки и конечный результат упрощенно могут быть воспроизведены по аналогии с классической электромагнитной волной с той лишь разницей, что интерференционную картину для наблюдателя формировать будет не интенсивность света, а вероятность обнаружения фотона в определенной точке пространства. В этом случае конструктивная интерференция означает гарантированное (с вероятностью, равной единице) обнаружение фотона на выходе модулятора, а деструктивная – гарантированное его отсутствие.

Наконец, обратим внимание на интерферометр Майкельсона, принципиальная схема которого приведена на рис. ?? . Как и интерферометр Маха – Цендера, интерферометр Майкельсона является двухлучевым, а потому основные выводы и принципы работы остаются справедливыми.

В интерферометре Майкельсона используется одна светоделительная пластинка и два глухих зеркала. Плечи интерферометра являются двухпроходными – свет, отраженный от зеркал, распространяется по тому же оптическому пути, что и падающий. Достаточно часто одно из зеркал интерферометра может быть передвижным, либо в качестве зеркала может использоваться некоторый исследуемый объект. Основа применения интерферометра Майкельсона – измерение изменения разности длин плеч в зависимости от внешних условий. В соответствии с соотношениями (2) – (5) результат интерференции напрямую зависит от разности длин оптического пути в плечах интерферометра (при учете двойного прохождения светом каждого из плеч).

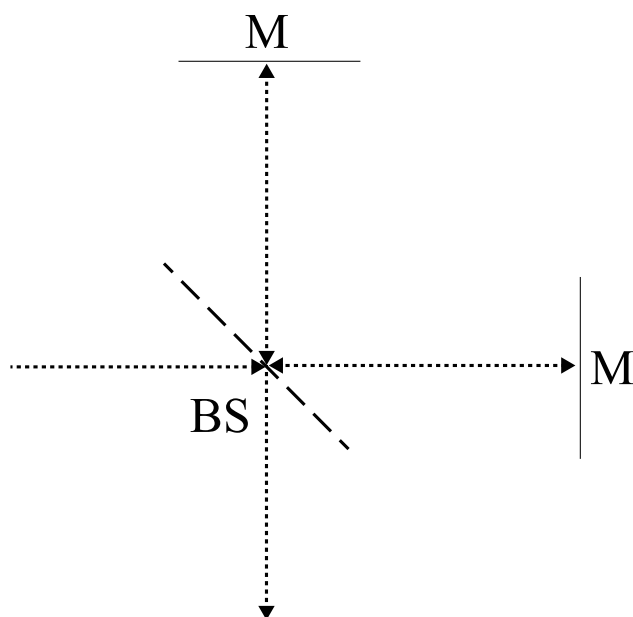


Рис. 6.4: Интерферометр Майкельсона

Высокая чувствительность интерферометра Майкельсона в сочетании со сравнительно простой его конструкции позволяет проводить уникальные исследования в области астрономии и астрофизики. В 1887 году Майкельсон и Морли опровергли гипотезу о светоносном эфире с помощью интерферометра Майкельсона, установленного на каменной плите, плавающей в ртути. В 2016 году интерферометрические обсерватории LIGO и Virgo сообщили о первом в истории детектировании гравитационных волн. Обе экспериментальные установки конструктивно представляют собой интерферометры Майкельсона с длинами плеч в несколько километров.

В заключение следует упомянуть о важном свойстве когерентности света, ранее опущенным из рассмотрения. Когерентность означает согласованное протекание колебательных процессов с одинаковой частотой и фиксированной разностью фаз между ними. Условие когерентности излучения является необходимым для возникновения наблюдаемой интерференционной картины в области пространства, где существует суперпозиция (наложение) волн.

Можно выделить два взаимосвязанных свойства: временную и пространственную когерентность. Временная когерентность означает согласованность колебаний во времени, фактически ограничивая наибольшую оптическую разность хода между волнами в плечах интерферометра (наибольшую фазовую задержку). Пространственная когерентность отвечает за согласованность колебаний в различных точках волнового фронта. Для оценки параметров различных видов когерентности вводятся величины длины (времени) когерентности и радиуса (площади) когерентности соответственно. Эти величины показывают наибольшие значения длины (времени, радиуса источника, его площади), при которых сохраняется когерентность того или иного вида.

Условие пространственной когерентности, как правило, заведомо выполняется или сравнительно легко достигается для источников света, применяемых в интерферометрии. Классическим примером пространственно-когерентного источника является одиночное отверстие в первом экране оригинального опыта Юнга. Без данного отверстия или диафрагмы,

при использовании солнечного света интерференционная картина наблюдаться не может: пространственная когерентность Солнца оказывается недостаточна из-за большого углового размера источника.

Условие же временной когерентности представляет зачастую куда большую техническую сложность. Поскольку характерное время когерентности по крайней мере обратно пропорционально ширине излучаемого спектра, классические источники света обычно не пригодны для использования в интерферометрах. Характерная длина когерентности ламп накаливания без использования монохроматоров может не превышать единиц микрометров, в то время как зачастую для практических применений в интерферометрии требуются длины когерентности не менее единиц сантиметров. В качестве решения данного затруднения активно применяются лазерные источники с узкими спектрами излучения. В исключительных случаях длина когерентности лазерного излучения может достигать десятков километров.

В последние годы внимание к квантовым вычислениям и квантовым коммуникациям значительно возросло. Квантовые компьютеры, способные выполнять расчеты с беспрецедентной скоростью и решать задачи, которые недоступны классическим компьютерам, могут стать революцией в области информационных технологий. Для реализации квантовых вычислений необходимы специализированные системы передачи данных, и оптоволокну здесь играет ключевую роль. Квантовая передача данных основывается на принципах квантовой механики, таких как суперпозиция и запутанность. Квантовые коммуникационные системы требуют передачи квантовых битов (кубитов), которые способны представлять одновременно несколько состояний в отличие от классических битов, принимающих лишь два состояния (0 и 1). Для передачи таких данных необходима высокая стабильность и минимальные потери сигнала, что идеально соответствует характеристикам оптоволоконных линий связи.



**Интерферометр прямого
оптического
гетеродинамирования**

Одним из важнейших аспектов квантовых коммуникаций является квантовая криптография. Системы квантовой криптографии используют принципы квантовой механики для обеспечения практически абсолютной безопасности передачи данных. Примером такой технологии является протокол квантового распределения ключей (QKD), который позволяет обмениваться шифровальными ключами между двумя сторонами с защитой от перехвата. В случае попытки перехвата квантовых данных, любые изменения в системе мгновенно фиксируются, что делает подобные системы значительно более безопасными по сравнению с классическими методами шифрования. Оптоволокну является основным средством для передачи таких данных на значительные расстояния.

Кроме того, в оптоволоконных сетях возможно использование квантовых повторителей — устройств, которые позволяют передавать квантовые состояния на большие расстояния, не теряя их целостности. Это важный шаг для создания квантового интернета — глобальной сети, которая позволит обмениваться квантовыми данными между квантовыми компьютерами и другими устройствами.

Несмотря на значительные достижения в области оптоволоконной передачи данных

и ее применение в квантовых технологиях, существуют определенные технические и экономические препятствия на пути к их массовому внедрению. Во-первых, строительство и модернизация оптоволоконной инфраструктуры требуют значительных инвестиций. В крупных городах сети строятся довольно активно, но в отдаленных и сельских районах процесс идет медленнее. Это приводит к тому, что доступ к высокоскоростному интернету через оптоволоконные сети до сих пор остается неравномерным.

Кроме того, квантовые технологии находятся на стадии активной разработки, и их массовое внедрение ожидается не ранее чем через несколько десятилетий. Развитие квантовых компьютеров и коммуникационных систем требует дальнейшего совершенствования как аппаратного обеспечения, так и программного обеспечения. Однако текущие исследования и успешные эксперименты в этой области показывают, что будущее за квантовыми системами.

Одним из ключевых вопросов, связанных с квантовыми вычислениями, является их интеграция с существующими инфраструктурами и системами передачи данных. Совместное использование классических и квантовых компьютеров потребует создания гибридных систем, в которых оптоволокно будет играть решающую роль. Это создаст новые вызовы в области стандартизации, совместимости оборудования и обеспечения безопасности данных.

Тем не менее, несмотря на существующие сложности, перспектива использования оптоволоконных систем для квантовых коммуникаций и вычислений открывает огромные возможности. Например, с развитием квантового интернета можно ожидать появления новых сервисов, основанных на сверхвысоких скоростях передачи данных и абсолютно защищенных каналах связи. Это окажет влияние на такие области, как медицина, наука, финансы, государственное управление и многие другие.

Актуальность изучения оптоволоконной передачи данных продолжает расти по мере того, как общество движется в направлении цифровизации всех аспектов жизни. Оптоволоконно предоставляет высокоскоростные, надежные и безопасные средства передачи данных, что делает его важным элементом современных телекоммуникационных и информационных систем. Помимо этого, оптоволокно играет центральную роль в развитии квантовых технологий, которые могут кардинально изменить будущее информационных технологий и методов обработки данных.

В ближайшие десятилетия можно ожидать дальнейшего увеличения внедрения оптоволоконных сетей по всему миру, а также активного развития квантовых технологий. Эти процессы не только улучшат качество связи, но и создадут новые возможности для различных отраслей, сделав возможным обработку и передачу данных на уровне, который ранее считался недостижимым.

В этой главе мы рассмотрим практические работы, как связанные с изучением основ, прежде всего, волновой оптики. Это работы посвященные эффекту дифракции и интерференции, изучению поляризационных фильтров и их применимости для сложных оптических систем, особенностями оптической передачи данных, а также атомно-силовой микроскопии, где отражение света от тонкой кремниевой балки с иглой является основой для всей измерительной системы.

6.2 Лабораторная работа №20 Изучение оптических систем с помощью законов геометрической оптики

Цель работы: Определить фокусное расстояние собирающих и рассеивающих линз различными методами.

Введение

В основе геометрической оптики лежат следующие законы.

1. Закон прямолинейного распространения света: в однородной изотропной среде свет распространяется прямолинейно.
2. Закон независимости световых пучков: распространение светового пучка в среде не зависит от наличия других пучков.
3. Закон отражения света от поверхности раздела двух сред: отраженный луч лежит в одной плоскости (плоскость падения) с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения луча. Угол отражения равен углу падения.
4. Закон преломления света на границе раздела прозрачных сред: преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21},$$

где n_{21} – относительный показатель преломления второго вещества по отношению к первому.

Одним из элементов большинства оптических систем является **сферическая линза** – оптически прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Материалом для линз служат стекло, кварц, кристаллы, пластмассы и другие.

Ход лучей в линзе зависит от радиуса ее кривизны R . По внешним формам линзы делят на двояковыпуклые, плоско-выпуклые, вогнуто-выпуклые, двояковогнутые, плоско-вогнутые и выпукло-вогнутые (рис. 6.5). Если поверхность линзы выпуклая, то $R > 0$, если вогнутая, то $R < 0$; при плоской поверхности линзы $R \rightarrow \infty$.

В зависимости от того, как отклоняется параллельный пучок света, линзы делятся на собирающие и рассеивающие. Собирающая линза в середине толще, чем у краев, рассеивающая линза, наоборот, в средней части тоньше.

Собирающая линза фокусирует падающие на нее параллельные лучи в одну точку за линзой (рис. 6.6а), а рассеивающая линза направляет эти лучи таким образом, что их продолжения пересекаются в одной точке перед линзой (рис. 6.6б). Точка F' , лежащая на главной оптической оси $O'O$, называется задним главным фокусом линзы, а точка F – передним главным фокусом линзы.

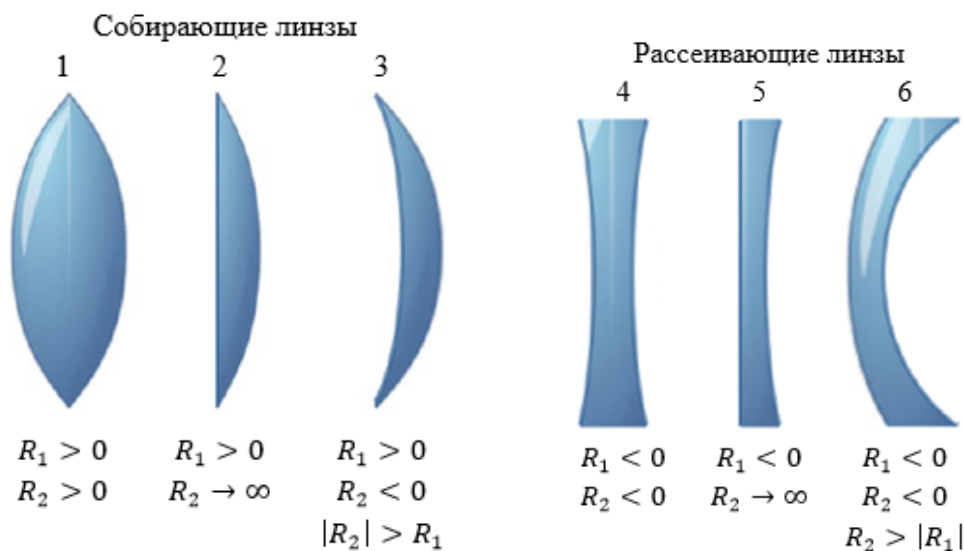


Рис. 6.5: Типы линз

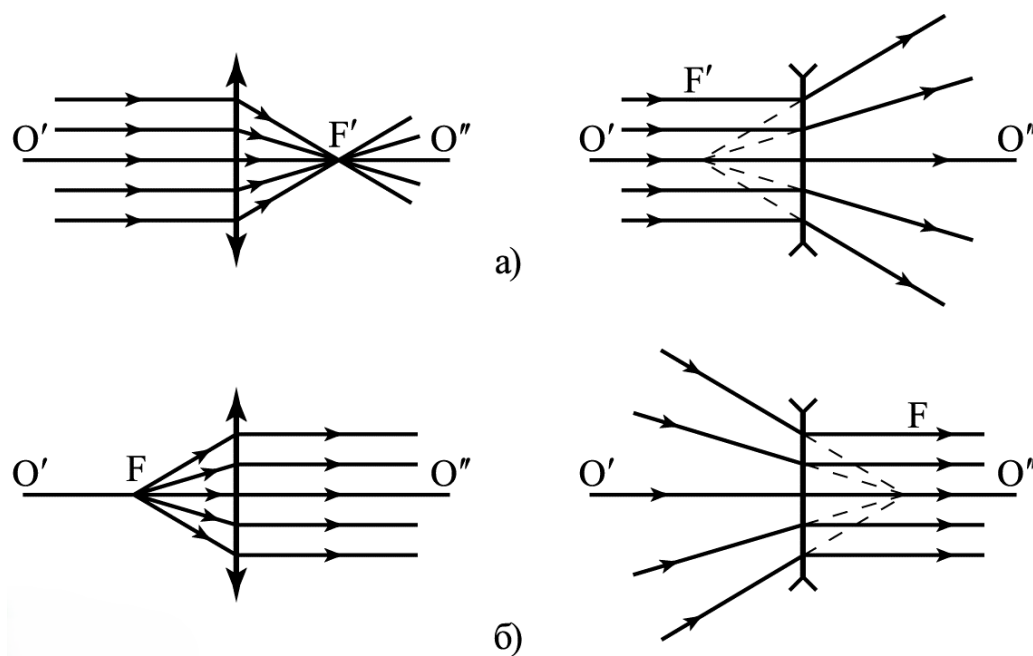


Рис. 6.6: Распространение параллельных пучков в линзах

Если показатели преломления оптических сред, находящихся по разные стороны от линзы, одинаковы, то точки F и F' расположены от линзы на одинаковом расстоянии, которое называется фокусным расстоянием.

Линзу называют тонкой, если ее толщина пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны поверхностей и расстоянием от предмета до линзы. Для тонкой собирающей линзы расстояние d от предмета AB до линзы и расстояние f от линзы до изображения предмета $A'B'$ (рис. 6.7) связаны с фокусным расстоянием F соотношением:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

Если источник и его изображение являются действительными, то $d > 0$ и $f > 0$. В этом слу-

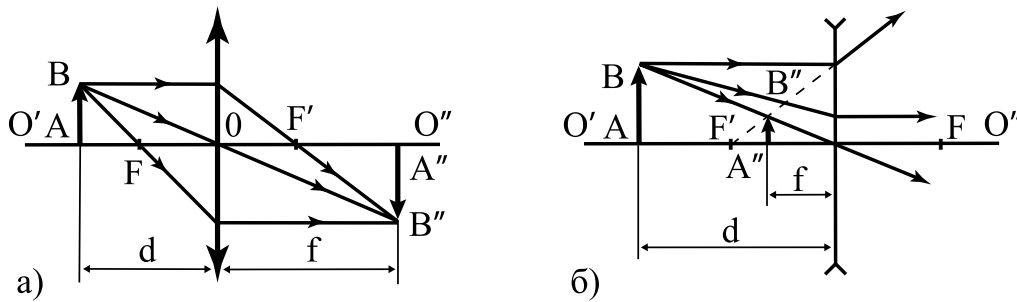


Рис. 6.7: Построение изображений в линзах

чае источник света (предмет) и его изображение находятся по разные стороны от преломляющей поверхности. Если же источник или его изображение мнимые, то и соответствующие значения d или f отрицательны; предмет и изображение находятся по одну сторону от линзы. Необходимо также учитывать, что фокусное расстояние рассеивающей линзы отрицательно $F < 0$.

Описание установки

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, осветитель, блок питания, собирающая линза, рассеивающая линза, экран, рейтеры, линейка.

Фокусное расстояние собирающей линзы можно несколькими способами. В работе предлагаются два.

Способ 1. По расстоянию от предмета и его изображения до линзы.

Фокусное расстояние F можно непосредственно определить, используя формулу тонкой линзы, с подстановкой в нее экспериментально измеренных величин d и f :

$$F = \frac{df}{d + f}$$

Расположив предмет, собирающую линзу и экран, как показано на рис. 6.8а, и добившись четкого изображения предмета на экране, измеряют расстояния d и f . Недостатком такого способа определения F является то, что любая линза не является тонкой, и необходимо учитывать расстояние между ее поверхностями.

