

Лабораторный практикум по физике

**Часть 1
(для учащихся 11 класса)**

**Москва
2021 г.**

Пособие подготовили:

***Казанская А.Я.
Кирюшкина В.К.
Кузнецов К.И.
Лукашевский М.В.
Щеглова О.А.
Щеглов С.А.***

***Лабораторный практикум по физике для учащихся 11 классов
(часть 1) Школы № 1502 при МЭИ. М.: 2019 г., 63 с.***

Лабораторный практикум является пособием для выполнения лабораторных работ по программе 11 класса ГБОУ города Москвы «Школа № 1502 при МЭИ». Содержит указания к выполнению 6 лабораторных работ и краткие теоретические введения к ним.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ПОРЯДОК РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ.....	4
СОДЕРЖАНИЕ ФОРМЫ ОТЧЕТА (ПРОТОКОЛА)	4
1. ПОГРЕШНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	5
1.1 Прямые и косвенные измерения	6
1.2 Точность измерений. Погрешность измерений.....	6
1.2.1 Понятие погрешности.....	6
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ	7
2.1. Вычисление погрешностей прямых измерений.....	7
2.1.1. Случайная погрешность.....	7
2.1.2. Погрешность средств измерений (приборная, или инструментальная погрешность)	8
2.1.3. Полная погрешность прямых измерений.....	9
2.2. Погрешности физических постоянных, табличных данных, данных установок (погрешности округления)	10
2.3. Погрешность косвенных измерений	10
3. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	11
3.1. Правила записи чисел.....	11
3.2. Округление результатов промежуточных расчетов	11
3.3. Правило округления абсолютной погрешности	11
3.4. Правила округления и записи результата	11
3.5. Правило сравнения результатов	12
3.6. Построение графиков	13
3.7. Нахождение физических величин по графику	14
4. СХЕМА РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ	16
5. ПРИМЕР ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	17
6. РАБОТА С МУЛЬТИМЕТРОМ	20
ВВОДНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА.....	22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИЗУЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА	27
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	33
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КАТУШКИ С ТОКОМ.....	42
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 РЕАКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	50
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ.....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.	63

Введение

Настоящий сборник лабораторных работ по физике предназначен для учащихся 11 классов Школы № 1502.

Выполнение лабораторных работ составляет очень важную часть обучения физике. Как известно, физика – наука экспериментальная, математическая формулировка законов физики является следствием наблюдений, опытов. Экспериментом также проверяются новые теоретические идеи физиков. Выполняя лабораторные работы, Вы приобретаете навыки исследовательской деятельности, обучаетесь методам получения и обработки результатов.

Сборник составлен в соответствии с программой по физике для первого полугодия 11 класса и включает в себя описание 5 лабораторных работ.

Пункты разделов *Обработка результатов измерений*, отмеченные знаком *, выполняются по указанию преподавателя.

Порядок работы в лаборатории

Учащиеся допускаются к выполнению лабораторной работы, если

- освоили теоретический материал, относящийся к данной работе,
- знают порядок ее выполнения,
- подготовили форму отчета (протокол).

Содержание формы отчета (протокола)

(Разделы 1 – 8 должны быть подготовлены дома в рукописном виде в рабочей тетради)

1. Название и номер лабораторной работы.
2. Формулировка цели работы.
3. Краткое изложение теоретических основ работы.
4. Расчетные формулы.
5. Схема установки (в виде рисунка или электрической схемы). Все основные элементы схемы должны быть пронумерованы арабскими цифрами; расшифровка цифр должна быть дана в подписи под рисунком.
6. Таблица спецификации измерительных приборов.
7. Данные установки, табличные данные.
8. Таблицы результатов измерений.
9. Расчет искомых величин.
10. Расчет погрешностей прямых измерений.

11. Запись результатов прямых измерений в виде доверительных интервалов.
12. Расчет погрешностей косвенных измерений.
13. Запись окончательного результата в виде доверительного интервала.
14. Выводы по результатам экспериментов.

Лабораторные работы выполняют бригады (коллективы в 2-3 человека) строго по графику – расписанию. В ходе работы удобно распределить роли: один выполняет эксперимент, другой записывает результаты в протокол; затем ролями меняются. Это позволяет с одной стороны, всем овладеть навыками работы с приборами, с другой стороны, исключить фактор персонального восприятия показаний прибора. Экспериментальные данные необходимо заносить в протокол *в тех единицах, в которых они измеряются*.

В конце занятия учащиеся (по бригадам) предоставляют преподавателю таблицу результатов измерений и результат расчета искомой физической величины. При этом протокол *визируется преподавателем*. Расчет погрешностей полученных величин, оформление работы, выводы могут быть выполнены в ходе последующей домашней работы и в **обязательном порядке представлены на следующем занятии** на проверку преподавателю.

По завершении цикла, включающего 1, 2 или 3 работы, проводится *защита лабораторных работ*. Для успешной защиты необходимо

- представить полностью оформленные протоколы работ;
- изучить теоретический материал соответствующей темы по лекциям или предлагаемой литературе;
- уметь отвечать на вопросы, приведённые в конце каждой работы;
- объяснять полученные в работе результаты.

График лабораторных работ должен быть выполнен полностью, работы, пропущенные по любой причине, выполняются в дополнительное время (по расписанию лаборатории).

1. Погрешности физических измерений

Целью эксперимента является определение численного значения физической величины. **Истинное значение физической величины** – это такое значение, которое идеальным образом отображает соответствующие свойства объекта. Определение значения физической величины

опытным путем с помощью специальных технических средств называется *измерением*.

1.1 Прямые и косвенные измерения

Прямым измерением – называют измерение, при котором значение физической величины находят непосредственно из опытных данных, как показания использованных измерительных приборов. **Косвенное измерение** – такое, при котором значение физической величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и другими величинами, определяемыми путем прямых измерений, то есть вычисляют по формуле.

Например, требуется определить ускорение тела при его прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости. Прямым измерением определяются время t (по секундомеру) и путь S (по линейке). Ускорение a определяется в результате косвенного измерения, то есть вычисляется по формуле $a = \frac{2S}{t^2}$, которая следует из соотношения

$$S = \frac{at^2}{2}.$$

При проведении измерений вследствие несовершенства методов и средств измерений, непостоянства внешних условий получают не истинное, а приближенное значение физической величины. Процесс измерения можно считать завершенным только тогда, когда указано не только значение измеренной величины, но и возможное отклонение его от истинного значения – погрешность.

1.2. Точность измерений. Погрешность измерений

1.2.1 Понятие погрешности

Точность измерений определяется близостью результата измерения к истинному значению измеряемой величины. Точность измерений характеризуется погрешностью измерения.

По форме числового выражения различают два вида погрешности: абсолютную и относительную.

Абсолютная погрешность Δx – величина возможного отклонения измеренного значения $x_{\text{измер}}$ от истинного. Абсолютная погрешность выражается в единицах измеряемой величины и определяет границы числового интервала, в котором с вероятностью, близкой к единице, содержится истинное значение величины x (рис. 1).

Для истинного значения величины x справедливо соотношение:

$$x_{\text{измер}} - \Delta x \leq x \leq x_{\text{измер}} + \Delta x. \quad (1)$$

Числовой интервал $2\Delta x$, в котором с вероятностью, близкой к единице, содержится истинное значение величины x , называется *доверительным интервалом*.

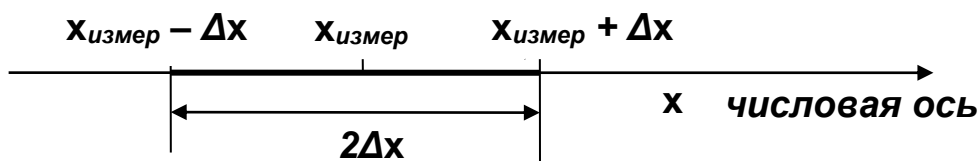


рис. 1

Относительная погрешность δ_x – безразмерная величина, равная отношению абсолютной погрешности к измеренному значению величины, может быть выражена в процентах:

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{измер}}} \quad \text{или} \quad \delta_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{измер}}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

2. Определение погрешностей в лабораторных работах

2.1. Вычисление погрешностей прямых измерений

При оценке точности прямого измерения будем учитывать случайную погрешность и погрешность средства измерения.

2.1.1. Случайная погрешность

Выполнив n измерений величины x при неизменных условиях опыта, получим ее значения: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$. Разброс значений x_i связан со случайной погрешностью измерения величины x . Наилучшим приближением к истинному значению измеряемой величины x является *среднее арифметическое* измеренных значений:

$$x_{\text{ср}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n}. \quad (3)$$

Случайная погрешность результата прямых измерений рассчитывается по формуле Стьюдента:

$$\Delta x_{\text{сл}} = t_{P,n} \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x)^2}{n(n-1)}}, \quad (4)$$

где x_i – i -ое значение измеренной величины; $x_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение, рассчитанное по формуле (7); n – число измерений; $t_{P,n}$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от числа измерений n и доверительной вероятности P .

Доверительная вероятность показывает вероятность нахождения истинного значения измеренной величины в интервале

$$\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x \quad (5)$$

Интервал, определяемый условием (5), называется **доверительным интервалом**. Чем больше доверительная вероятность, тем больше должна быть ширина доверительного интервала.

В рядовых физических экспериментах обычно выбирают $P = 0,95$.

Значения коэффициента Стьюдента рассчитаны теоретически и сведены в таблицы (n -число измерений).

n	P		
	0,90	0,95	0,99
3	2,920	4,303	9,925
4	2,353	3,183	5,841
5	2,132	2,776	4,604
6	2,015	2,571	4,032
7	1,943	2,447	3,707
8	1,895	2,365	3,499

При работе в учебной лаборатории обычно будем проводить не менее пяти измерений.

2.1.2. Погрешность средств измерений (приборная, или инструментальная погрешность)

Погрешность средства измерения $\Delta x_{\text{ип}}$ – разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины.