Способ 2. По величине перемещения линзы (метод Бесселя). Для более точного определения фокусного расстояния используют метод перемещения линзы, который следует из свойств собирающей линзы (при выполнении условия $L > 4F$). На экране получают два изображения предмета: увеличенное и уменьшенное. Из рис. 6.8б видно, что собирающая линза дает четкое изображение предмета на экране при двух ее положениях, расстояние между которыми l . В этом случае фокусное расстояние связано с экспериментально измеряемыми величинами L и l соотношением:

$$F = \frac{L^2 - l^2}{4L}$$

Таким образом, для определения фокусного расстояния линзы достаточно измерить расстояние L между предметом и экраном, а также расстояние l между двумя положениями линзы, при которых на экране видны четкие изображения.

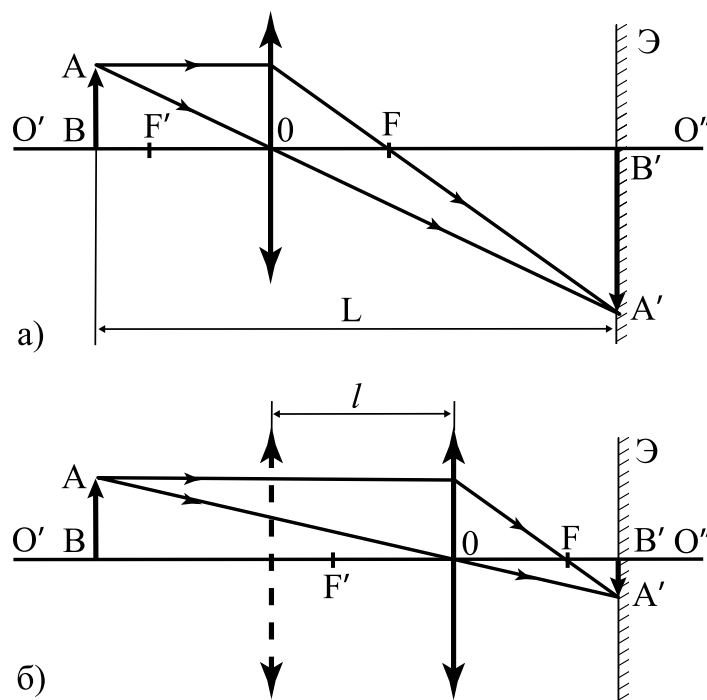


Рис. 6.8: Способы определения фокусного расстояния

Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы непосредственным применением формулы линзы невозможно, поскольку она не может дать действительного изображения предмета на экране. Однако эта задача может быть решена при одновременном использовании собирающей и рассеивающей линз (рис. 6.9). Собирающая линза L_1 дает на экране изображение В светящейся точки А, лежащей на главной оптической оси. Если между линзой и экраном поместить рассеивающую линзу L_2 , то, отодвигая экран от рассеивающей линзы, можно получить новое изображение С светящейся точки на экране, который находится на расстоянии d от линзы L_2 . На основании принципа обратимости хода лучей в линзе можно утверждать, что если в точке С поместить светящуюся точку, то ее мнимое изображение получится в точке В. Из формулы тонкой рассеивающей линзы

$$-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$$

получим ее фокусное расстояние:

$$F = \frac{df}{d - f}$$

Для проведения измерений используется оптическая установка, изображенная на рисунке 6.10. Осветитель Осв. подключен к блоку питания БП. Свет от лампочки осветителя падает на матовую поверхность предмета (прорези), выполненного в виде стрелки (или в виде другой формы) П. Светящаяся стрелка является предметом, изображение которого создается на экране Э системой собирающей СЛ и рассеивающей РЛ линз. Линзы с помощью рейтеров можно перемещать вдоль оптической скамьи.

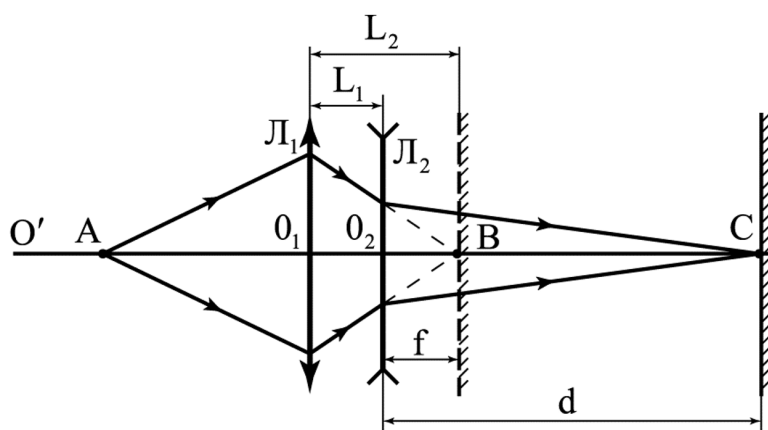


Рис. 6.9: Оптическая система из двух линз для определения фокусного расстояния рассеивающей линзы

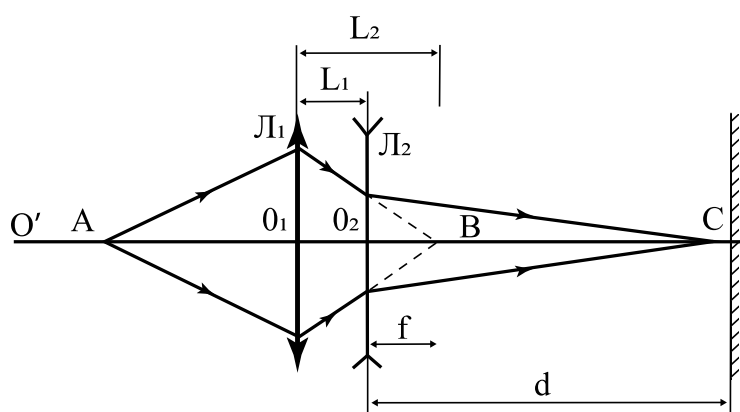


Рис. 6.10: Оптическая система из двух линз для определения фокусного расстояния рассеивающей линзы

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение фокусного расстояния собирающей линзы по расстоянию до объекта и предмета

1. Расположите на оптической скамье собирающую линзу между предметом и экраном. Включите осветитель.
2. Перед началом измерений проведите юстировку оптической системы: придвиньте собирающую линзу вплотную к предмету и добейтесь того, чтобы объект-предмет был расположен симметрично относительно поверхности линзы.
3. Варьируя положение линзы и экрана, получите отчетливое изображение светящегося предмета на экране. С помощью линейки измерьте расстояние d от предмета до центра линзы, а также расстояние f от экрана до центра линзы, полученные результаты занесите в таблицу 1. Повторите измерения еще несколько раз, вновь перемещая экран и предмет и настраивая линзу. Определите новое положение, при котором получается четкое изображение.
4. Рассчитайте средние значения $\langle d \rangle$ и $\langle f \rangle$. Оцените абсолютную погрешность измерений Δd и Δf .

Таблица 6.1: Определение фокусного расстояния

№	d , мм	f , мм	$\langle d \rangle \pm \Delta d$, мм	$\langle f \rangle \pm \Delta f$, мм	$\langle F \rangle \pm \Delta F$, мм
1					
2					
3					
4					
5					

5. Рассчитайте фокусное расстояние ΔF собирающей линзы. Определите погрешность измерений ΔF .

Задание 2. Определение фокусного расстояния собирающей линзы способом Бесселя

1. Схема установки остается неизменной. Расположите экран и предмет на расстоянии, превышающем в четыре раза фокусное расстояние $L > 4F$, значение F возьмите из предыдущего задания. Измерьте расстояние L , результат измерения занесите в таблицу 2. Расстояние L в задании остается неизменным.
2. Включите осветитель. Изменяя положение линзы, получите четкое увеличенное изображение предмета на экране, отметьте на скамье это положение (X_1) линзы. Перемещая линзу, получите на экране четкое уменьшенное изображение предмета и отметьте на оптической скамье это положение (X_2) линзы. Рассчитайте расстояние между соответствующими положениями линзы $l = X_1 - X_2$. Результаты измерений занесите в таблицу 6.2.

Таблица 6.2: Определение фокусного расстояния по методу Бесселя для $L = \underline{\hspace{2cm}}$

№	X_1 , мм	X_2 , мм	l , мм	$\langle l \rangle \pm \Delta l$, мм	$\langle F \rangle \pm \Delta F$, мм
1					
2					
3					
4					
5					

3. Повторите предыдущие измерения l несколько раз. После измерений выключите осветитель.

4. Рассчитайте среднее значение $\langle l \rangle$, оцените абсолютную погрешность измерения Δl .
5. Вычислите фокусное расстояние линзы по формуле:

$$F = \frac{L^2 - l^2}{4L}$$

Определите погрешность измерений ΔF .

6. Сравните полученное значение с результатом из задания 1.

Задание 3. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

1. Соберите на оптической скамье установку, расположив рассеивающую линзу между собирающей линзой и экраном. Расстояние между линзами должно быть минимальным. Перемещая обе линзы вместе и экран, добейтесь четкого изображения предмета на экране.
2. Измерьте расстояние d между рассеивающей линзой и экраном. Результат измерения занесите в таблицу 6.3.

Таблица 6.3: Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

d , мм	a , мм	b , мм	f , мм	F , мм

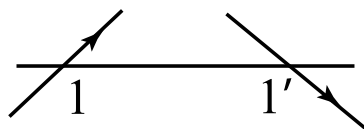
3. Измерьте расстояние a между собирающей и рассеивающей линзами.
4. Снимите со скамьи рассеивающую линзу. Передвигая экран по направлению к собирающей линзе, получите четкое изображение предмета. Измерьте расстояние b между собирающей линзой и экраном.
5. Вычислите расстояние f от мнимого изображения до рассеивающей линзы, используя соотношение $f = b - a$.
6. Вычислите фокусное расстояние рассеивающей линзы по формуле $F = \frac{df}{d-f}$.
7. Напишите заключение к работе.

Контрольные вопросы

1. При каком условии размер изображения в собирающей линзе равен размеру предмета?
2. Какие условия необходимо создать, чтобы собирающая линза стала рассеивающей?
3. Выведите формулу:

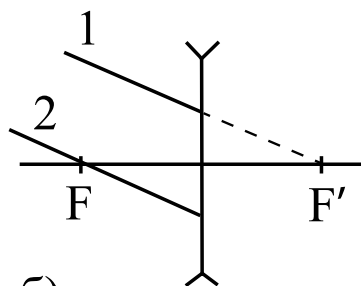
$$F = \frac{L^2 - l^2}{4L}$$

4. Как еще можно определить фокусное расстояние собирающей линзы?
5. Можно ли сфотографировать изображение в рассеивающей линзе?
6. На рисунке ?? изображена главная оптическая ось тонкой линзы, падающий и преломленный лучи 1 и 1'. Построением найдите положение линзы и ее фокусов.



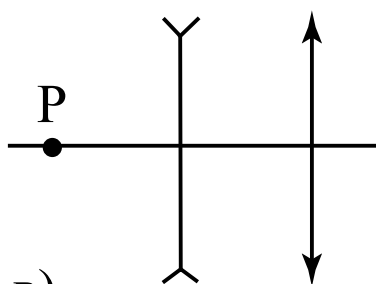
а)

7. Постройте на рисунке ?? ход параллельных лучей 1 и 2 после прохождения ими тонкой рассеивающей линзы.



б)

8. На рисунке ?? изображена система двух тонких линз, передние фокусы которых совпадают с оптическими центрами. Постройте изображение точки P, находящейся в заднем фокусе рассеивающей линзы.



в)

Литература

1. Г.Я. Мякишев, А.З. Синяков. Физика. 11 класс. Углубленный уровень. Оптика. Квантовая физика, М.: ДРОФА, 2019, §§ 1.8, 1.18–1.20.
2. Физика-10 под редакцией А.А. Пинского, М.: Просвещение, 2019, § 42.

6.3 Лабораторная работа №21 Изучение дифракции света

Цель работы: Наблюдение явления дифракции света от дифракционной решетки в лучах лазера и источника белого света; измерение длины волны излучения лазера.

Введение

В однородной среде свет распространяется прямолинейно. Если в среде имеются резкие неоднородности (например, граница непрозрачного препятствия), то вблизи них наблюдается нарушение закона геометрической оптики о прямолинейном распространении света. Проникновение света в область геометрической тени (огибание препятствий) называется дифракцией света.

Если на пути параллельного светового пучка расположено круглое препятствие (круглый диск, шарик или круглое отверстие в непрозрачном экране), то на экране, расположенном на достаточно большом расстоянии от препятствия, появляется дифракционная картина – система чередующихся светлых и темных колец. Если препятствие имеет линейный характер (щель, нить, край экрана), то на экране возникает система параллельных дифракционных полос.

Для наблюдения дифракции световых волн необходимо создание специальных условий. Это обусловлено тем, что масштабы дифракции сильно зависят от соотношения размеров препятствия и длины волны.

Рассмотрим экран с отверстием, на который падает параллельный пучок лучей монохроматического света с длиной волны λ (рис. 6.11), где b – размер отверстия, l – расстояние от экрана до точки наблюдения. По принципу Гюйгенса каждая точка в плоскости отверстия является источником вторичных сферических волн.

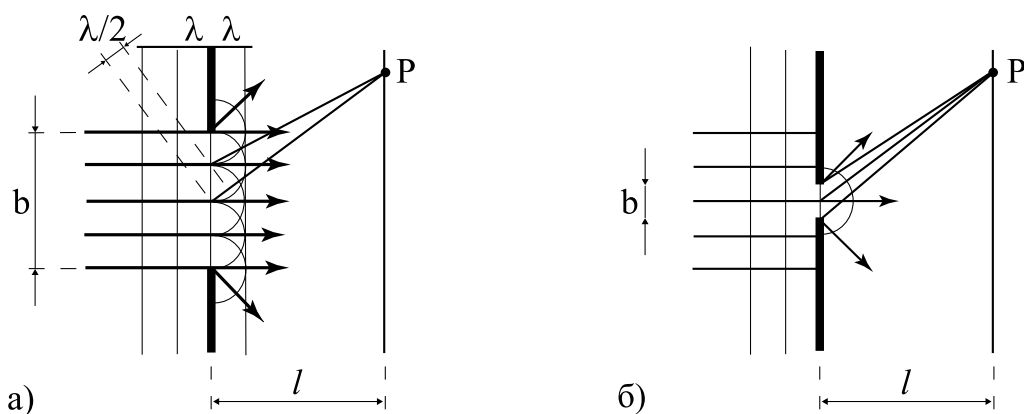


Рис. 6.11: Дифракция волн на отверстии

На рисунке 6.11 изображена огибающая всех вторичных волн через интервал времени, равный периоду. Часть света распространяется в области геометрической тени. Однако принцип Гюйгенса не позволяет ответить на вопрос: какова эта часть? Чтобы определить интенсивность света, например, в точке P , необходимо учесть интерференцию (наложение) всех

вторичных волн в данной точке. Принцип Гюйгенса, дополненный условием интерференции вторичных волн, называется принципом Гюйгенса – Френеля.

Если размер отверстия большой по сравнению с длиной волны λ (выполнено неравенство $\frac{b}{\lambda} \gg \frac{l}{b}$), то, как видно из рисунка 6.11а, существует множество пар точек в плоскости отверстия, расстояния от которых до точки P отличается на $\lambda/2$. Волны от этих точек приходят в точку P в противофазе и, следовательно, гасят друг друга. На рисунке 6.11а указана лишь одна пара таких точек. Разность расстояний от них до точки P (разность хода) равна $\lambda/2$. Таким образом, за широким отверстием свет распространяется в основном в направлении падающих лучей, и лишь незначительная его часть проникает в область геометрической тени.

Если же размер отверстия мал по сравнению с длиной, то есть выполнено условие $\frac{b}{\lambda} \ll \frac{l}{b}$ (рис. 6.11б), то расстояние от всех точек в плоскости отверстия до точки P отличаются незначительно. Волны от всех вторичных источников приходят в точку P в фазе и, следовательно, усиливают друг друга. В этом случае значительная часть энергии света, прошедшего через отверстие, распространяется в область геометрической тени.

Отсюда дифракция света (и волн любой природы) заметно проявляется в том случае, когда размер отверстия (препятствия) в экране или размер неоднородностей в среде, в которой распространяется свет, имеет порядок величины, сравнимой с длиной волны λ . Более точно, когда выполнено условие:

$$\frac{b}{\lambda} \lesssim \frac{l}{b}$$

При практическом использовании дифракции света большой интерес представляет дифракционная решетка, представляющая собой совокупность большого числа щелей, разделенных непрозрачными промежутками. Расстояние d между серединами соседних щелей называется периодом решетки (рис. 6.12).

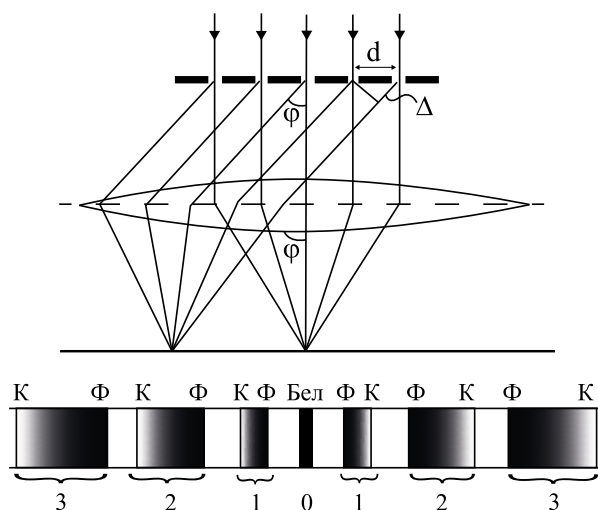


Рис. 6.12: Дифракция света при падении света по нормали к решетке

Пусть на дифракционную решетку с числом щелей N падает нормально плоская монохроматическая волна с длиной λ . Каждая щель решетки становится источником вторичных волн. Обычно за решеткой помещают линзу с экраном в ее фокальной плоскости. Интенсивность света в направлении, заданном углом φ , зависит от разности хода Δ волн от соседних

щелей. Если свет будет когерентным, то световые волны от всех щелей будут интерферировать друг с другом и будет наблюдаться система максимумов и минимумов. Из рисунка 6.12 видно, что разность хода лучей от соседних щелей равна

$$\Delta = d \sin \varphi$$

Если разность хода от соседних щелей равна целому числу k длин волн λ , то есть $\Delta = \pm k\lambda$, то выполняется условие интерференционного максимума. Тогда получаем условие дифракционных максимумов решетки:

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda$$

где k – порядок главного максимума. Колебания от соседних щелей при выполнении условия максимумов будут приходить в одинаковой фазе и усиливать друг друга, то есть будет наблюдаться максимум освещенности светом с данной длиной волны.