Погрешность средства измерения является систематической, то есть даёт отклонение измеренной величины от истинного значения в одну сторону, но мы никогда не знаем, в какую именно. Любой прибор позволяет проводить измерения лишь с определенной точностью, погрешность зависит от вида прибора.

- В приборах, у которых переход от одного значения к другому осуществляется скачком (стрелочный секундомер, весы с разновесами), инструментальная погрешность равна *величине скачка*.
- Инструментальная погрешность приборов, снабженных нониусом (штангенциркуль, микрометр), равна точности нониуса:

$$\text{Точность нониуса} = \frac{\text{цена деления основной шкалы}}{\text{число делений нониуса}}$$

- Погрешности электроизмерительных *стрелочных* приборов рассчитываются по классу точности.

Класс точности K определен отношением абсолютной погрешности Δx к используемому пределу измерения прибора $X_{\max}$ и выражен в процентах

$$K = \frac{\Delta x}{X_{\max}} \cdot 100\%.$$

Следовательно, абсолютная погрешность измерения данным прибором рассчитывается по формуле:

$$\Delta x = \frac{K}{100} \cdot X_{\max}. \quad (6)$$

Электроизмерительные приборы имеют восемь классов точности: $K=(0.05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0)$. Чем выше класс точности, тем меньше значение K и меньше погрешность измерения.

- д) Погрешность измерения *цифровыми* приборами рассчитывается по формулам, представленным в *паспорте* прибора.
- е) Для прочих приборов с делениями (линейка, транспортир, термометр и т. п.) в качестве инструментальной погрешности принимается погрешность отсчёта, равная половине цены деления шкалы прибора.

2.1.3. Полная погрешность прямых измерений

Результирующая погрешность прямого измерения рассчитывается по формуле:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сл}}^2 + \Delta x_{\text{пр}}^2} \quad (7)$$

Если $\Delta x_{\text{сл}} \ll \Delta x_{\text{пр}}$, то

$$\Delta x_{\text{прям}} \approx \Delta x_{\text{пр}} \quad (7a)$$

В случае, если $\Delta x_{\text{сл}} \gg \Delta x_{\text{пр}}$, погрешностью средства измерений можно пренебречь. Однако, это одновременно говорит о том, что эксперимент проведен некачественно. Необходимо увеличить число измерений, чтобы уменьшить случайную погрешность.

Если данная физическая величина измеряется *один раз*, то в качестве погрешности прямого измерения берут *инструментальную* погрешность $\Delta x_{\text{пр}}$.

Значение результата прямых измерений записывается в виде

$$x = x_{\text{ср}} \pm \Delta x. \quad (8)$$

2.2. Погрешности физических постоянных, табличных данных, данных установок (погрешности округления)

2.2.1. Физические постоянные (константы) считают точными величинами. В этом случае значение данной величины подставляется в расчетную формулу с числом значащих цифр на одну больше, чем число значащих цифр, полученных в результате прямых измерений. При этом относительная погрешность округления константы окажется на порядок меньше погрешности прямого измерения, и ею можно пренебречь.

Многие табличные данные, используемые в расчетах, представлены с большой точностью. В этом случае при выборе числа значащих цифр для подстановки в расчетную формулу руководствуются предыдущим правилом.

2.2.2. Если же табличные данные, данные установок определены с точностью, сопоставимой с результатом прямых измерений, то такие данные считаются приближенными. В этом случае погрешность табличной величины принимают равной половине единицы младшего разряда используемого числа.

Пример 1. Пусть дано $m = 8,5$ г. Младший разряд числа – десятые (цифра 5). Абсолютная погрешность округления составляет половину от одной десятой: $\Delta m = \frac{0,1}{2} = 0,05$ г;

Пример 2. Пусть дано $M = 4$ г. Младший разряд числа – целые (цифра 4). Абсолютная погрешность округления составляет половину от одной целой: $\Delta M = \frac{1}{2} = 0,5$ г.

2.3. Погрешность косвенных измерений

Результатом косвенных измерений является величина Y , рассчитанная по соответствующей формуле с использованием средних значений результатов прямых измерений.

Погрешность косвенно измеряемой величины определяется погрешностями величин, полученных в процессе прямых измерений, а также погрешностями табличных данных и других постоянных, входящих в расчетную формулу.

Формула для вычисления *относительной погрешности* косвенного измерения $\delta_Y = \frac{\Delta Y}{Y}$ зависит от вида расчётной формулы для Y и *приводится в описании каждой лабораторной работы.*

Абсолютная погрешность косвенного измерения ΔY очевидно может быть рассчитана по формуле:

$$\Delta Y = Y \cdot \delta_Y \quad (9)$$

3. Оформление результатов работы

3.1. Правила записи чисел

В десятичной системе любое число записывают с помощью цифр 0, 1, 2, ..., 9. Перечисленные цифры, кроме нуля, называют *значащими*. Ноль тоже относят к значащим цифрам, если он стоит в середине или в конце числа. Например, *все выделенные* цифры в числе 00648,3600 являются значащими. Результаты физических и технических экспериментов принято записывать только значащими цифрами. Наиболее удобна следующая запись: *запятую ставят после первой отличной от нуля цифры, а значащую часть числа умножают на десять в соответствующей целой степени*. Например, вместо 0,000567 пишут $5,67 \cdot 10^{-4}$, а вместо 3450000 пишут $3,45 \cdot 10^6$.