Результирующая амплитуда, создаваемая решеткой в соответствующей точке экрана, будет в N раз больше амплитуды от одной щели:

$$A_{\max} = N A_{\varphi}$$

где A_{φ} – амплитуда колебания от одной щели под углом φ . Учтем, что интенсивность света $I \sim A^2$, тогда:

$$I_{\max} = N^2 I$$

Минимумы интенсивности будут наблюдаться при условии:

$$b \sin \varphi = \pm k\lambda$$

где b – ширина щели.

Стоит отметить, что кроме главных дифракционных минимумов и максимумов возникают еще добавочные минимумы (интерференционные минимумы) между соседними главными максимумами, а между двумя соседними главными максимумами располагаются интерференционные минимумы, между которыми в свою очередь располагаются слабые вторичные максимумы.

Как следует из формулы дифракционной решетки, положение главных максимумов (кроме нулевого) зависит от длины волны λ . Таким образом, дифракционная решетка раскладывает падающее излучение в спектр, то есть является спектральным прибором. Рассмотрим решетку, на которую падает монохроматический свет с длиной волны λ . Тогда существует ряд значений φ_k , определяющих направление максимума интенсивности. Следовательно:

$$\sin \varphi_k = k \frac{\lambda}{d}, \quad k = 0; \pm 1; \pm 2 \dots$$

На экране будет наблюдаться система узких линий (см., например, линии Ф на рис. 6.12), разделенных темными промежутками. Максимуму нулевого порядка ($k = 0, \varphi_0 = 0$) соответствует самая яркая линия в центре экрана. Ближайшие к ней две линии ($k = \pm 1, \sin \varphi_1 = \pm \frac{\lambda}{d}$) являются максимумами первого порядка и т. п. Если на решетку падает белый свет, то положения максимумов фиолетового (Ф) и красного (К) света не будут совпадать (кроме максимумов

нулевого порядка, см. линию «Бел» на рис. 6.12). Для максимума первого порядка следует, что ближе к центру расположена фиолетовая линия $\lambda < \lambda$, поэтому $\varphi_1 < \varphi_1$. Таким образом, если на решетку падает немонахроматическое излучение, то в каждом порядке дифракции (при каждом значении k) возникает спектр исследуемого излучения, наблюдается ряд цветных полос.

С помощью дифракционной решетки можно производить очень точные измерения длины волны. Если период d решетки известен, то определение длины сводится к измерению угла φ , соответствующего направлению на выбранную линию в спектре k -го порядка.

В настоящее время изготавливаются решетки с числом щелей до 2000 и более на ширине в 1 мм. На практике применяются также и более грубые решетки с числом щелей $50 \div 100$ на 1 мм. В качестве дифракционной решетки может быть использован, например, кусочек компакт-диска.

Обычный компакт-диск может работать как оптический прибор – дифракционная решетка. Концентрические дорожки, на которых записаны данные, расположены друг к другу настолько близко, что на них происходит дифракция света. При этом лучи разных цветов дифрагируют по-разному, и на диске можно видеть спектр падающего света.

Явление дифракции широко используется в прикладной науке. Его особенности лежат в основе методов исследования и технологий, применяемых в самых разных областях.

Одной из важнейших сфер является рентгеноструктурный анализ. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллической решетке позволяет определить структуру веществ с атомной точностью. Этот метод стал основным инструментом в материаловедении, биохимии (например, для изучения структуры белков и ДНК) и фармакологии.

Дифракционные решетки используются для спектрального анализа, который необходим в химии, астрономии и аналитических технологиях. С их помощью можно разделять свет на составляющие длины волн, что позволяет исследовать состав вещества или излучения.

В оптической инженерии дифракция используется для создания высокоточных приборов, таких как лазеры и голографические устройства. В современном производстве это явление лежит в основе литографических методов, применяемых для изготовления полупроводниковых микросхем.

Также дифракция играет ключевую роль в современных оптических коммуникациях. Применение дифракционных эффектов в волоконно-оптических системах позволяет оптимизировать передачу данных, улучшая качество и скорость сигналов.

Описание установки

Обратите внимание на правила работы с дифракционными решетками! Поверхность дифракционных решеток легко повреждается отпечатками пальцев, аэрозолями, после контакта с влагой. Малейший контакт с абразивными частицами также приводит к неисправностям. Необходимо соблюдать требования по эксплуатации: перемещая решетку, держите ее ТОЛЬКО за боковые стороны! **Приборы и принадлежности:** источник питания, осветитель, дифракционные решетки, линза, экран, линейка, лазеры разных длин волн, слайд с щелью.

Измерения выполняются на установке, схема которой приведена на рисунке 6.13. На оптической скамье устанавливают лазер и держатель дифракционной решетки ДР с пере-

движным экраном Э со шкалой. На оптической оси также закрепляется линейка Л для определения расстояния от решетки/щели до экрана. Расстояние между решеткой и экраном l измеряется по шкале, нанесенной на рейке. Генерируемый лазером узкий пучок монохроматического света падает на решетку. В результате интерференции волн от всех освещенных щелей за решеткой наблюдается несколько пучков света, образующих углы φ_k с направлением падающих лучей (рис. 6.14). При этом на экране видны несколько освещенных пятен с координатами x_k . Синус угла дифракции определяется формулой в виде:

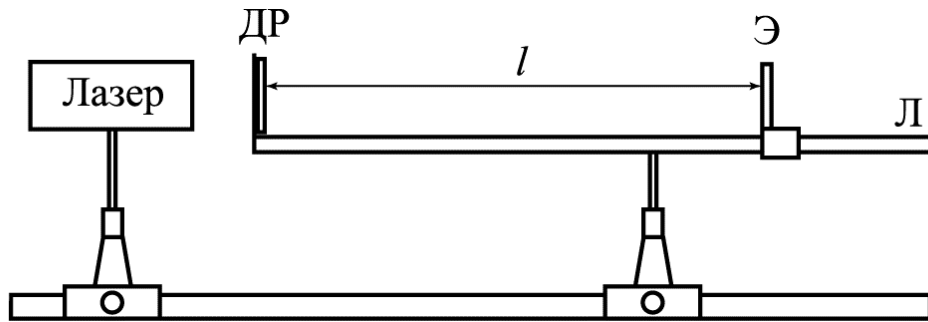


Рис. 6.13: Схема экспериментальной установки

матического света падает на решетку. В результате интерференции волн от всех освещенных щелей за решеткой наблюдается несколько пучков света, образующих углы φ_k с направлением падающих лучей (рис. 6.14). При этом на экране видны несколько освещенных пятен с координатами x_k . Синус угла дифракции определяется формулой в виде:

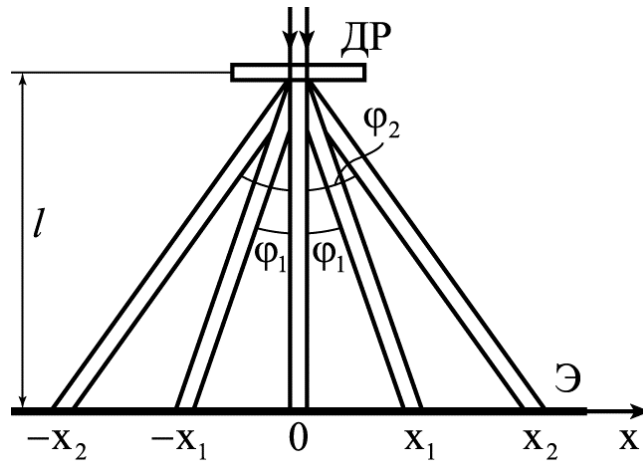


Рис. 6.14: Схематическое изображение светлых пятен на экране

$$\sin \varphi_k = \frac{x_k}{\sqrt{l^2 + x_k^2}}$$

Таким образом, при известном периоде решетки d измеряют расстояние l от решетки до экрана и координату x_k максимума k -го порядка. Тогда длина волны излучения лазера равна:

$$\lambda = \frac{d \cdot l}{k \cdot \sqrt{l^2 + x_k^2}}$$

Из формулы видно, что x_k обратно пропорционально d . Поэтому при неизменном значении l можно определить период решетки по координатам x_{k1} и x_{k2} k -максимума, заменив известную решетку неизвестной:

$$d_2 = d_1 \frac{\sqrt{l^2 + x_{k1}^2}}{\sqrt{l^2 + x_{k2}^2}}$$

где d_1 и d_2 – периоды известной и неизвестной решеток соответственно.

Для наблюдения дифракции белого света на оптической скамье (рис. 6.15) устанавливают осветитель Осв., линзу Л1, дифракционную решетку ДР, линзу Л2 и экран Э. Свет от осветителя, пройдя через линзу Л1, падает параллельным пучком на дифракционную решетку. Дифракция света наблюдается на экране, помещенном в фокальной плоскости линзы Л2.

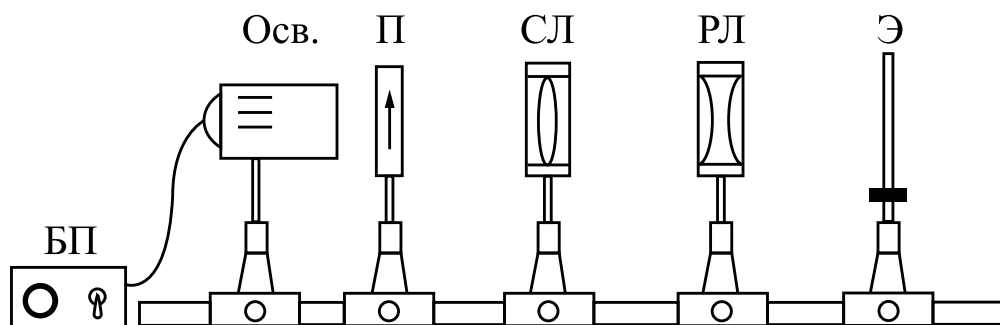


Рис. 6.15: Схема установки для наблюдения дифракции

Порядок выполнения работы

Задание 1. Измерение длины волны излучения лазера

1. Установите на оптическую скамью лазер, держатель для дифракционной решетки и экран.
2. Вставьте в держатель дифракционную решетку с известным периодом d . Закрепите на экране лист миллиметровой бумаги размером не менее YY на ZZ мм.
3. Включите лазер и направьте его луч на центр дифракционной решетки. При правильной настройке на экране должны наблюдаться яркие пятна (центральный и симметрично расположенные относительно него боковые максимумы).
4. Отодвиньте экран от решетки на расстояние l ($20 \div 30$ см) так, чтобы на экране наблюдалось не менее $3 \div 5$ максимумов с каждой стороны от центрального пятна. Измерьте с помощью линейки расстояние l и запишите в таблицу 6.4.

Таблица 6.4: Определение длины волны лазера

d , мм	$l \pm \Delta l$, мм	Порядок максимума	Δx , мм	λ , нм	$\lambda \pm \Delta \lambda$, нм
		1			
		2			
		3			

5. Обведите на листе миллиметровой бумаги контуры дифракционных максимумов: центральный и два боковых максимума по обе стороны от центрального.
6. Определите геометрические центры пятен, соответствующих максимумам первого, второго и третьего порядков. Измерьте линейкой расстояния Δx между центрами пятен. Данные занесите в таблицу 6.4.
7. Рассчитайте для каждого максимума длину волны излучения лазера по формуле

$$\lambda = \frac{d \cdot \sqrt{l^2 + \left(\frac{\Delta x_k}{2}\right)^2}}{k \cdot l}$$

8. Рассчитайте среднее значение длины волны лазера, используя 3 значения, полученных по формуле выше. Определите погрешность.
9. Сравните полученное значение с табличным.
10. Определите количество наибольшее главных максимумов, которые можно наблюдать в данном эксперименте.

Задание 2. Определение периода неизвестной решетки

1. Аналогично заданию 1 при одном и том же расстоянии экрана от решетки проведите измерения для определения периода решетки с неизвестным периодом d_2 . Данные занесите в таблицу ??.
2. Рассчитайте период неизвестной решетки d_2 .

Задание 3. Наблюдение дифракционной картины от лампы накаливания

1. Перейдите к установке для наблюдения дифракционной картины от лампы накаливания. Включите осветитель.
2. Занесите результаты наблюдения дифракционной картины в журнал и объясните его.
3. По окончании измерений выключите приборы!
4. Напишите заключение к работе.

Контрольные вопросы

1. Какое явление называют дифракцией света? При каких условиях ее можно наблюдать?
2. В чем заключается принцип Гюйгенса – Френеля?
3. Что представляет собой дифракционная решетка? Что называется периодом дифракционной решетки?
4. Почему дифракция лазерного луча хорошо наблюдается без установки линзы за дифракционной решеткой, тогда как при наблюдении дифракционной картины от осветителя линза необходима?

5. Почему чередование от фиолетового к красному цвету в каждом из порядков спектров идет от центра к периферии?
6. Почему размер светового пятна, соответствующего дифракционному максимуму, растет с ростом порядка максимума k ?
7. Каково теоретически возможное количество наблюдаемых дифракционных максимумов? Почему число наблюдаемых максимумов не совпадает с теоретическим?
8. Что произойдет с дифракционной картиной от одной щели при увеличении или уменьшении ширины щели?
9. Где применяются дифракционные решетки?

Литература

1. Г.Я. Мякишев, А.З. Синяков. Физика. 11 класс. Углубленный уровень. Оптика. Квантовая физика, М.: ДРОФА, 2019, §§ 2.8, 2.12.
2. Физика-10 под редакцией А.А. Пинского, М.: Просвещение, 2019, § 34–35.

6.4 Лабораторная работа №22 Изучение поляризации света и проверка закона Малюса

Цель работы: Наблюдение явления линейной поляризации света; измерение интенсивности поляризованного света в зависимости от угла поворота поляризатора; экспериментальная проверка закона Малюса.

Введение

Электромагнитные волны являются поперечными волнами. Это значит, что в каждой точке волны напряженность электрического поля $\vec{E}$ и магнитная индукция $\vec{B}$ перпендикулярны к скорости ее распространения $\vec{V}$, причем $\vec{E} \perp \vec{B}$ (рис. 6.16). Опыт показывает, что во всех процессах взаимодействия света с веществом основную роль играет вектор $\vec{E}$, его называют световым вектором.

Поляризованным называется свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-либо образом упорядочены.

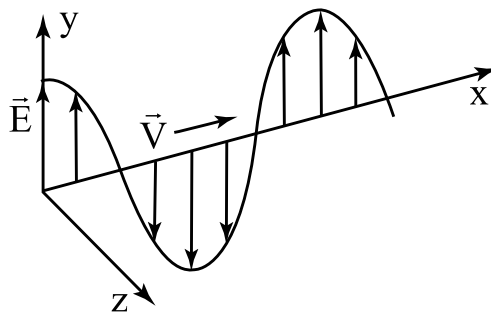


Рис. 6.16: Электромагнитная волна

В элементарной световой волне, то есть излученной отдельным атомом, векторы $\vec{E}$ в различных точках луча колеблются в одной плоскости (рис. 6.16). В каждой точке вектор напряженности, изменяясь по величине, периодически меняет свое направление на противоположное (колеблется). Согласованные колебания векторов $\vec{E}$ приводят к перемещению профиля волны в направлении оси Ox . Плоскость колебаний вектора $\vec{E}$ в этом случае называется плоскостью колебаний. По историческим причинам плоскостью поляризации была названа не плоскость, в которой колеблется вектор $\vec{E}$, а перпендикулярная к ней плоскость, в которой совершает колебания вектор $\vec{B}$.

В естественном свете, излученном многими атомами, содержатся волны с различными ориентациями плоскости поляризации. На рисунке 6.17 показаны всевозможные направления колебания светового вектора в пучке естественного света. Такой свет называется неполяризованным.

Если колебания светового вектора происходят только в одной плоскости, свет называют плоско- (или линейно-) поляризованным. Линейно-поляризованный свет испускается лазерными источниками. Волна может оказаться поляризованной при отражении или рассеянии. Неполяризованный свет после падения на некоторые поверхности, такие как листва, кожа, стекло, дерево, фарфор, пластмасса, водная поверхность, поляризуется, в частности,

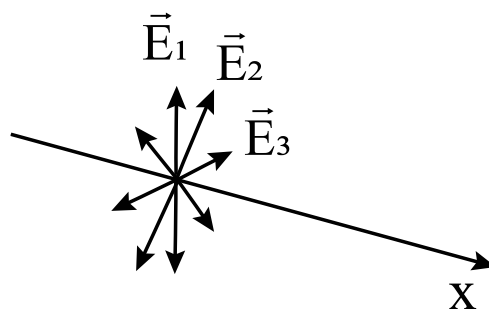


Рис. 6.17: Направления светового вектора в случае многих атомов

голубой свет от неба частично или полностью поляризован. Свет, испускаемый обычными источниками (например, солнечный свет, излучение ламп накаливания и т. п.), неполяризован.

Плоско-поляризованный свет можно получить из естественного с помощью прибора, называемого поляризатором. Он представляет собой пленку или пластину из кристаллического вещества – поляроида. Поляроидные пленки обладают линейным дихроизмом, то есть неодинаково поглощают две перпендикулярные линейно-поляризованные составляющие излучения. При типичных толщинах пленок в $0.05 \div 0.1$ мм одна из составляющих поглощается почти полностью, а другая, лишь несколько ослабляясь, проходит через поляроид. Действие пленочного полимерного поляроида обусловлено дихроизмом молекул полимера.