3.2. Округление результатов промежуточных расчетов

Количество значащих цифр в *промежуточных расчётах* не должно быть слишком большим. Как правило, числа, получаемые при работе с калькулятором, необходимо округлять, оставляя *не более 4-5 значащих цифр*.

Приведем примеры округления чисел до *четырех значащих цифр*: $0,0874425 \approx 0,08744$; $784,648 \approx 784,6$; $369279 \approx 369300$.

3.3. Правило округления абсолютной погрешности

Количество значащих цифр абсолютной погрешности не должно быть более двух. Две цифры оставляют в том случае, если первая значащая цифра погрешности «1» или «2». Если первая цифра больше «2», то абсолютную погрешность округляют так, чтобы оставалась *одна значащая цифра* (см. далее примеры).

3.4. Правила округления и записи результата

Результат прямого или косвенного измерения (x или Y) должен быть округлен (или уточнен) с учетом погрешности измерения: *разряд последней цифры результата должен совпадать с разрядом последней значащей цифры погрешности*.

Результат записывается с указанием погрешности, определяющей доверительный интервал, с соответствующими единицами измерения:

$$Y = Y \pm \Delta Y \quad (10)$$

Пример 1.

В эксперименте было определено сопротивление проводника $R = 2,756 \text{ Ом}$ и абсолютная погрешность $\Delta R = 0,038 \text{ Ом}$. По правилу 3.3 округляем абсолютную погрешность. Первая значащая цифра «3», она больше «2» и стоит в разряде **сотых**. Следовательно, абсолютную погрешность округляем до *одной* значащей цифры, т.е. до разряда **сотых**, получаем $\Delta R = 0,04 \text{ Ом}$. Далее применяем правило 3.4: в округленном значении абсолютной погрешности последняя значащая цифра «4» стоит в разряде **сотых**, следовательно, округляем результат до **сотых**: $R = 2,76 \text{ Ом}$. Окончательный результат записываем в виде: $R = (2,76 \pm 0,04) \text{ Ом}$.

Пример 2.

В эксперименте был определен коэффициент трения поверхности $\mu = 0,32438$ и абсолютная погрешность $\Delta\mu = 0,0197$. По правилу 3.3 округляем абсолютную погрешность. Первая значащая цифра «1», следовательно, в абсолютной погрешности после округления должно быть *две* значащие цифры. Погрешность округляем до следующего разряда, т.е. до тысячных, получаем $\Delta\mu = 0,020$. Далее применяем правило 3.4: в округленном значении абсолютной погрешности последняя значащая цифра «0» стоит в разряде тысячных, следовательно, округляем результат до тысячных: $\mu = 0,324$. Окончательный результат записываем в виде: $\mu = 0,324 \pm 0,020$.

Пример 3.

В эксперименте была определена емкость конденсатора $C = 4,1435 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$ и абсолютная погрешность $\Delta C = 1,23 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$. При записи результата представим *значение величины и ее погрешность* в виде $X \cdot 10^{-8}$, то есть с *одинаковым показателем* степени 10. Окончательный результат получим в виде: $C = (4,14 \pm 0,12) \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$.

3.5. Правило сравнения результатов

Пусть истинное значение изучаемой величины известно или в процессе работы одна и та же величина определяется разными способами.

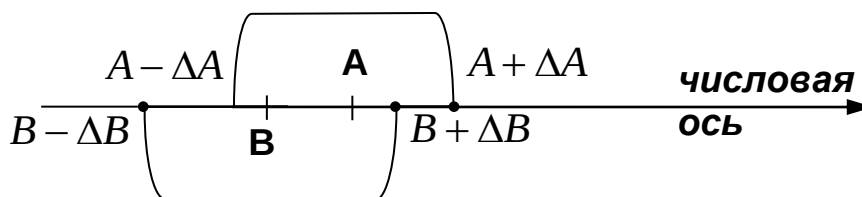


рис. 2

Значения двух величин A и B считаются совпадающими, если их доверительные интервалы *перекрываются* (рис. 2).

В этом случае, очевидно, выполняется соотношение:

$$|A - B| \leq \Delta A + \Delta B \quad (11)$$

3.6. Построение графиков

При изучении зависимости одной измеряемой величины от другой целесообразно представить результаты в форме графика. Главное достоинство графика – его наглядность. График позволяет получить общее качественное представление о характере зависимости, а также судить о соответствии экспериментальных данных той или иной теоретической зависимости. На графиках легко видеть “выпадение” точек, которые, как правило, соответствуют наблюдениям с грубыми погрешностями (промахами).

Графики следует строить на *листах миллиметровой бумаги*. Масштаб графика по обеим осям нужно выбирать так, чтобы предполагаемые зависимости обладали наибольшей наглядностью и заполняли большую часть графика. Поле графика заключают в прямоугольную рамку, согласуя ее с основными линиями сетки. Стрелки на концах экспериментальных графиков не ставят (стрелки принято ставить лишь на иллюстрационных графиках качественного характера, построенных в произвольном масштабе). На концах осей (если на оси используется лишь интервал, то и в начале оси) нужно указать обозначение соответствующих физических величин и единицы измерений этих величин.