Таким образом, поляроид способен пропускать свет с определенным направлением колебаний вектора $\vec{E}$. Это направление совпадает с некоторой выделенной осью кристалла или пленки и называется осью поляризатора. Прошедший через поляризатор луч естественного света оказывается плоско-поляризованным (рис. 6.18).

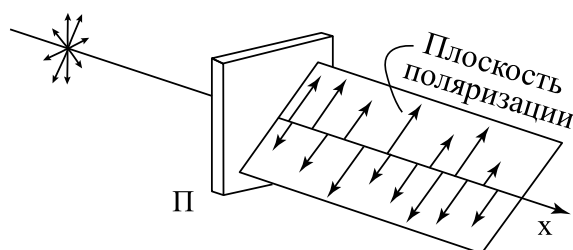


Рис. 6.18: Поляризация естественного света

Естественный и поляризованный свет оказывают одинаковое физиологическое воздействие на зрение человека, поэтому человек без специальных приборов не отличает поляризованный свет от естественного. Специальным прибором может служить тот же поляризатор, называемый в данном случае анализатором. Если на него падает луч естественного света, то вращение анализатора относительно луча не приводит к изменению интенсивности прошедшего через него света. Иначе обстоит дело с поляризованным светом.

Расположим на пути естественного света поляризатор и за ним анализатор. Ось анализатора образует угол α с осью поляризатора (рис. 6.19а). Пусть E_0 – амплитуда напряженности электрического поля в плоско-поляризованной волне, падающей на анализатор. Вектор $\vec{E}_0$ можно разложить на две составляющие: $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ (рис. 6.19б). Перпендикулярная к оси

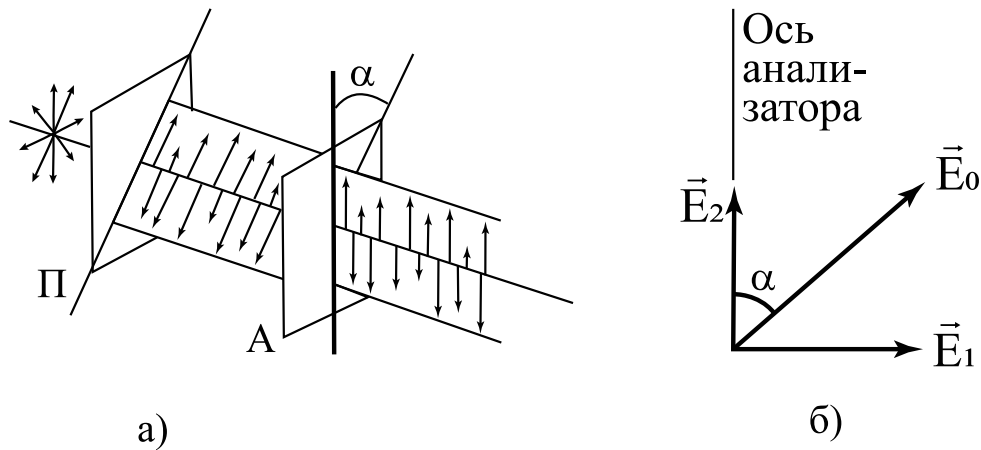


Рис. 6.19: Прохождение естественного света через анализатор

анализатора составляющая $\vec{E}_1$ будет поглощена веществом, а параллельная составляющая $\vec{E}_2$ пройдет через анализатор. Тогда амплитуда напряженности электрического поля в волне, прошедшей через анализатор:

$$E_2 = E_0 \cos \alpha$$

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитудного значения вектора $\vec{E}$ ($I \sim E^2$), следовательно:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

где I – интенсивность света, прошедшего через анализатор, I_0 – интенсивность падающего на него плоско-поляризованного света; α – угол между осью поляризатора и осью анализатора. Это соотношение называется законом Малюса.

При вращении поляризатора вокруг направления распространения неполяризованного луча интенсивность прошедшего света остается одной и той же, изменяется лишь ориентация плоскости колебаний света, выходящего из прибора.

Рассмотрим прохождение неполяризованного света через два поляризатора, плоскости которых образуют угол α . Из первого поляризатора выйдет плоско-поляризованный свет, интенсивность которого I_0 составит половину интенсивности неполяризованного света $I_{\text{ест}}$. Согласно закону Малюса из второго поляризатора (он играет роль анализатора) выйдет свет интенсивности $I_0 \cos^2 \alpha$. Таким образом, интенсивность света, прошедшего через два поляризатора, равна

$$I = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \cos^2 \alpha$$

Максимальная интенсивность, равная $\frac{1}{2} I_{\text{ест}}$, получается при $\alpha = 0$ (поляризаторы параллельны). При $\alpha = \frac{\pi}{2}$ интенсивность равна нулю – скрещенные поляризаторы свет не пропускают.

Помимо плоско-поляризованного света и неполяризованного света существует частично поляризованный свет. Например, из-за несовершенства поляроида прошедший через поляризатор естественный свет может оказаться лишь частично поляризованным. В частично поляризованной волне колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений, то есть смесь неполяризованной и плоско-поляризованной. Если пропустить частично поляризованный свет через поляризатор, то при вращении прибора вокруг направления распространения луча интенсивность прошедшего света будет изменяться в

пределах от $I_{\max}$ до $I_{\min}$, причем переход от одного из этих значений к другому будет совершаться при повороте на угол $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Частично-поляризованный свет характеризуют степенью поляризации P :

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Для плоско-поляризованного света $I_{\min} = 0$ и $P = 1$; для неполяризованного света $I_{\max} = I_{\min}$ и $P = 0$.

Поляризация света широко применяется на практике. Например, поляризационные пленки являются составной частью поляризационных очков, в которых гасятся блики солнца от воды, а свет фар встречных машин не слепит водителя. Свет от экранов жидкокристаллических мониторов также частично поляризован. Поляризационные методы используются в минералогии, кристаллографии, геологии, биологии, астрофизике, метеорологии, при изучении атмосферных явлений.

Описание установки

Приборы и принадлежности: источник питания, оптическая скамья, осветитель, поляризатор, анализатор (второй поляризатор), фотоэлемент (или иной приемник света), микроамперметр, соединительные провода, люксметр (при наличии), лазер.

Эксперимент может выполняться с использованием осветителя и микроамперметра. В качестве поляризатора и анализатора в работе используются стекла с нанесенной полимерной пленкой, закрепленные в оправе со шкалой, позволяющей измерять угол поворота. Вместо фотоприемника и микроамперметра может использоваться люксметр (как источник информации о интенсивности света).

Схема установки приведена на рисунке 6.20. На оптической скамье размещены осветитель Осв., поляризатор П, анализатор А и фотоэлемент ФЭ, подключенный к микроамперметру мкА. Осветитель подключен через трансформатор, позволяющий регулировать силу света.

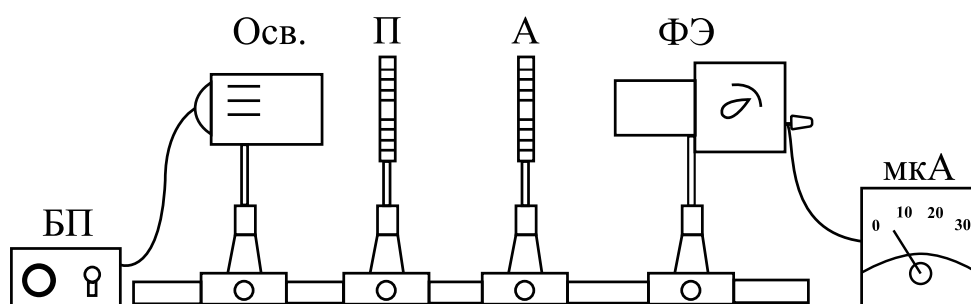


Рис. 6.20: Схема экспериментальной установки

Излучение осветителя падает узким пучком на поляризатор, а затем на анализатор. При освещении фотоэлемента в нем возникает фототок. Его величина i пропорциональна интенсивности света I , прошедшего через анализатор.

В работе измеряется зависимость величины фототока i от угла поворота анализатора вокруг оси луча α . Так как $i \sim I$, из закона Малюса следует:

$$i = i_0 \cos^2 \alpha,$$

где i_0 – показания микроамперметра при $\alpha = 0$, то есть при таком положении анализатора, когда его ось параллельна оси поляризатора. Это положение можно найти с помощью микроамперметра: при $\alpha = 0$ фототок должен иметь максимальное значение.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Проверка закона Малюса

1. Установите на оптической скамье осветитель, поляризатор, анализатор и фотоэлемент с микроамперметром.
2. Включите осветитель.
3. Установите риску на оцифрованной оправе анализатора на 0. Вращая поляризатор, выберите такое его положение, при котором сила фототока максимальна. Для большей точности, слегка поворачивая поляризатор в одну и другую сторону, определите по шкале диапазон углов, в пределах которого фототок практически не отличается от максимального. Установите указатель углов в центре этого диапазона. Запишите в таблицу 1 показание микроамперметра $i_0 + i_\phi$, а также значение фонового тока i_ϕ , перекрыв свет вблизи осветителя.
4. Поверните анализатор на угол $\alpha = 45^\circ$ относительно его начального положения. Запишите новое показание микроамперметра $i + i_\phi$ и значение i_ϕ .
5. Выполните измерения для всех значений угла α от 0° до 360° с шагом в 15° . Результаты занесите в таблицу 6.5

Таблица 6.5: Проверка закона Малюса

α	0	15	30	45	...	330	345	360
$i + i_\phi$, мкА								
i_ϕ , мкА								
i , мкА								
i/i_0								
$\cos^2 \alpha$								

6. Рассчитайте силу фототока i и отношение i/i_0 для всех значений угла.
7. Рассчитайте теоретические значения $\cos^2 \alpha$ и постройте теоретический график функции $f(\alpha) = \cos^2 \alpha$. Нанесите на него экспериментальные значения i/i_0 для различных углов α . Определите погрешность измерений, нанесите эти погрешности на график. Сделайте вывод.

- По данным таблицы оцените степень поляризации прошедшего света P .

Задание 2. Изучение монохроматического излучения

- Установите на оптической скамье осветитель, поляризатор и фотоэлемент с микроамперметром (фотодиод с вольтметром, люксметр или датчик освещенности).
- Включите осветитель. Вращая поляризатор с шагом 15° , запишите показания микроамперметра в таблицу 6.6.

Таблица 6.6: Изучение монохроматического излучения

α	0	15	30	45	...	330	345	360
$i_{\text{осв}}, \text{мкА}$								
$i_{\text{лаз}}, \text{мкА}$								

- Замените осветитель на лазер и повторите измерения (п. 2).
- Проанализируйте результаты таблицы 6.6 и сделайте вывод.

Контрольные вопросы

- Какие волны называются поперечными?
- Какой свет называется плоско-поляризованным?
- Почему естественный свет является неполяризованным?
- Как получить плоско-поляризованный свет из естественного?
- Чему равна степень поляризации плоско-поляризованного света? Естественного света?
- При установке поляризатора на пути естественного света интенсивность прошедшего света заметно падает. Оцените, во сколько раз изменилась в работе интенсивность прошедшего света.
- Если перекрыть луч лазера поляризатором, а между поляризатором и экраном установить анализатор, то свет через эту систему не будет проходить. Однако если анализатор установить перед поляризатором, то на экране появится светлое пятно. Объясните это явление.

Литература

- Г.Я. Мякишев, А.З. Синяков. Физика. 11 класс. Углубленный уровень. Оптика. Квантовая физика, М.: ДРОФА, 2019, §§ 2.14–2.15.
- Физика-10 под редакцией А.А. Пинского, М.: Просвещение, 2019, § 38.

6.5 Лабораторная работа №23 Основы атомно-силовой сканирующей зондовой микроскопии

Цель работы: изучение основ сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), конструкции и принципов работы сканирующего зондового микроскопа; получение первого СЗМ-изображения, его анализ и обработка.

Введение

Для изучения поверхности твердых тел существует множество методов, каждый из которых уникален по своему применению и принципу работы. Микроскопия как способ увеличения изображения зародилась еще в XV веке, когда появились первые увеличительные стекла для изучения мелких объектов. Позже, в XVII веке, Антони ван Левенгук создал усовершенствованный оптический микроскоп, благодаря которому стало возможным наблюдать клетки, микробы и бактерии. Эти открытия стали важным шагом в развитии биологии и микробиологии.

В XX веке были изобретены электронные микроскопы, которые используют потоки частиц вместо света, что позволило достичь разрешения, необходимого для изучения атомарных структур. Однако общий принцип их работы заключается в освещении объекта исследовательским пучком частиц и преобразовании его взаимодействий в изображение.

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ), разработанная в 1980-х годах, предложила принципиально новый подход. Вместо использования потоков частиц в ней применяется тончайший механический зонд, который исследует поверхность, скользя над ней. Такой подход можно сравнить с тактильным изучением: если оптические и электронные микроскопы “рассматривают” объект, то в СЗМ поверхность “ощупывается”, что позволяет фиксировать мельчайшие детали.

Ключевой особенностью СЗМ является процесс сканирования: зонд перемещается строго последовательно — точка за точкой и линия за линией, собирая данные о каждом участке. Это позволяет получить детализированную карту поверхности без потери точности и усреднения информации.

Сегодня СЗМ широко применяется в науке и технике. Этот метод используется для изучения материалов, биологических структур, молекулярных взаимодействий и многих других объектов. Благодаря исключительной точности и универсальности СЗМ играет ключевую роль в нанотехнологиях, материаловедении и биофизике.

Двумя основными методами зондовой микроскопии являются:

- СТМ (сканирующая туннельная микроскопия);
- АСМ (атомно-силовая микроскопия).

Принцип действия АСМ основан на использовании сил атомных связей, действующих между атомами вещества. Аналогичные силы действуют и между любыми сближающимися телами. В атомно-силовом микроскопе такими телами служат исследуемая поверхность и скользящее над ней сканирующее острие. При приближении зонда к образцу он сначала притягивается к поверхности благодаря наличию наиболее дальнедействующих сил Ван-дер-Ваальса.



Рис. 6.21: Адсорбированный слой на поверхности материала

Если на поверхности образца имеется адсорбированный слой (рис. 6.21), то при соприкосновении зонда с его поверхностью возникает притяжение за счет капиллярных сил. Притягивающие силы могут быть обусловлены так же электростатическим взаимодействием. При дальнейшем уменьшении расстояния возникают силы отталкивания. Когда расстояние между зондом и образцом станет меньше среднего межатомного расстояния, то начнется перекрытие электронных оболочек ближайших атомов, в результате чего электроны первого атома стремятся частично занять состояния второго. В результате действия принципа запрета Паули они вынуждены занимать состояния с более высокой энергией. Увеличение энергии системы двух взаимодействующих атомов приводит к появлению отталкивающей силы. При еще большем сближении атомов доминирующей становится кулоновская сила отталкивания ядер. В общем виде зависимость силы межатомного взаимодействия F от расстояния между атомами R имеет вид:

$$F(r) = -C_1 r^{-n} + C_2 r^{-m},$$

где C_1 и C_2 а также показатели степени n и m зависят от сорта атомов и типа химических связей. К примеру, для сил Ван-дер-Ваальса – $m = 7$ для кулоновской силы – $n = 2$ Качественно зависимость $F(R)$ показана на рисунке

В зависимости от знака силы, действующей между зондом и образцом, различают:

- Контактный способ проведения силовой микроскопии (зонд упирается в образец и находится в области действия сил отталкивания);
- Неконтактный способ проведения микроскопии (зонд удален от поверхности и находится в области действия дальнедействующих притягивающих сил);
- Прерывисто-контактный («полуконтактный») способ проведения силовой микроскопии (зонд частично касается поверхности, находясь попеременно как в области притяжения, так и в области отталкивания).

Контактный способ измерений наиболее удобен с точки зрения детектирования силового взаимодействия, т.к. величины сил отталкивания в области контакта могут значительно превышать величины сил притяжения, однако при его использовании существует опасность возникновения нарушений структуры поверхности образца и быстрого износа или даже поломки зонда. При бесконтактном способе измерений разрушение образца отсутствует, однако малы измеряемые сигналы. Поэтому наиболее часто для визуализации различных свойств поверхности в силовой микроскопии используется «полуконтактный» способ детектирования взаимодействия. При этом вследствие кратковременности контакта воздействие зонда



Рис. 6.22: Качественная зависимость силы межатомного взаимодействия от расстояния между атомами

на поверхность минимально, а измеряемые сигналы достаточны для их надежного детектирования. Дополнительным преимуществом «полуконтактного» способа является отсутствие сдвиговой составляющей силы воздействия на исследуемую поверхность, что существенно уменьшает искажения получаемых изображений.

Датчики, зонды

Традиционным датчиком силового взаимодействия является упругая микробалка-консоль или кантилевер (от англ. cantilever – консоль). Датчики изготавливаются методами фотолитографии и травления из кремниевых пластин. Упругие консоли V- или I-образной формы, фотографии которых представлены на рис. 6.38, изготавливаются, в основном, из тонких слоев легированного кремния, или Один конец кантилевера жестко закреплен на кремниевом основании – держателе. На другом конце консоли располагается собственно зонд в виде острой иглы. Радиус закругления современных АСМ зондов составляет 150 нм в зависимости от типа зондов и технологии их изготовления. В контактном режиме работы взаимодействие зонда и образца осуществляется в области действия сил отталкивания. Обычно в контактном режиме используются тонкопленочные V-образные кантилеверы из Si_3N_4 с пирамидальными зондами. Кантилеверы характеризуются коэффициентом упругости $k = 0.031/\text{нм}$. Сила F действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу кантилевера x соотношение между которыми определяется законом Гука: $F = -kx$ В идеале система датчиков, улавливающих движения кантилевера, должна быть способна измерять отклонение с разрешением в ангстремах и не должна каким-либо образом воздействовать на сам кантилевер. Величина изгиба регистрируется, как правило, с помощью оптической системы, состоящей из полупроводникового лазера и четырехсекционного (квадрантного) фотодиода (рис. 6.24). Оптическая система АСМ юстируется таким образом, чтобы излучение лазера фокусировалось на конце кантилевера, а отраженный луч попадал в центр фотодетектора. При изгибе кантилевера под действием контактных сил отраженный от него луч лазера смещается относительно центра

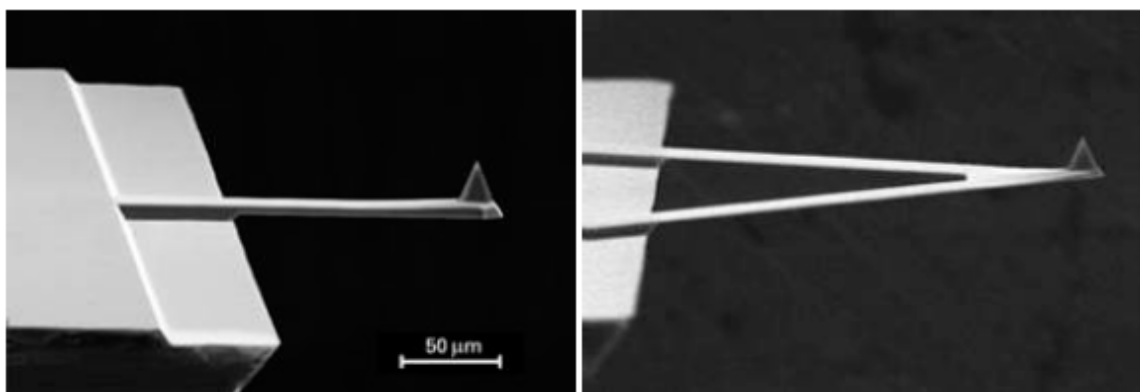


Рис. 6.23: Кантилеверы I- (слева) и V- (справа) образной формы

фотодетектора. Таким образом, отклонение кантилевера может быть определено по относительному изменению освещенности верхней и нижней половинок фотодетектора. Чем дальше расположен фотодетектор, тем больше это механическое усиление. Однако фотодетектор нельзя размещать слишком далеко из-за внешних помех. Оптическая система обнаружения позволяет измерять отклонения менее одного ангстрема. Другими методами обнаружения отклонения консоли, которые здесь не рассматриваются, являются интерферометрические оптические системы и пьезорезистивные детекторы.

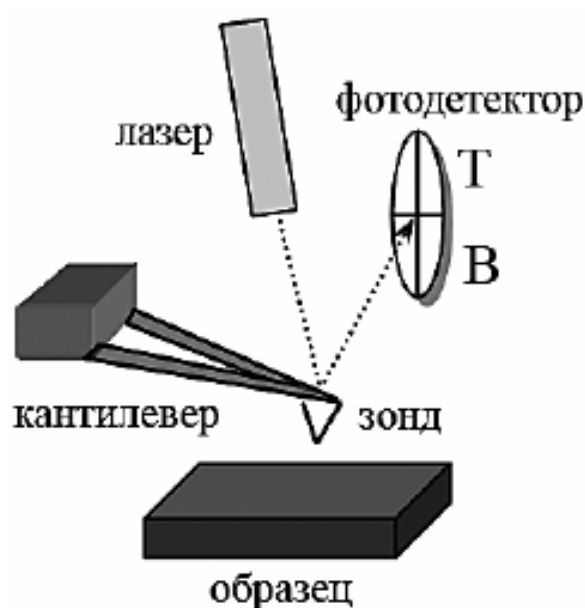


Рис. 6.24: Оптическая система сканирующего зондового микроскопа

Система обратной связи PID

Перед началом любого измерения с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) необходимо понять, как работает система регулирования с обратной связью. Именно благодаря этой системе осуществляется получение изображения в АСМ. Как было описано ранее, отклонение кантилевера регистрируется датчиком. Полученное положение сравнивается с заданной точкой (set-point) — это фиксированное значение отклонения кантилевера, установленное пользователем. Так как отклонение кантилевера напрямую связано с силой взаимодействия между зондом и образцом, заданная точка обычно выражается в ньюто-

нах (Н). Типичные значения силы находятся в диапазоне наноНьютонов (нН). Разница между фактической силой взаимодействия и желаемой называется сигналом ошибки. Этот сигнал ошибки используется для перемещения зонда или образца на такое расстояние, при котором отклонение кантилевера достигает желаемого значения. Такое перемещение затем отображается в зависимости от бокового положения зонда и представляет собой так называемую топографию. Цель системы обратной связи заключается в минимизации ошибки с максимальной скоростью, чтобы измеренная топография как можно точнее соответствовала реальной поверхности образца. Для этого сигнал ошибки усиливается с помощью PID-контроллера (пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора). Схематическое представление системы обратной связи показано на рис. 6.25. Эти три коэффициента

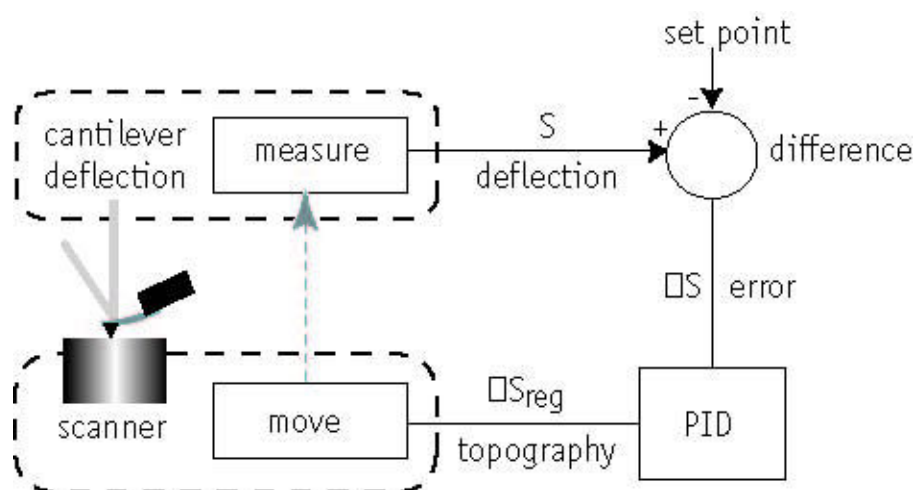


Рис. 6.25: Схема работы системы с обратной связью

могут быть настроены индивидуально и определяют, с какой скоростью и каким образом будет минимизирована ошибка, а следовательно, насколько точно топография образца будет воспроизведена при измерении. Поэтому важно понимать их характеристики.

Процесс сканирования поверхности в СЗМ имеет сходство с движением электронного луча по экрану в электроннолучевой трубке телевизора. Зонд движется вдоль линии (строки) сначала в прямом, а потом в обратном направлении (строчная развертка), затем переходит на следующую строку (кадровая развертка). Движение зонда осуществляется с помощью сканера небольшими шагами под действием пилообразных напряжений, подаваемых с генератора развертки (обычно, цифро-аналогового преобразователя). Регистрация информации о рельефе поверхности производится, как правило, на прямом проходе. К числу основных параметров, выбираемых перед началом сканирования, относятся следующие:

- размер скана;
- число точек на линии и линий в скане определяющие шаг сканирования Δ ;
- скорость сканирования.

Параметры сканирования выбираются исходя из предварительных данных (размера характерных поверхностных особенностей), которые имеются у исследователя об объекте исследования. При выборе размера скана необходимо получить наиболее полную информацию о поверхности образца, т.е. отобразить наиболее характерные особенности его поверх-

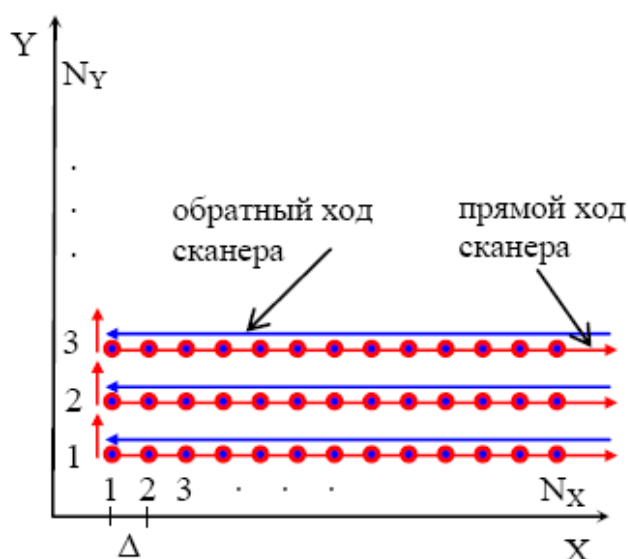


Рис. 6.26: Процесс сканирования поверхности

ности. Например, при сканировании дифракционной решетки с периодом 3 мкм необходимо отобразить хотя бы несколько периодов, т.е. размер скана должен составлять 1015 мкм. В случае если расположение особенностей на поверхности исследуемого объекта неоднородно, то для достоверной оценки необходимо провести сканирование в нескольких отстоящих друг от друга точках на поверхности образца. При отсутствии информации об объекте исследования сначала, как правило, проводят сканирование в области, близкой к максимально доступной для отображения, с целью получения обзорной информации о характере поверхности. Выбор размера скана при повторном сканировании осуществляют исходя из данных, полученных на обзорном скане. Число точек сканирования выбирается таким образом, чтобы шаг сканирования Δ (расстояние между точками, в которых производится считывание информации о поверхности) был меньше характерных ее особенностей, иначе произойдет потеря части информации, заключенной между точками сканирования. С другой стороны, выбор излишнего количества точек сканирования приведет к увеличению времени получения скана. Скорость сканирования определяет скорость движения зонда между точками, в которых производится считывание информации. Излишне большая скорость может привести к тому, что система обратной связи не будет успевать отводить зонд от поверхности, что приведет к неправильному воспроизведению вертикальных размеров, а также к повреждению зонда и поверхности образца. Малая скорость сканирования приведет к увеличению времени получения скана. Изображения поверхности, получаемые с помощью зондовых микроскопов, как правило, имеют общий наклон. Это может быть обусловлено несколькими причинами. Во-первых, наклон может появляться вследствие неточной установки образца относительно зонда или неплоскопараллельности образца; во-вторых, он может быть связан с температурным дрейфом, который приводит к смещению зонда относительно образца; в-третьих, он может быть обусловлен нелинейностью перемещений пьезосканера. На отображение наклона тратится большой объем полезного пространства в СЗМ кадре, так что становятся не видны мелкие детали изображения. Для устранения данного недостатка производят операцию вычитания постоянного наклона (левелинга) (рис. 6.27).



Рис. 6.27: Устранение постоянного наклона из СЗМ-изображения

Описание установки

Приборы и принадлежности: Блок СЗМ Phywe Nano, ПК с установленным программным обеспечением PHYWE Measure Nano, набор кантилеверов, набор тестовых образцов, неизвестный образец (CD диск), инструменты для работы с СЗМ.

Общий вид блока СЗМ PHYWE Nano показан на рисунке 6.28:

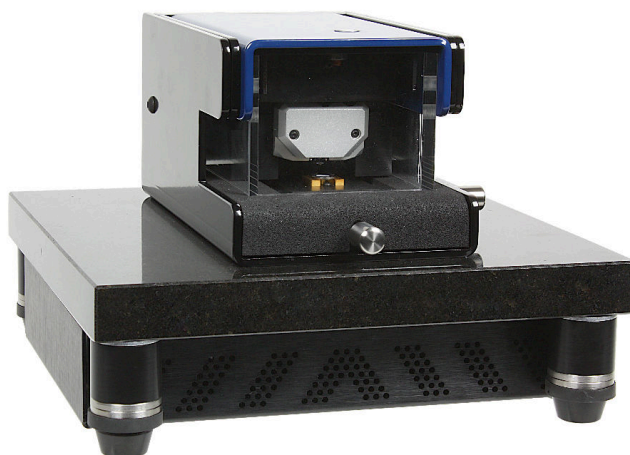


Рис. 6.28: СЗМ PHYWE Nano

Прибор должен быть установлен на устойчивую поверхность (например, на очень стабильный стол или специальный антивибрационный стол из комплекта) в месте с низким уровнем вибраций, акустического шума (закройте дверь и сообщите окружающим, чтобы они были максимально тихими, проходя мимо вашей установки), электрических полей (установите систему на расстоянии нескольких метров от выключателей питания или мощных устройств) и воздушных потоков (не устанавливайте микроскоп под кондиционером или рядом с радиаторами отопления).

Главное окно программы STM Control Software (также называемое рабочей областью) состоит из пяти основных областей (рис. 6.29):

- **Панель измерений (Measurement pane)** слева. Эта область содержит так называемые

Если вы ни разу не запускали программное обеспечение PHYWE Measure Nano может потребоваться загрузка корректных калибровочных файлов:

- Откройте меню "Файл" (File) » "Параметры" (Parameters) » "Загрузить..." (Load...). Загрузите файл "DefaultAFM.par" из директории, содержащей конфигурации Measure Nano по умолчанию.
- Откройте меню "Файл" (File) » "Расположение графиков" (Chart Arrangement) » "Загрузить..." (Load...). Загрузите файл "DefaultAFM.chart" из той же директории, где находятся конфигурации Measure Nano по умолчанию.

окна управления (Operating windows), которые используются для сбора и отображения текущих данных измерений.

- **Пространство документов (Document space)** в центре. Эта область предназначена для отображения и анализа ранее сохраненных документов измерений.
- **Информационная панель (Info panel)** справа. Эта область содержит несколько сложных панелей и используется для группировки разнообразных функций и информации.
- **Лента (Ribbon)** вверху. Эта область предназначена для доступа ко всем функциональным действиям.
- **Строка состояния (Status bar)** внизу. Эта область используется для отображения дополнительной информации.

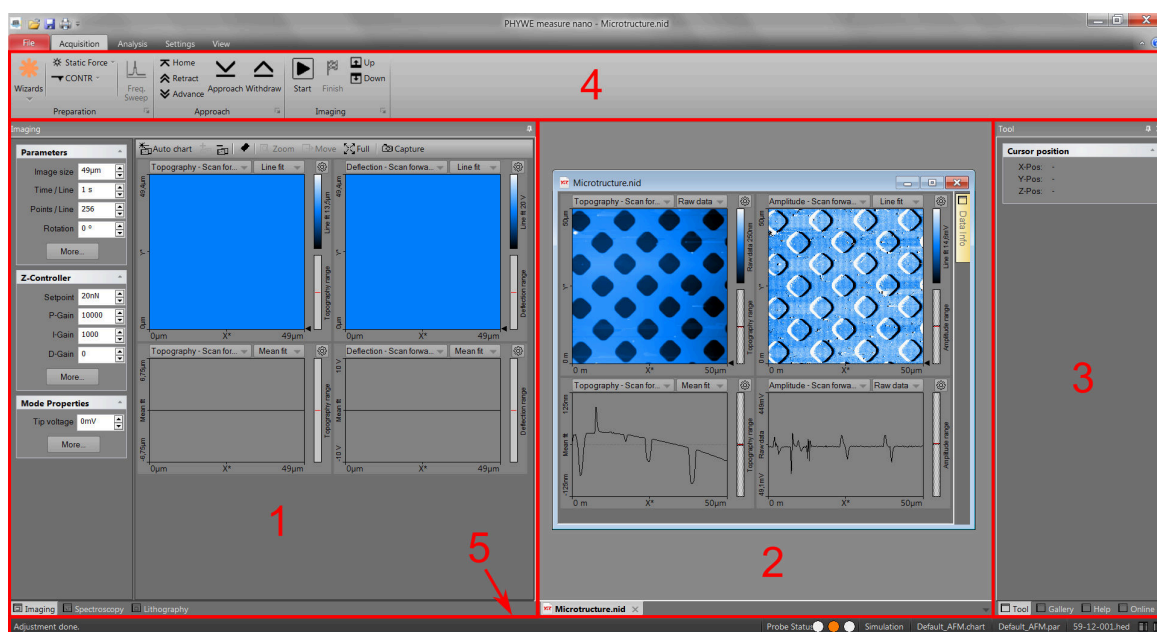


Рис. 6.29: Вид главного окна программы

Для изучения принципов работы СЗМ в работе будет необходимо изучить устройство микроскопа, установить самостоятельно (или с помощью учителя) кантилевер, выполнить необходимые настройки параметров работы, установить образец и провести измерения профиля поверхности образца.

Микроскоп PHYWE AFM можно использовать для исследования любого материала с шероховатостью поверхности, которая не превышает диапазон высот сканирующего зонда. Однако выбор и подготовка поверхности могут влиять на взаимодействие поверхность–зонд. Примерами факторов, влияющих на взаимодействие, являются избыточная влажность, пыль, жир или другие загрязнения поверхности образца. По этой причине некоторые образцы требуют специальной подготовки для очистки их поверхности. Очищайте образцы только в том случае, если это абсолютно необходимо, и будьте очень осторожны, чтобы не повредить поверхность образца.