Учитывая, что миллиметровая бумага имеет очень мелкую сетку, оцифровывать нужно лишь деления крупной сетки. Допустимые значения, определяющие масштабы, следующие: 0,1,2,3,...; 0,2,4,6,...; 0,5,10,... Эти значения могут быть умножены на $10^{\pm n}$. Не следует наносить на оси числовые значения величин, полученных в ходе опыта!

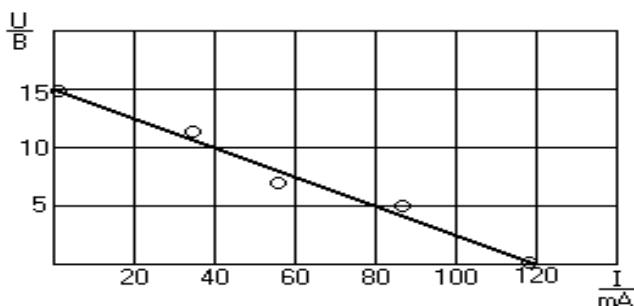
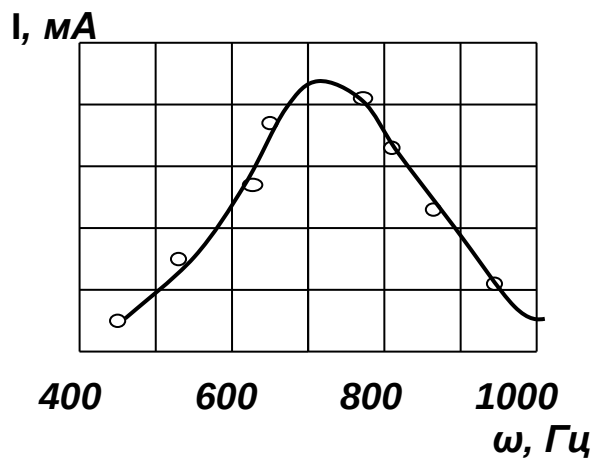


График зависимости напряжения от силы тока на участке цепи



Резонансная кривая колебательного контура

рис. 3

Размеры экспериментальных точек должны быть соотнесены с погрешностями измерения соответствующих величин. Линия графика должна быть гладкой, она проводится так, чтобы по обе стороны от нее располагалось примерно одинаковое число “выпадающих” точек.

Под графиком должно быть подписано пояснение или название. Возможные варианты графического представления результатов показаны на рис. 3.

3.7. Нахождение физических величин по графику

Часто графики строятся с целью нахождения различных физических величин. Проще всего это сделать, если искомая физическая величина является коэффициентом пропорциональности в линейной функции $y = k \cdot x + y_0$ (например, жесткость пружины является коэффициентом пропорциональности между значениями силы упругости пружины и деформации). Рекомендуемая последовательность действий:

1) нанести на график точки, соответствующие измеренным значениям;

2) провести оптимальную прямую через эти точки, таким образом, чтобы количество экспериментальных точек, расположенных выше и ниже оптимальной прямой, было примерно равным (см. рис. 4);

3) ограничить полосу, в которой находятся точки, прямыми, параллельными оптимальной линии и проходящими через наиболее удаленные от оптимальной прямой точки (на рис. 4 – штриховые линии); 4) определить тангенс угла наклона оптимальной прямой по формуле

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{y_m - y_0}{x_0} \text{ в соответствующих единицах измерения.} \quad (12)$$