Порядок выполнения работы

Установка кантилевера (если требуется)

Для максимального удобства использования микроскоп PHYWE AFM разработан таким образом, что кантилевер можно быстро устанавливать и снимать, не перенастраивая систему детектирования прогиба кантилевера (рис. 6.30). Быстрая установка кантилевера

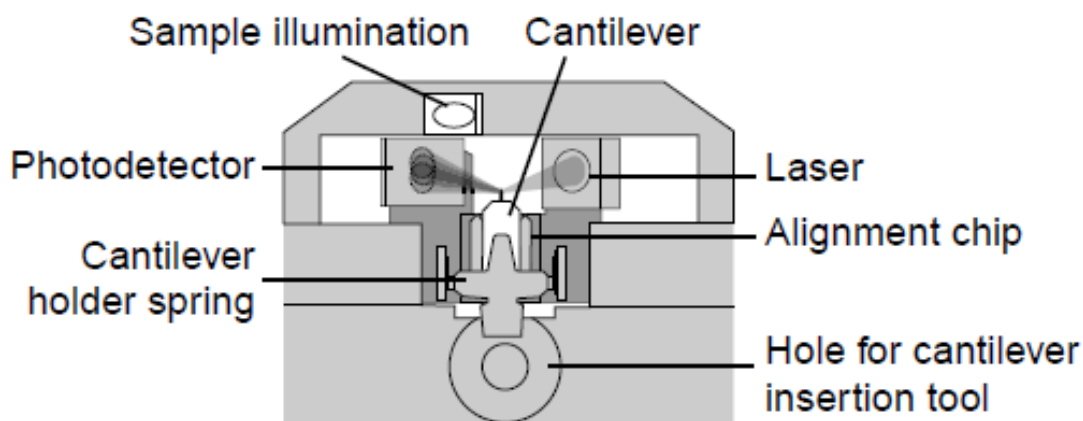


Рис. 6.30: Система детектирования прогиба кантилевера

возможна благодаря системе самовыравнивания, встроенной в сканирующую головку. Система выравнивания состоит из структуры в чипе выравнивания и соответствующих пазов на обратной стороне чипа кантилевера. Эта система позиционирует кантилевер с точностью до микрометра (см. рис. 6.31). Такая точность гарантируется только при абсолютно чистом состоянии кантилевера и чипа крепления. Поэтому установку кантилевера следует выполнять с особой тщательностью. Качество измерений напрямую зависит от точности установки. Очень важно, чтобы тип кантилевера соответствовал используемому режиму работы. Для динамического режима обычно используются более жесткие и короткие кантилеверы (например, NCLR, Nanoworld или Tap190Al-G, BudgetSensors). Для статического режима обычно используются более гибкие и длинные кантилеверы (например, CONTR, Nanoworld или ContAl-G, BudgetSensors). Перед проведением измерений выберите соответствующий тип используемого кантилевера следующим образом: в группе **Подготовка (Preparation)** на вкладке **Сбор данных (Acquisition)** (на ленте) выберите нужный тип кантилевера из выпадающего меню **Установленный кантилевер (Mounted cantilever)**, нажав на текущий выбранный тип кантилевера.

Выполните установку нового кантилевера в микроскоп:



Рис. 6.31: Система выравнивания кантилевера в ячейке

Предупреждение:

- Ничто никогда не должно касаться кантилевера. Пружина держателя кантилевера очень хрупкая. НИКОГДА не трогайте и не тяните ее! В противном случае она изогнется и станет непригодной!
- Всегда закрывайте защитный экран (DropStop) перед тем, как работать с кантилевером. Если вы этого не сделаете, кантилевер может упасть в сканирующую головку, что приведет к неисправности микроскопа, особенно сканера.
- Если кантилевер упал в сканирующую головку, и микроскоп не работает, обратитесь в местный сервисный центр. Никогда не открывайте сканирующую головку самостоятельно, так как это может привести к повреждению оборудования.

1. Достаньте новый кантилевер из коробки с помощью пинцета для кантилеверов.
2. Осторожно поместите кантилевер на чип выравнивания в сканирующей головке (рис. 6.32).
3. Убедитесь, что кантилевер не двигается относительно чипа выравнивания, аккуратно постучав по нему пинцетом. Если кантилевер двигается, вероятно, он установлен неправильно. См. рис. 6.33)
4. Осторожно вытяните инструмент для установки кантилевера из отверстия. Пружина держателя кантилевера закрывается и плотно фиксирует чип кантилевера на месте.
5. Уберите защитный экран (DropStop). Теперь лазерный луч не заблокирован, и индикатор состояния зонда (Probe Status) на контроллере PHYWE должен перестать мигать красным. Если этого не произошло, попробуйте переустановить кантилевер.

Установка образцов

Образцы для измерений размещаются на специальной магнитной подложке с помощью клея или двустороннего скотча. Тестовые образцы из набора уже закреплены на магнитной подложке, что позволяет сразу перенести их в зону измерений без дополнительной подготовки. В данной работе будет проводиться измерение параметров простого, но в то же

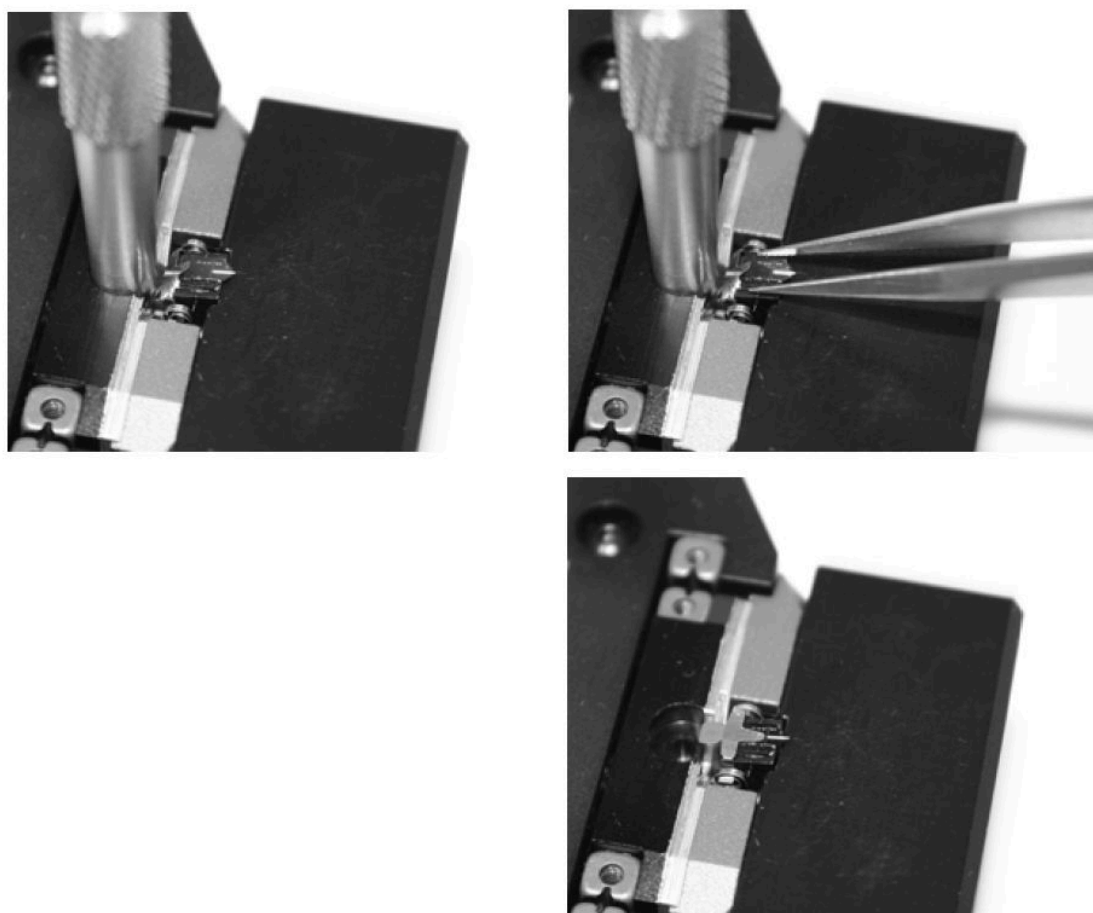


Рис. 6.32: Установка кантилевера

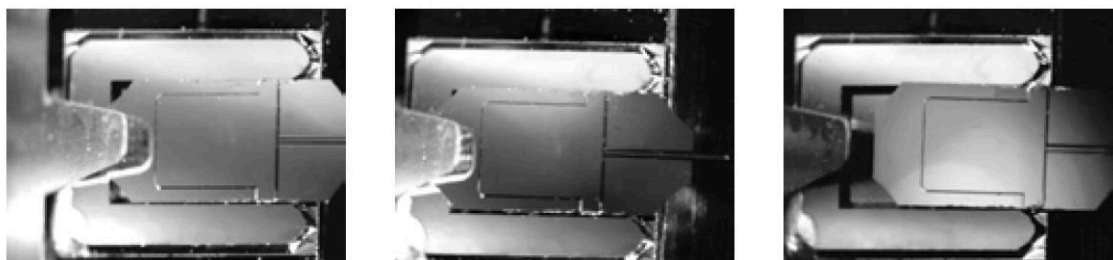


Рис. 6.33: Выравнивание кантилевера. (Слева) Правильно: в зеркальной среде видно отражение, которое непрерывно проходит через кантилевер и чип выравнивания, а также видны небольшие треугольные зазоры между краями чипа выравнивания и углами чипа кантилевера. (Центр и справа) Неправильно: в зеркальной среде отражение на кантилевере и чипе выравнивания отличается, и невозможно различить красивые треугольные зазоры.

время интересного образца - поверхности CD диска. Выберете CD диск из коробки с образцами для установки его в зоне измерений.

Для начала измерений кантилевер должен подойти к образцу на расстояние в доли нанометра, не касаясь его слишком сильно. Для этого требуется очень осторожное и чувствительное приближение кантилевера. Эта деликатная операция выполняется в два этапа: ручное грубое приближение и автоматическое точное приближение. Цвет индикатора состояния (в нижней части интерфейса программного обеспечения) показывает текущее состоя-

ние приближения:

- **Оранжевый/желтый.** Нормальное состояние во время приближения: Z-сканер полностью выдвинут в сторону образца.
- **Красный.** Приближение прошло слишком далеко: зонд врезался в образец, и Z-сканер полностью отошел от образца. В этом случае зонд, вероятно, поврежден, и вам придется установить новый кантилевер.
- **Зеленый.** Приближение успешно завершено: Z-сканер находится в пределах рабочего диапазона.

Для подготовки к процессу приближения выберите вкладку **Сбор данных (Acquisition)**. Управление позиционированием кантилевера относительно образца находится в группе **Приближение (Approach)**. Во время описанных ниже этапов приближения используйте вид сбоку на кантилевер, доступный через линзу на верхней части устройства, чтобы оценить расстояние между зондом и поверхностью образца.

Приближение зонда к образцу

На первом этапе приближения (при больших расстояниях) оно выполняется в ручном режиме. В первую очередь это связано с тем, что моторы, выполняющие автоматическое приближение достаточно точные и их работа на больших расстояниях может занять значительное время. На этом этапе зонд приближается к поверхности образца настолько близко, насколько это возможно, не касаясь его. Чем ближе зонд к образцу, тем меньше времени занимает автоматическое точное приближение.

Наблюдайте за расстоянием между зондом и образцом через вид сбоку с помощью специальной линзы в корпусе.

Наблюдая за расстоянием между зондом и образцом, нажмите и удерживайте кнопку **"Advance"** (**Приближение** в группе **Approach (Приближение)** на вкладке **Acquisition (Сбор данных)**), пока зонд не окажется достаточно близко к образцу: зонд не должен приближаться к образцу ближе, чем на несколько ширин кантилевера (рис. 6.34). Теперь, когда образец находится в фокусе, можно использовать вид сверху через линзу, чтобы найти подходящее место для измерения.

Автоматическое точное приближение

На последнем этапе зонд автоматически приближается к образцу до достижения заданного значения **"Setpoint"**. Перед началом автоматического приближения выберите желаемый режим работы и тип кантилевера. Для этого:

- В группе **Preparation (Подготовка)** на вкладке **Acquisition (Сбор данных)** выберите режим работы и тип кантилевера, которые соответствуют установленному кантилеверу.
- В режиме **Dynamic Force (Динамическая сила)** инструмент автоматически определит частоту вибрации, которая будет использоваться во время сканирования. Для определения оптимальной частоты контроллер выполняет грубое и точное сканирование частоты, в ходе которого амплитуда вибрации кантилевера записывается как функция частоты возбуждения. Полезно хотя бы один раз увидеть оба измерения сканирования частоты в деталях. Для этого можно вручную выполнить сканирование частоты:



Рис. 6.34: Вид сбоку на кантилевер после ручного приближения

- В группе **Preparation (Подготовка)** на вкладке **Acquisition (Сбор данных)** нажмите кнопку **"Freq. Sweep" (Сканирование частоты)**: откроется диалоговое окно **Vibration Frequency Search (Поиск частоты вибрации)**.
- Нажмите кнопку **"Auto frequency set" (Автоматическое установление частоты)**. Программное обеспечение SPM Control теперь установит подходящие значения для грубого и точного сканирования и выполнит эти сканирования. Точное сканирование перезапишет данные грубого сканирования на графиках, отображаемых в диалоговом окне **Vibration frequency search (Поиск частоты вибрации)**.
- Чтобы увидеть результаты отдельных сканирований последовательно нажмите кнопки **"Coarse sweep" (Грубое сканирование)** и **"Fine sweep" (Точное сканирование)**. Сканирование частоты можно использовать для проверки, не поврежден ли кантилевер и правильно ли он установлен в динамическом режиме (для этого не нужно закрывать AFM). Если все в порядке, вы получите четко определенную резонансную кривую и высокую амплитуду вибрации (в зависимости от амплитуды возбуждения).

Перед окончательным приближением к образцу необходимо установить параметры сканирования и обратной связи программного обеспечения на подходящие начальные значения. Самый простой способ сделать это — использовать мастер **"Auto Set"**. В группе **Preparation (Подготовка)** на вкладке **Acquisition (Сбор данных)** нажмите кнопку **"Auto Set" (Автоматическая настройка)**: появится диалоговое окно, которое задаст вам несколько базовых вопросов о вашем образце и ваших задачах в измерениях. Ответьте на вопросы мастера насколько это

возможно, основываясь на информации об образце.

Теперь, когда начальные настройки программного обеспечения установлены на подходящие значения, вам нужно дать имя серии измерений. Каждое завершённое измерение (сканирование/изображение) будет временно сохранено (автоматически) в папке **History (История)** под этим именем, с добавлением индексных номеров для идентификации отдельных измерений. Лучше всего ввести имя серии измерений сейчас, так как программное обеспечение (по умолчанию) начнет измерения сразу после завершения окончательного приближения. Также настоятельно рекомендуется переместить все соответствующие измерения в новую папку после завершения, так как файлы в папке **History** будут перезаписаны со временем.

Чтобы задать имя серии измерений:

- Активируйте панель **Gallery (Галерея)** в области **Info panel (Информационная панель)**.
- Щелкните вкладку **History (История)** в верхней части панели **Gallery** с помощью мыши.

В поле ввода в верхней части панели введите имя вручную или используйте диалоговое окно **Mask Editor (Редактор маски)** для создания маски имени. Если атрибут **[INDEX]** не добавлен явно в маску имени, он будет неявно применен в конце имени файла, чтобы отдельные измерения можно было сохранять и различать. Далее, для начала процесса автоматического приближения и начала измерений:

- В группе **Approach (Приближение)** на вкладке **Acquisition (Сбор данных)** нажмите кнопку **"Approach" (Приближение)**: Кантилевер перемещается к образцу через стадию приближения с включенным Z-Controller (Контроллер Z). Это движение продолжается до тех пор, пока ошибка Z-Controller не станет равна нулю. С этого момента расстояние между образцом и зондом поддерживается автоматически электроникой. Индикатор состояния зонда изменится на постоянное зеленое, и появится сообщение **"Approach done" (Приближение завершено)**:
- Нажмите кнопку "OK".

Теперь, когда взаимодействие зонд–образец, определяемое значением **Setpoint**, установлено между зондом и образцом, можно начать измерения. По умолчанию инструмент настроен на автоматическое начало измерений после автоматического приближения. Если это не так:

- Начните измерения вручную, нажав кнопку **"Start" (Старт)** в группе **Imaging (Изображение)** на вкладке **Acquisition (Сбор данных)**. В панели **Imaging (Изображение)** отображаются две визуализации текущего измерения. Одна из них — это цветное изображение высоты (топография), называемое **Color map (Цветовая карта)**. Другая — это график высоты в зависимости от положения по оси X, называемый **Line graph (Линейный график)**. При текущих настройках программное обеспечение автоматически настраивает контраст **Color map (Цветовая карта)** и диапазон высот **Line graph** на основе измеренных данных.

Чтобы оценить качество изображения, наблюдайте за дисплеями до тех пор, пока не будет завершена хотя бы четверть измерения. Если измерение содержит значительные помехи или нет двух похожих строк сканирования, остановите измерения и попытайтесь уменьшить или устранить помехи, либо отодвиньте зонд и повторите приближение к другой позиции образца.

Чтобы увеличить интересующую часть измерения:

- Активируйте график цветовой карты, щелкнув на него.
- Нажмите кнопку **"Zoom" (Масштаб)** на панели **Chart bar (Панель графиков)**: указатель мыши становится в форме пера при перемещении по цветовой карте.
- Щелкните левой кнопкой мыши на одном углу выбранной области и удерживайте кнопку.
- Перетащите мышь к другому углу области. Размер и положение квадрата отображаются на панели Tool results (Результаты инструмента) в области Info panel (Информационная панель).
- Отпустите кнопку мыши, когда размер квадрата покрывает приблизительно один период сетки.
- Подтвердите выбор, дважды щелкнув на графике цветовой карты левой кнопкой мыши. Теперь выбранная область увеличивается до полного размера экрана. Вы можете отменить функцию масштабирования, снова нажав кнопку "Zoom" (Масштаб).

Для проведения измерений поверхности CD диска выполните следующие пункты:

1. Установите большой диапазон сканирования, приблизительно 50 мкм. На этом размере вы сможете увидеть множество выступов и ям, соответствующих записанной на диск информации, а также возможно будет различить кривизну рядов записи. Каждый выступ имеет высоту около 200 нм.
2. Попрактикуйтесь в увеличении отдельных выступов. Этот образец отлично подходит для практики увеличения отдельных особенностей поверхности, так как выступы видны при различных размерах сканирования.
3. Сделайте изображение хорошо упорядоченных выступов шириной не менее 5 или 6 линий. Попробуйте получить изображение, похожее на рис. 6.35.
4. С помощью встроенных инструментов измерения определите размер выступа (длину и ширину, а также высоту) для нескольких разных выступов (не менее 5).
5. Определите ширину линии, а также ширину промежутка между линиями. Выполните измерения для трех разных линий и промежутков
6. Определите случайную погрешность для выполненных измерений. Сравните полученные данные с стандартными параметрами для CD дисков.

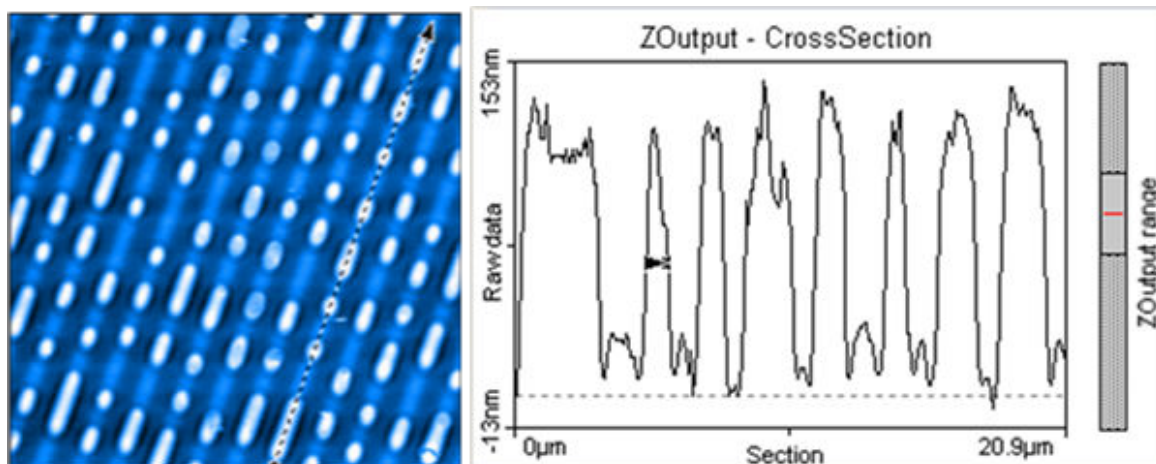


Рис. 6.35: Пример полученного изображения

После проведения измерений выполните отвод кантилевера от образца в автоматическом режиме, а также поднимите кантилевер на достаточную высоту вручную, чтобы избежать его повреждения. В случае необходимости уберите кантилевер обратно в коробку для кантилеверов.

В заключении к работе проведите анализ полученных результатов, а также влияние параметров сканирования на результаты измерений. Проведите анализ применений СЗМ в науке и инженерии, определите, какие ключевые параметры сканирования являются важными для получения качественных изображений. Определите, какие способы анализа изображений используются в методике СЗМ.



Контрольные вопросы

1. Опишите (качественно) зависимость силы взаимодействия от расстояния зонд-образец.
2. Назовите основные режимы работы АСМ, их назначение, а также преимущества и недостатки.
3. Объясните основные способы детектирования силы в контактном режиме АСМ.
4. Назовите основные компоненты СЗМ и их назначение.
5. Какие типы искажений характерны для СЗМ изображений, и по каким причинам они возникают?

**О технологиях, требующих
изучение наноструктур с
помощью СЗМ от Ольги
Грязновой, младшего
научного сотрудника ИБХ
РАН**

Литература

1. Руска Э. Развитие электронного микроскопа и электронной микроскопии – Нобелевские лекции по физике – 1996 // УФН. – 1988. – Т. 154. – Вып. 2. – С. 243.

-
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. – М.: Техносфера, 2005. – 144 с.
 3. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1993.
 4. Tortonese M., Barrett R.C., Quate C.F. Atomic resolution with an atomic force microscope using piezoresistive detection // Appl. Phys. Lett. – 1993. – Vol. 62. – No. 8. – P. 834.
 5. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976. – 511 с.
 6. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982. – Книги 1, 2. – 790 с.

6.6 Лабораторная работа №24 Изучение спектров излучения светодиодов

Цель работы: знакомство с непрерывным и линейчатым спектрами, способом их исследования, изучение спектра излучения полупроводниковых диодов разных цветов и определение полупроводникового материала, из которого изготовлен диод.

Введение

Свет – это электромагнитная волна. Электромагнитные волны, видимые нашими глазами (белый, синий, красный, зелёный) и невидимые (ультрафиолетовые, рентгеновские, инфракрасные), появляются в результате двух принципиально разных процессов.

Первый тип – это ускоренное движение заряженных частиц, в результате которого возникают волны различных частот, составляющих непрерывный спектр. Классическим примером является радуга или преломление света на призме, раскладывающее его на составляющие цвета.

Второй тип это процесс, в котором заряженные частицы меняют свое состояние, а точнее свою энергию скачкообразно и сразу на определенную величину. Находиться они при этом могут только либо в одном состоянии, либо в другом. Никаких промежуточных состояний быть не может. Излишек энергии при переходе из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией выделяется в виде излучения – электромагнитной волны. Но энергия этой электромагнитной волны, а, следовательно, и её цвет будет строго определённым. Если переходов несколько, то и набор электромагнитных волн будет состоять только из конкретных цветов. Такой спектр называется линейчатым.

В светодиодах основным источником спектрального излучения является электролюминесценция, при которой выделяется фотон с чёткой энергией:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

где E – энергия фотона, h – постоянная Планка (6.626×10^{-34} Дж·с), ν – частота излучения, c – скорость света в вакууме (3×10^8 м/с), λ – длина волны излучения.

Например, для красного светодиода с длиной волны 625 нм энергия фотона составляет:

$$E = \frac{6.626 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{625 \times 10^{-9}} \approx 3.18 \times 10^{-19} \text{ Дж} \approx 2 \text{ эВ}. \quad (2)$$

Спектральные характеристики светодиодов зависят от материала полупроводника и определяют цвет излучаемого света. В таблице ниже представлены спектральные характеристики типичных светодиодов разных цветов:



Узнать больше о
гетероструктурной
электронике в квантовых
технологиях вместе с
ведущим научным
сотрудником центра
радиофотоники МИФИ,
доктором физ.-мат. наук
Иваном Васильевским

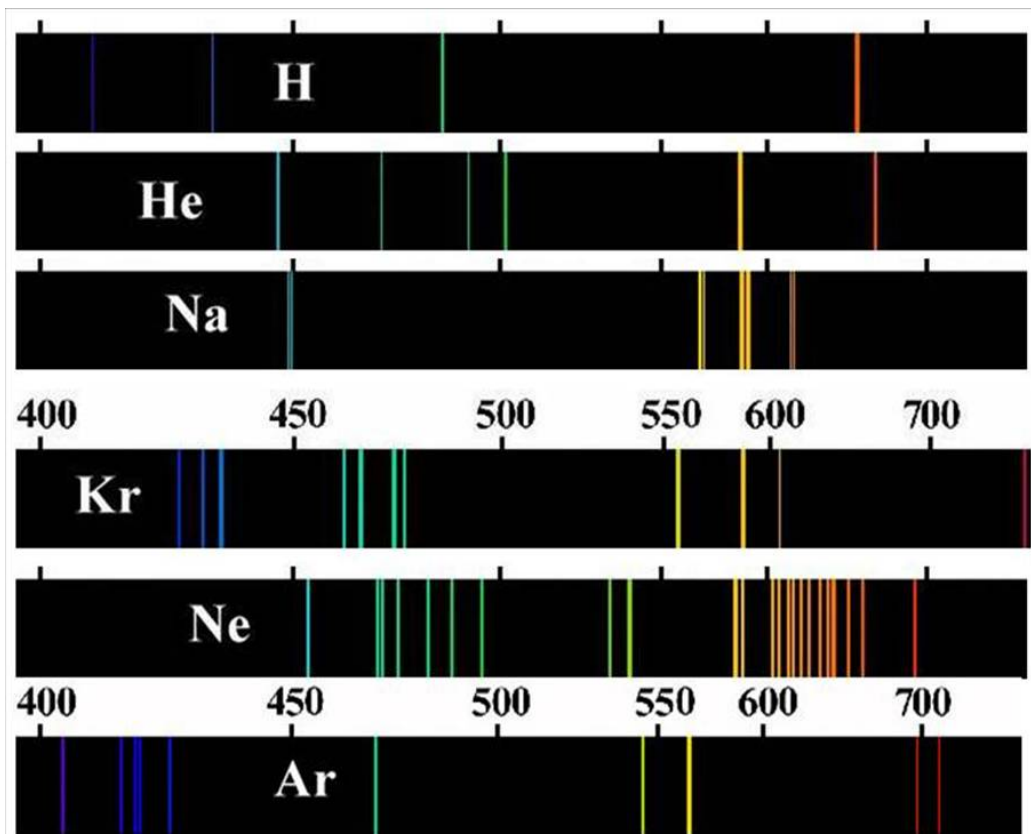


Рис. 6.36: Линейчатые спектры испускания газов

Таблица 6.7: Характеристики светодиодов различных цветов.

Цвет	Длина волны (нм)	Энергия фотона (эВ)
Красный	625	1.98
Зелёный	525	2.36
Синий	460	2.70

Спектры излучения светодиодов имеют гауссову форму с определённой полушириной на половине максимума (FWHM), характеризующей чистоту цвета. Например, для красного светодиода FWHM составляет около 20 нм, для зелёного – 22 нм, для синего – 30 нм.

Изучение спектров излучения светодиодов позволяет понять их поведение в различных условиях, что важно для разработки эффективных оптических систем и приборов. В лабораторной работе учащиеся 10-х классов инженерного профиля смогут исследовать спектральные характеристики различных светодиодов, измерить их спектры и определить параметры, такие как длина волны максимума излучения и полуширина спектра. Для проведения измерений рекомендуется использовать спектрометр, позволяющий получить графики зависимости интенсивности излучения от длины волны. Полученные данные можно сравнить с характеристиками, указанными в технической документации (datasheet) на соответствующие светодиоды.

Исследование светодиодов (ЛЭД) их спектральных характеристик представляет собой

Таблица 6.8: Пример спектральных характеристик для светодиодов различных цветов

	Доминирующая длина волны (нм)	Полуширина полосы излучения (нм)
Чистый синий	460	30
Сверхчистый зелёный	525	22
Насыщенный красный	625	20

актуальную задачу современной науки и технологии. Светодиоды как полупроводниковые приборы являются источниками излучения, получившими широкое распространение в сферах бытовой техники, освещения, телекоммуникаций и медицины.

В этой лабораторной работе мы познакомимся с непрерывным и линейчатым спектрами, способом их исследования, а также изучим спектр полупроводниковых диодов разных цветов.

Описание установки

Приборы и принадлежности: Учебный спектроскоп, лампа накаливания, источник питания, набор газоразрядных трубок с генератором, набор цветных карандашей/фломастеров или ПК с окуляр-камерой и средством обработки графики, светодиод красный, светодиод зеленый, светодиод синий, светодиод белый, светодиод RGB, набор резисторов для подключения светодиода, макетная плата, набор проводов для макетной платы.

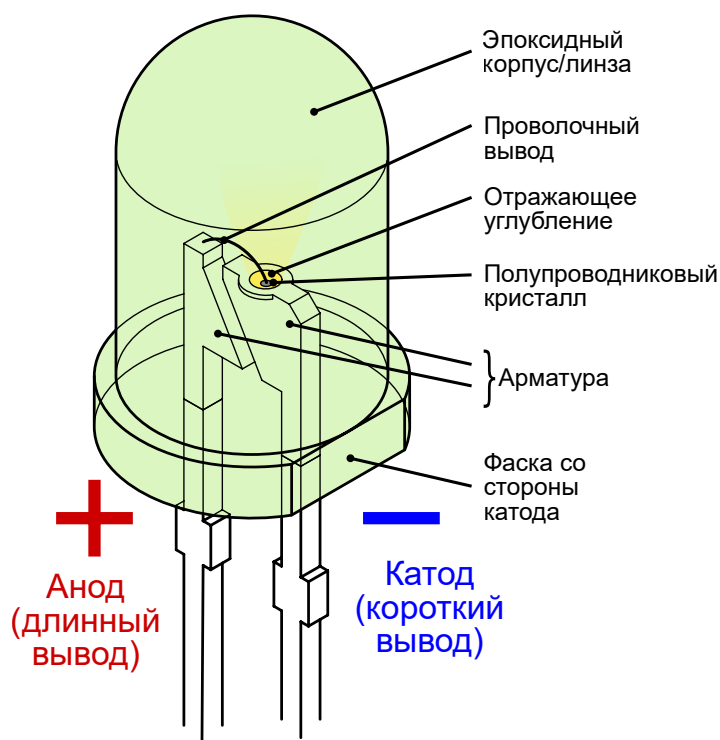


Рис. 6.37: Внутреннее устройство светодиода. Источник: B.gliwa. LED, 5mm, green (ru).svg. Wikimedia Commons. URL: . Лицензия: CC BY-SA 3.0.

Для использования светодиода совместно со спектроскопом (рис. 6.38) рекомендуется найти или разработать подставку-стенд, чтобы свет от диода был направлен на измерительную трубу спектроскопа. Также следует аккуратно подобрать ширину щели спектроскопа, чтобы была возможность наблюдать линейчатый спектр от газоразрядной лампы.

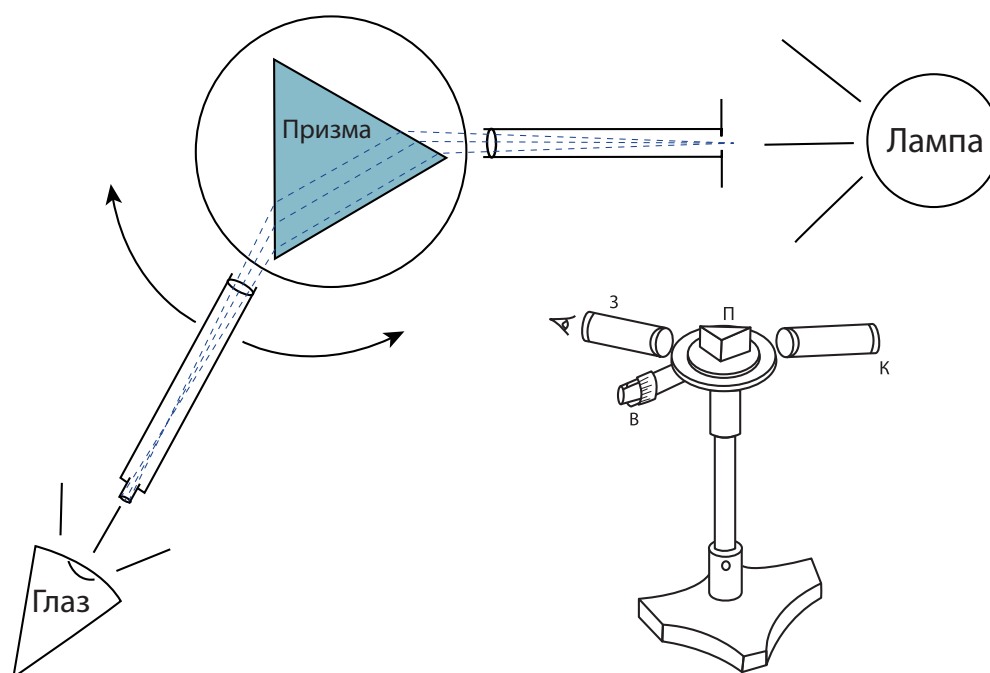


Рис. 6.38: Оптическая схема спектрографа

Порядок выполнения работы

Задание 1. Сравнение непрерывного и линейчатого спектров. Источники непрерывных и линейчатых излучений

1. Включите лампу накаливания. Обратите внимание, какого цвета дает излучение лампа до прохождения через диспергирующую (разлагающую в спектр) систему.
2. Посмотрите на лампу через спектроскоп (трубку с окуляром, внутри которой находится диспергирующий элемент). Обратите внимание на вид спектра и его цвет.
3. Цветными карандашами постарайтесь нарисовать увиденный спектр.
4. Попросите преподавателя включить газоразрядную трубку (любую).
5. Обратите внимание цвет излучения газоразрядной трубки до прохождения через диспергирующую систему.
6. Посмотрите на трубку через монохроматор. Обратите внимание на вид спектра и его цвет.
7. Цветными карандашами постарайтесь нарисовать увиденный спектр.
8. Сделайте вывод о виде спектра лампы накаливания и газоразрядной трубки.

Задание 2. Определение длин волн излучения различных газов в газоразрядных трубках

1. Попросите преподавателя установить водородную лампу и включить её.
2. Посмотрите на спектр водородной лампы через спектроскоп.

3. Зарисуйте или сфотографируйте наиболее яркие линии водородной лампы.
4. Проведите расшифровку спектра, указав рядом с самыми яркими линиями их длину волны. При расшифровке используйте спектральную карту ниже.
5. Выключите лампу и попросите преподавателя поменять её на неоновую.
6. Повторите измерения и расшифровку по п. 1 - п. 4
7. Попросите преподавателя заменить лампу на аргоновую.
8. Повторите измерения и расшифровку по п. 1 - п. 4

Задание 3. Изучение спектра излучения светодиодов. Определение материала светодиода

1. Соберите на макетной плате электрическую схему питания белого диода, соединив последовательно резистор, диод и источник питания. При этом минусовой вывод диода подключается через резистор к минусу источника питания, а все плюсовые выводы соединяются друг с другом и подключаются к плюсу источника питания. Разместите собранную схему перед монохроматором так, чтобы свет от диода попадал в монохроматор.
2. Посмотрите на диод через монохроматор. Обратите внимание на вид спектра и его цвет.
3. Цветными карандашами постарайтесь нарисовать увиденный спектр
4. На самом деле белый свет диода формируется не одним, а тремя светодиодами, объединенными в одном корпусе. Точно также, как белый цвет на экране компьютерного монитора или экране смартфона формируется светящимися точками (пикселями) трех цветов (красны, зеленый, синий), свет белого светодиода формируется тремя – красным, зеленым и синим.
5. Попеременно отключая все плюсовые выводы светодиода, кроме одного, определите, линии какого цвета видны в монохроматор при работе только одного диода. Обратите внимание, каким цветом при этом светится светодиод.
6. Соберите на оптической скамье схему с прозрачной (полупрозрачной) пластиной так, чтобы сквозь пластину было видно в монохроматор излучение светодиода, а свет аргоновой газоразрядной трубки был отраженным и тоже попадал в монохроматор.
7. Посмотрите в монохроматор одновременно на оба спектра. Перекрывая рукой один из источников, отметьте, какие линии принадлежат светодиоду, а какие лампе.
8. Зарисуйте оба спектра.
9. По расшифровке спектра аргоновой лампы из предыдущего эксперимента оцените длины волн излучения диода, а точнее каждого из трех диодов, составляющих излучение белого «светодиодного» света.