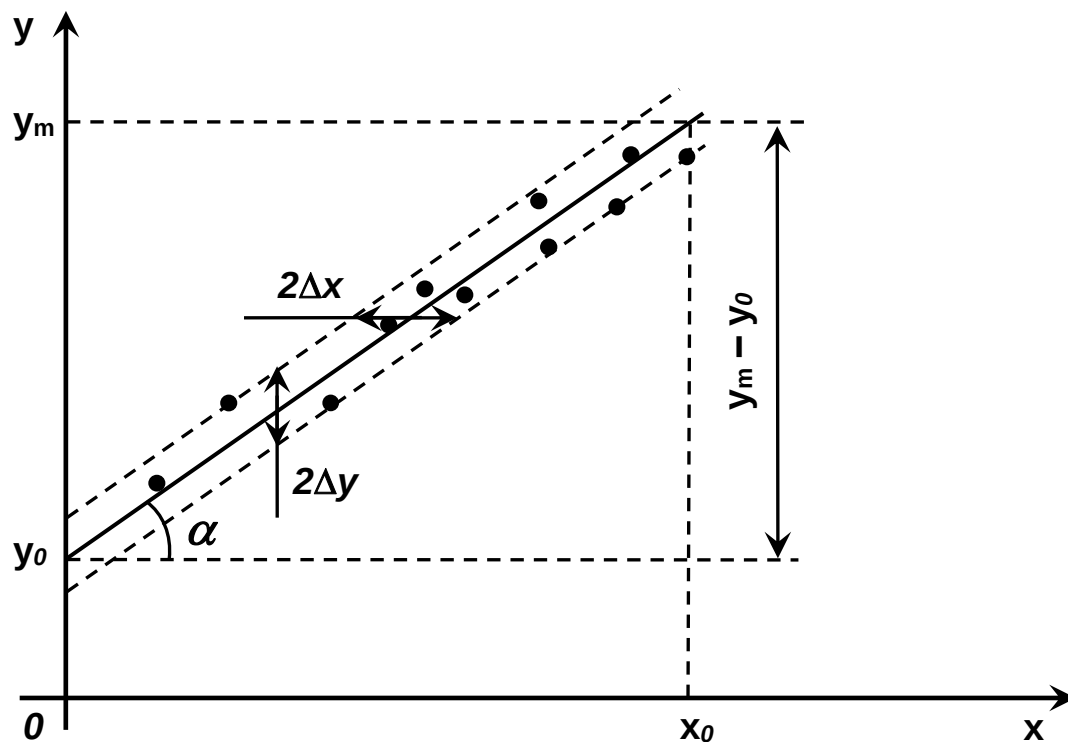


рис. 4

Погрешность искомой физической величины определяется по формулам

$$\delta k = \frac{\Delta y}{y_m} + \frac{\Delta x}{x_0}, \quad \Delta k = k \cdot \delta k. \quad (13)$$

Абсолютные погрешности Δy и Δx определяются из графика, как показано на рис. 4, по соответствующим расстояниям между вспомогательными штриховыми линиями.

4. Схема расчета погрешностей

(в скобках указан раздел подробного описания)

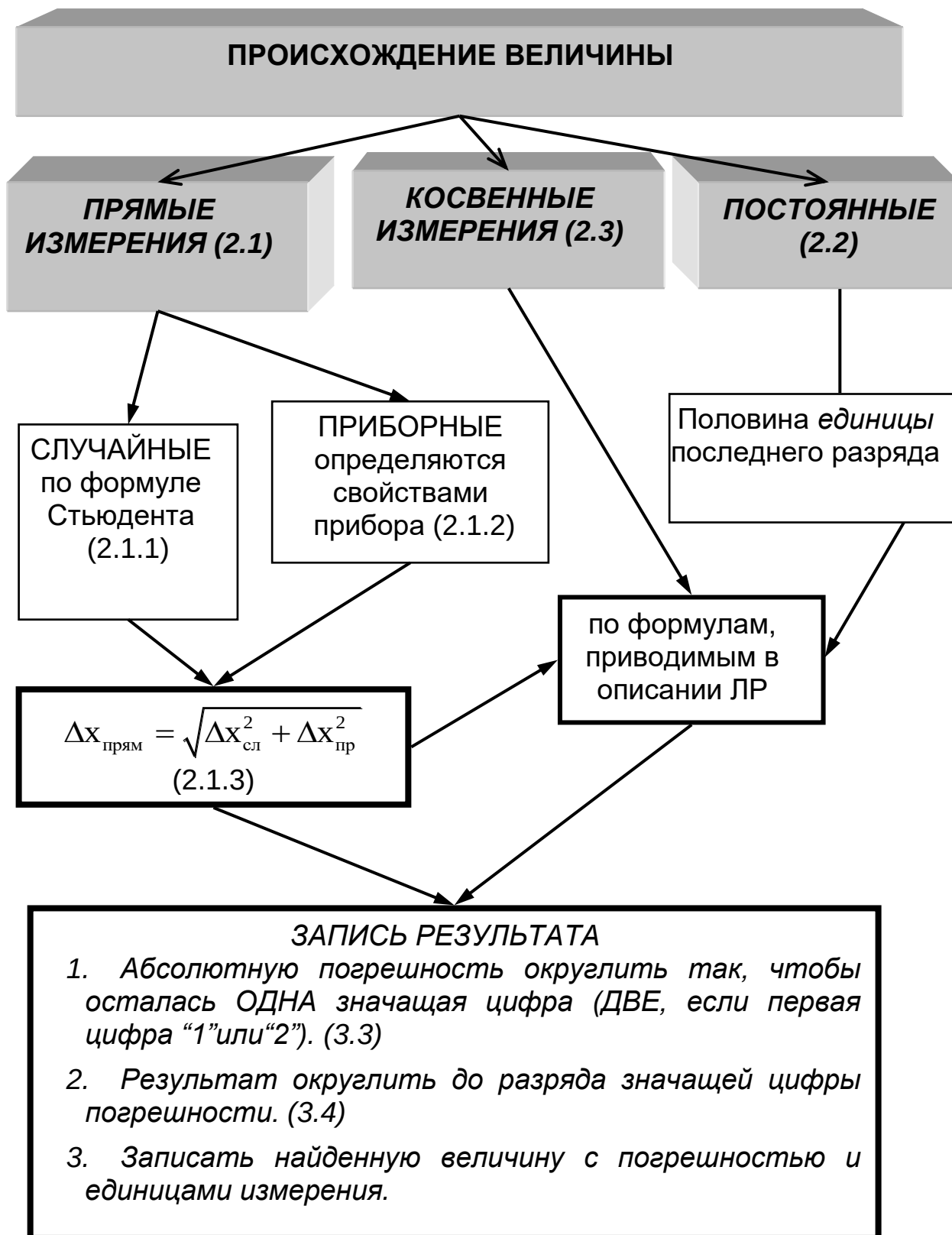


рис. 5

5. Пример обработки результатов измерений

Задание

Рассчитать объем краски, необходимый для окраски забора. Расход краски составляет $P = 0,30 \pm 0,04$ л/м². Размеры забора: высота $h = 1,8$ м, измерена однократно рулеткой с ценой деления 1 мм; длина измерена 5 раз дальномером с приборной погрешностью 0,2 м, результаты измерения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения длины забора дальномером

№ п/п	L_i , м
1	15,8
2	16,2
3	16,0
4	15,8
5	15,8

Необходимый объем краски определяется по формуле $V = S \cdot P$, где S – площадь поверхности забора.

Расчетная формула $V = h \cdot L \cdot P$.

Рассчитать погрешность, полученного объема краски по формулам

относительная погрешность $\delta V = \sqrt{(\delta h)^2 + (\delta L)^2 + (\delta P)^2}$, (*)

абсолютная погрешность $\Delta V = V \cdot \delta V$.

Расчеты

Рассчитаем среднее значение результата прямого измерения длины забора

$$L_{\text{ср}} = \frac{15,8 + 16,2 + 16,0 + 15,8 + 15,8}{5} = 15,92 \text{ м.}$$

Площадь красочного покрытия

$$S = 1,8 \cdot 15,92 = 28,66 \text{ м}^2.$$

Расчет результатов косвенных измерений

Необходимый объем краски

$$V = 1,8 \cdot 15,92 \cdot 0,3 \approx 8,597 \text{ л} \quad \text{проверка размерности: } \frac{\text{л}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^2 = \text{л.}$$

Расчет погрешностей прямых измерений

– Погрешность высоты забора

Согласно п. 2.1.2 е) введения, приборная погрешность рулетки составляет $\Delta h_{\text{пр}} = 0,5 \text{ мм} = 0,0005 \text{ м}$.

Поскольку величина h измерялась один раз, то, согласно п. 2.1.3 введения, полная погрешность высоты забора принимается равной ее приборной погрешности $\Delta h = \Delta h_{\text{пр}} = 0,0005 \text{ м}$.

Рассчитаем относительную погрешность высоты забора

$$\delta h = \frac{0,0005}{1,8} = 2,78 \cdot 10^{-4}$$

– Погрешность длины забора

После многократных измерений необходимо оценить случайную погрешность. Для этого найдем отклонения от среднего ΔL_i и запишем их в соответствующие ячейки таблицы 2.

Таблица 2. Расчет случайной погрешности измерения длины забора

№ п/п	$L_i, \text{м}$	$ L_{\text{ср}} - L_i , \text{м}$	$ L_{\text{ср}} - L_i ^2, \text{м}^2$
1	15,8	0,12	0,0144
2	16,2	0,28	0,078
3	16,0	0,08	0,0064
4	15,8	0,12	0,0144
5	15,8	0,12	0,0144
средн.	15,92		

Значения коэффициента Стьюдента возьмем из таблицы при условии, что количество измерений $n = 5$ и для рядовых физических экспериментов доверительная вероятность $P = 0,95$.

$$t_{P,n} = 2,776$$

Вычислим случайную погрешность длины забора

$$\Delta L_{\text{сл}} = 2,776 \sqrt{\frac{0,0144 + 0,078 + 0,0064 + 0,0144 + 0,0144}{5(5-1)}} = 0,2217 \text{ м.}$$

Вычислим полную погрешность длины забора

$$\Delta L = \sqrt{0,2217^2 + 0,2^2} = 0,2986 \approx 0,3 \text{ м. (округлили до одной значащей цифры)}$$

Вычислим относительную погрешность длины забора

$$\delta L = \frac{0,3}{15,92} = 0,0188$$

Запишем результат измерения длины забора в виде доверительного интервала (согласно пп. 3.3, 3.4)

$$L = (15,9 \pm 0,3) \text{ м}$$

Рассчитаем относительную погрешность расхода краски

$$\delta P = \frac{\Delta P}{P} = \frac{0,04}{0,3} = 0,133.$$

Расчет погрешностей косвенных измерений

$$\text{По (*) } \delta V = \sqrt{(2,78 \cdot 10^{-4})^2 + (0,0188)^2 + (0,133)^2} \approx 0,134 \approx 13 \%,$$

$$\Delta V = 8,597 \cdot 0,134 = 1,1548 \approx 1,2 \text{ л. (округлили до двух значащих цифр)}$$

Запишем найденное значение объема краски в виде доверительного интервала

$$\text{Ответ: } V = (8,6 \pm 1,2) \text{ л.}$$

Левая граница доверительного интервала для объема краски оказалась равной $8,6 - 1,2 = 7,4$ л, правая граница – $8,6 + 1,2 = 9,8$ л.