10. Охарактеризуйте, чем излучение белого света от светодиода отличается от естественного солнечного белого света.
11. В атоме электроны могут обладать только определенными значениями энергии, находясь на разном удалении от ядра – энергетические уровни. При переходе с более высокого уровня на более низкий «избыток» энергии высвобождается в виде фотона – световой волны. В твердых телах (в том числе и полупроводниках) энергетическая структура электронов более сложная, поскольку электроны участвуют в образовании связей между атомами. Тем не менее, электроны в твердом веществе могут находиться в двух энергетических областях: валентной зоне и зоне проводимости. Эти две зоны разделены запрещенной зоной – состоянием, в котором электроны находиться не могут. Наличие запрещенной зоны в полупроводниках является причиной линейчатого характера излучения светодиодов.
12. Рассчитайте ширину запрещенной зоны полупроводника.

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E}$$

где: λ - длина волны, мкм

E - ширина запрещённой зоны, эВ

$h \cdot c = 1,2398$

1 эВ = $1,60218 \cdot 10^{-19}$ Дж

13. Определите материал полупроводника по его запрещенной зоне с помощью таблицы [6.9](#)

Контрольные вопросы

1. Что такое спектр излучения, и какие характеристики спектра являются наиболее важными для описания источника света?
2. Объясните принцип работы светодиода. Почему светодиоды излучают свет определённого цвета?
3. Какой прибор используется для измерения спектра излучения светодиодов? Какие данные вы получили с его помощью?
4. Почему важно знать спектр излучения светодиода? Приведите примеры областей, где это знание может быть полезным.
5. На полученном вами графике спектра излучения светодиода, что представляет собой максимум интенсивности? Как этот максимум связан с цветом излучаемого света?

Таблица 6.9: Таблица цветов, материалов светодиодов и их характеристик

Цвет	Длина волны (нм)	Напряжение (V)	Материал полупроводника
Инфра-красный	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.9$	Арсенид галлия (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
Красный цвет	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	en:Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (Промежуток)
Оранже- вый цвет	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	en:Gallium arsenide phosphide (GaAsP)Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (Проме- жуток)
Жёлтый цвет	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	en:Gallium arsenide phosphide (GaAsP)Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (Проме- жуток)
Зелёный цвет	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN)Фос- фид галлия (en:Gallium(III) phosphide) (Промежу- ток)en:Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP)Aluminium gallium phosphide (Промежуток)
Синий цвет	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Селенид цинка (ZnSe)en:Indium gallium nitride (InGaN)Silicon carbide (SiC) (Так) как основание Silicon (Si) как основание – (при развитии)
Фиолето- вый цвет	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	en:Indium gallium nitride (InGaN)
Фиолето- вый цвет	разновидности	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Двойной синий/красный СИД, синий с красным люминофором,
Ультрафи- олетовое излучение	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	Diamond (235 nm) Boron nitride (215 nm) Нитрид алюминия (Aluminium nitride) (AlN) (210 nm) en:Aluminium gallium nitride (AlGaN)Aluminium gallium indium nitride (AlGaInN) – (down to 210 nm)
Белый цвет	Broad spectrum	$\Delta V = 3.5$	Синий СИД с желтым люмино- фором
Белый цвет	Broad spectrum	$\Delta V = 4.4$	Ультрафиолетовый СИД с белым люминофором

Литература

1. Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б., Чаругин В. М. Физика: Учебник для 11 класса общеобразовательных организаций: базовый и углубленный уровни. 22-е изд., перераб. и доп. — М.: Просвещение, 2013. — 384 с.
2. Бородавка Л. Н., Кузьмин К. Г., Манак И. С., Пикулик В. Г. Разработка аппаратуры для исследования спектральной кинетики излучения светодиодов // Вестник Белорусского государственного университета. 2019. — № 4. — С. 141–187.
3. Смирнова Н. Н., Чухланов В. Ю. Спектроскопия: учебное пособие. — Владимир: Владимирский государственный университет, 2018. — 120 с.
4. Источники и приемники оптического излучения: сборник материалов. — Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2012. — 256 с.
5. Виды излучения, спектры и спектральный анализ: презентация к уроку физики для 11 класса. — Электронный ресурс. — Режим доступа: <https://nsportal.ru>, свободный. — Дата обращения: 23.12.2024.

6.7 Проектные и кейсовые задания

6.8 Кейс 5. Оптоволоконная передача информации

1. Актуальность

В настоящее время квантовые технологии и оптоволоконная передача данных становятся одними из самых перспективных направлений в науке и технике. Важно подчеркнуть, что возможности, которые предоставляют квантовые вычисления и квантовая криптография, могут радикально изменить обработку информации и коммуникационные системы. Квантовые компьютеры обладают способностью решать задачи, которые для классических вычислительных систем остаются практически невыполнимыми. Основным принципом работы квантового компьютера заключается в использовании кубитов (квантовых битов), которые могут находиться одновременно в нескольких состояниях благодаря явлениям суперпозиции и запутанности. Это означает, что квантовые компьютеры могут обрабатывать значительно больше данных и выполнять более сложные вычисления за короткое время.

Основой для систем передачи данных в квантовых компьютерах являются оптоволоконные линии связи, поскольку они минимизируют потери сигнала и устойчивы к помехам. Это особенно важно в условиях передачи квантовой информации, где требуется высокая точность и надежность связи. Оптоволокно передает данные с помощью световых импульсов, что делает эту технологию оптимальной для передачи квантовых сигналов на большие расстояния.

Сочетание квантовых вычислений и оптоволоконной передачи данных открывает возможности для создания квантовых коммуникационных сетей и квантового интернета, которые будут значительно безопаснее и быстрее существующих решений. Передача данных по оптическому каналу считается более безопасной по ряду причин, связанных с уникальными физическими характеристиками и технологиями, которые используются в оптоволоконной связи:

- **Устойчивость к электромагнитным помехам:** Оптоволокно не проводит электричество, так как передача данных осуществляется за счет световых импульсов. Это делает его нечувствительным к электромагнитным помехам, которые могут воздействовать на медные кабели и нарушать передачу данных. Таким образом, оптоволоконные линии связи более устойчивы к перехватам или искажениям сигналов.
- **Сложность перехвата сигнала:** Чтобы перехватить данные, передаваемые по оптоволокну, требуется физический доступ к кабелю и специальное оборудование для считывания световых импульсов. Любая попытка нарушить целостность оптического кабеля вызывает изменение светового потока, что легко обнаруживается в системе. Это делает перехват сигнала значительно более сложным по сравнению с электрическими кабелями.
- **Отсутствие электромагнитного излучения:** Оптический кабель не излучает электромагнитные волны, как это происходит при передаче данных по медным проводам. Это означает, что данные невозможно "подслушать" с помощью устройств, улавливающих

электромагнитное излучение. Это исключает возможность пассивного перехвата данных без прямого вмешательства в физическую линию связи.

- **Квантовая криптография:** Оптоволоконно идеально подходит для использования в квантовых системах безопасности, таких как квантовая криптография. В квантовых сетях используются квантовые биты (кубиты), которые, согласно принципам квантовой механики, изменяют свое состояние при любом вмешательстве. Это обеспечивает практически абсолютную защиту передаваемых данных, поскольку любое перехваченное сообщение будет сразу обнаружено.
- **Протоколы безопасности:** В оптических сетях возможно использование сложных криптографических протоколов, таких как квантовое распределение ключей (QKD), что повышает уровень защиты данных. Эти протоколы обеспечивают защиту не только от перехвата, но и от любых попыток изменения информации.

Все эти факторы делают оптоволоконную передачу данных гораздо более безопасной по сравнению с традиционными методами передачи информации. Таким образом, развитие оптоволоконных технологий и квантовых вычислений становится крайне актуальным для решения современных и будущих задач в области передачи данных, коммуникаций и кибербезопасности.

2. Этапы работы

Теоретическое Введение:

- Изучите основные принципы квантовой механики, включая суперпозицию и квантовую запутанность.
- Проведите анализ возможностей и ограничений квантовых компьютеров на современном этапе развития.
- Обоснуйте, почему квантовые вычисления требуют использования оптоволоконна для передачи данных.

Разработка экспериментальной установки:

- Разработайте модель, которая показывает процесс передачи данных с использованием оптоволоконного кабеля.
- Смоделируйте квантовую криптографическую систему (например, квантовое распределение ключей) на основе передовых исследований.
- Оцените погрешности при передаче квантовой информации через оптоволоконный кабель.

Проведение эксперимента:

- Соберите установку для передачи данных по оптоволоконку.

- Оцените качество передачи информации и возможные помехи.
- Запишите эксперимент на видео.

Обработка результатов:

- Проанализируйте собранные данные, оцените стабильность и безопасность передачи информации.
- Представьте результаты в виде таблиц и графиков.

Заключение:

- Подведите итоги работы, обсудите перспективы применения оптоволоконной передачи данных в квантовых системах.
- Предложите направления для дальнейших исследований.

3. Примерный перечень средств и материалов для выполнения задания

- Оптоволоконный кабель из комплекта "Оптоэлектроника" к Лабораторному модулю с интерактивной лабораторной платформой (ЛМИЛ).
- Источник светового сигнала (светодиоды разных цветов, полупроводниковый лазер).
- Фототранзистор.
- Программное обеспечение для анализа данных.

4. Требования к предоставлению решения задания

По итогам выполнения кейсовой задачи оформляется отчет о работе проектной команды, включающий в себя как разработанные системы и устройства, так и корректно оформленную документацию по кейсу. Документация в обязательном порядке должна включать в себя:

1. Титульный лист (школа, авторы, название кейса, название команды, руководитель).
2. Описание команды, распределение ролей, функций и обязанностей каждого участника команды.
3. Теоретическое Введение. В разделе «Введение» обосновывается Актуальность исследования, формулируются цель и задачи работы, а также предоставляется краткий литературный обзор темы исследования.
4. Методику проведения исследования. В разделе «Методика исследования» описывается порядок выполнения экспериментов, экспериментальная установка, приводится ее схема, указываются расчетные формулы, использованные для обработки полученных данных, а также приводится описание методики оценки погрешностей экспериментальных результатов.

5. Результаты проведенного исследования. В разделе «Результаты» необходимо представить полученные данные, а также результаты их обработки в виде таблиц и/или графиков, привести интерпретацию и физическое объяснение результатов. Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы и подписаны.
6. Разработанные 3D-модели в форматах .obj, .stl или .step, скриншоты разработанных 3D-моделей (как системы в целом, таким и отдельный ее частей, при наличии). 3D-модели должны находиться в репозитории проекта в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.).
7. Описание схемы разработанной установки в виде изображений общей схемы установки, электрической принципиальной схемы, монтажной схемы, оптической схемы (если имеется) и т.д.
8. В случае разработки программного обеспечения, должен быть приведен алгоритм его работы в виде блок-схем.
9. Код разработанного программного обеспечения должен быть представлен в виде ссылки на репозиторий проекта с кодом в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.). Любые архивы с загруженными исходными кодам (.zip, .rar и т.п.) загружать в другие хранилища данных запрещается.
10. Фотографии разработанной установки и ее составных частей.
11. Видеоролик, демонстрирующий выполнение экспериментальных измерений в соответствии с требованиями кейса. На видео необходимо продемонстрировать прохождение каждого, описанного в задании, эксперимента или отдельных его частей. Видео с проведенным экспериментом должно однозначно подтверждать авторство участников (во время записи ролика необходимо четко произнести название команды, ФИО участников, номер школы, ФИО руководителя). Видеоролик располагается на стороннем видеохостинге (ВКонтакте, Rutube и др.), ссылка на видеоролик располагается в репозитории в системе контроля версий (может использоваться github, gitlab и др.). Весь эксперимент, от подготовки к работе до завершения последнего этапа, должен быть записан на видео одним дублем без склейки и монтажа. В течении всего видео в кадре должны быть разработанная командой установка и как минимум один из участников команды, выполняющий все операции с ней. Вход и выход участников, передача инструмента, деталей и других вещей из кадра недопустимо. Допускается использование второй камеры для более детализированной демонстрации ключевых моментов. Видео должно быть со звуком, на котором отчетливо слышны подаваемые голосовые команды и действия команды. На видеозаписи должно быть хорошо различимы все элементы, влияющие на оценивание результативности. В случае, если эксперты не смогут по видеозаписи однозначно понять результат выполнения задания, принимается решение не в пользу участника.
12. Заключение, включающее краткое изложение результатов работы, подведение итогов исследования, обсуждение его практической и теоретической значимости. Также могут быть предложены дополнительные направления исследований.

13. Список литературных источников. В этом разделе приводится список использованных источников, статей, книг и другой литературы, на которые ссылается исследование. Кроме того, работа может содержать приложения с иллюстративным материалом (рисунки, схемы, таблицы, фотографии и т. п.). На каждое приложение должна быть дана ссылка в тексте работы.

5. Список рекомендуемой литературы

1. Гусев, А. А. Квантовая информация и квантовая криптография / А. А. Гусев. — М.: Физматлит, 2017. — 368 с.
2. Левин, В. И. Оптоволоконные системы связи / В. И. Левин, Ю. А. Шишлов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Горячая линия — Телеком, 2018. — 288 с.
3. Макаров, В. И. Квантовые вычисления и информация: основы и перспективы / В. И. Макаров. — СПб.: Издательство СПбГУ, 2020. — 254 с.
4. Богданов, Ю. И. Основы квантовой криптографии: Учебное пособие / Ю. И. Богданов, И. В. Ватутин. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. — 198 с.
5. Щеглов, А. В. Системы передачи информации по оптоволокну / А. В. Щеглов. — СПб.: Питер, 2015. — 352 с.
6. Гаврилов, А. Н. Теория квантовых вычислений / А. Н. Гаврилов. — М.: Наука, 2016. — 310 с.
7. Травников, В. В. Оптические волокна и их применение в системах связи / В. В. Травников. — М.: Радио и связь, 2020. — 240 с.
8. Кривошеев, О. В. Квантовые сети и их безопасность / О. В. Кривошеев. — М.: Техносфера, 2018. — 284 с.
9. Козлов, С. В. Применение квантовой механики в криптографических системах / С. В. Козлов. — Казань: Казанский федеральный университет, 2019. — 320 с.
10. Иванов, Н. П. Основы оптоволоконной передачи данных: Учебное пособие / Н. П. Иванов. — Новосибирск: НГТУ, 2017. — 212 с.

6.9 Темы проектно-исследовательских работ для самостоятельного изучения

Вы уже прошли долгий путь в изучении физики, успешно освоили предыдущие разделы и выполнили несколько проектных и исследовательских работ. За это время вы научились проводить эксперименты, работать с данными, строить математические модели и разрабатывать инженерные решения. Теперь настало время открыть для себя новый и увлекательный мир — мир оптических и квантовых технологий.

Оптика и квантовая физика — это не просто разделы науки, но и основа современных технологий, которые окружают нас повсюду. Лазеры, волоконная оптика, голография, квантовые компьютеры, системы связи — всё это создано на основе глубокого понимания процессов взаимодействия света и вещества. Эти технологии не только меняют наш мир, но и открывают перед инженерами будущего невероятные возможности.

В этом разделе вам предстоит работать с явлениями, которые лежат в основе оптических и квантовых технологий. Каждая из предложенных тем проектных работ дает возможность не только изучить законы природы, но и применить их для создания реальных устройств и инженерных решений. Вы сможете собрать собственные экспериментальные установки, провести измерения и численные расчеты, а также погрузиться в моделирование сложных физических процессов.

Как и прежде, подходите к проектной работе с любопытством и ответственностью. Не бойтесь задавать вопросы, экспериментировать и искать решения. Все открытия начинаются с одного шага — с вашей инициативы.

Выбирайте тему, которая вам наиболее интересна, и погружайтесь в исследование:

1. **Разработка и исследование модели оптического волновода.** В работе предлагается создать модель оптического волновода из доступных материалов, изучить передачу света через волновод при различных углах падения и длинах волн, а также провести численное моделирование распространения света внутри волновода с учетом полного внутреннего отражения.
2. **Изучение интерференции света и проектирование интерферометра.** В работе предлагается построить интерферометр (например, по схеме Майкельсона), исследовать интерференционные полосы при изменении длины оптического пути, провести численное моделирование интерференционных узоров для различных длин волн и углов падения, а также разработать рекомендации по повышению точности измерений.
3. **Проектирование и исследование лазерной системы для измерения расстояния.** В работе предлагается разработать лазерную систему, позволяющую измерять расстояние методом триангуляции или времени задержки, оптимизировать конструкцию для повышения точности, а также провести численное моделирование зависимости измерений от угла наклона лазера и параметров системы.
4. **Исследование принципа работы и разработка простого спектрометра.** В работе предлагается создать модель спектрометра с использованием дифракционной решетки или

призмы, исследовать спектры различных источников света (например, ламп и светодиодов), провести численное моделирование разложения света на спектр, а также разработать конструкцию для повышения разрешающей способности устройства.

5. **Проектирование и исследование квантовой схемы на базе поляризации фотонов.** В работе предлагается построить экспериментальную установку для изучения поляризации света с использованием поляризационных фильтров, провести моделирование изменения интенсивности света в зависимости от угла фильтров, а также разработать систему, демонстрирующую квантовые логические элементы.
6. **Разработка модели голографической системы и исследование свойств голограмм.** В работе предлагается создать установку для записи и воспроизведения голограмм с использованием лазера и фоточувствительной пленки, изучить свойства голограмм в зависимости от параметров записи, провести численное моделирование интерференционных картин, а также разработать конструкцию для повышения устойчивости системы.
7. **Исследование фотолюминесценции и создание устройства для анализа материалов.** В работе предлагается построить установку для наблюдения фотолюминесценции различных материалов под воздействием ультрафиолетового света, изучить зависимость интенсивности свечения от длины волны возбуждающего излучения, провести численное моделирование спектров люминесценции и разработать устройство для диагностики материалов.
8. **Исследование эффекта зависимости скорости света от среды и создание демонстрационного устройства.** В работе предлагается создать установку для изучения изменения скорости света при его прохождении через различные среды (стекло, воду, пластик), провести экспериментальные измерения индексов преломления, выполнить численное моделирование процесса изменения скорости света в зависимости от свойств среды и разработать устройство для наглядной демонстрации явления.