Изобразим на числовой оси в выбранном масштабе значение необходимого объема краски с доверительным интервалом.

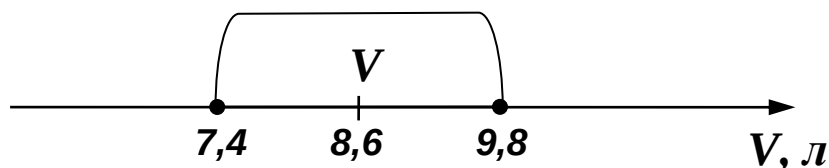


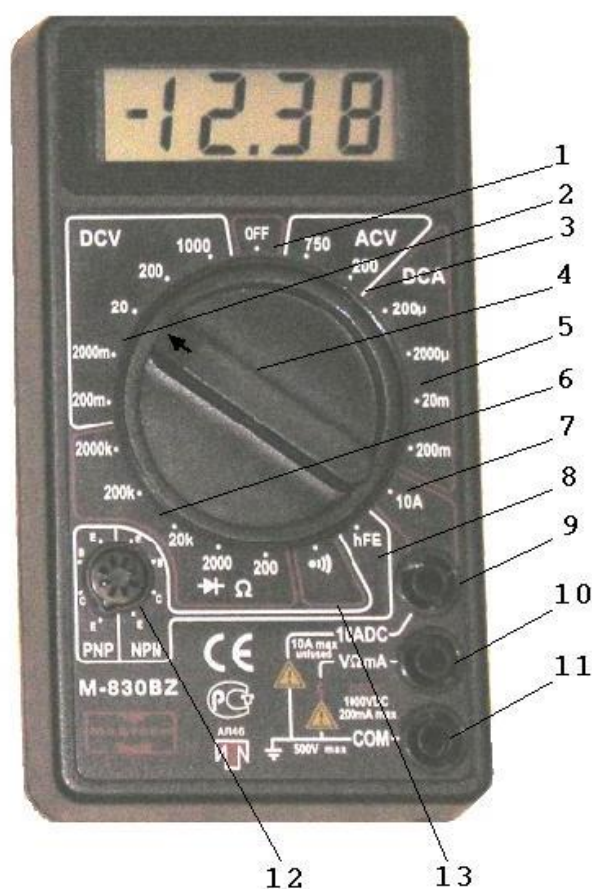
рис. 6

Выводы

Оценка погрешности позволяет определить, сколько краски нужно взять, что бы не оказаться перед недокрашенным забором – ведь при всех измерениях были допущены погрешности. На основании выполненных расчетов нельзя сказать, сколько потребуется краски *точно*, можно утверждать, что с вероятностью 0,95 будет израсходовано не менее 7,4 литров краски и не более 9,8 литров.

6. Работа с мультиметром

Мультиметр (от слов *multy* – много, *metr* – мера) – многофункциональный и многопредельный измерительный прибор. В отличие от «обычных» приборов, предназначенных для измерения какой либо одной величины, мультиметр предоставляет возможность измерения различных величин: постоянное электрическое напряжение и сила тока, сопротивление, переменный ток и напряжение и другое. Микромультиметры, используемые в лабораторных измерениях лабораторного практикума, – это малогабаритные цифровые многопредельные ампер-вольт-омметры.



На рисунке изображен микромультиметр модели M830BZ. Прибор включается в электрическую цепь с помощью двух проводников, используя гнёзда (11) и (10) (кроме функции измерения большого тока, для которой предусмотрена отдельная клемма (9)).

Переключение всех функций и пределов в этом приборе осуществляется *галетным переключателем* (4).

В положении (1) галетного переключателя – микромультиметр *выключен*.

Блок контактов DCV (2) предназначен для измерения *напряжения постоянного тока* на различных пределах.

Блок контактов ACV (3) предназначен для измерения *напряжения переменного тока* на различных пределах.

Блок контактов DCA (5) предназначен для измерения *постоянного тока* на различных пределах (в том числе большого тока до 10 А)

Функции измерения *переменного тока* прибор не имеет.

Положение переключателя (8) обеспечивает измерение параметров транзисторов, подключаемых к порту (12). Положение (13) обеспечивает звуковую индикацию наличия замкнутой цепи.

Класс точности прибора зависит от выбранной функции, значения приведены в таблице.

Классы точности микроультиметра M830BZ.

Измеряемая величина	Постоянное напряжение.		Постоянный ток.		Переменное напряжение
	Предел 200мВ	Другие пределы	Предел 10А	Другие пределы	
Класс точности	0,25	0,5	2,0	1,0	1,2

Индикация измеренных величин на всех пределах микроультиметров осуществляется четырьмя значащими цифрами. В режимах измерения силы тока и напряжения микроультиметр может считаться *практически идеальным* с точки зрения значений внутренних сопротивлений прибора.

Приборная погрешность в общем виде для цифровых измерительных приборов определяется формулой:

$$\delta x = \left[k + \frac{k}{2} \left(\frac{X}{x} - 1 \right) \right] \%,$$

где x – значение измеряемой величины, k – класс прибора, X – рабочий предел измерения. Класс точности зависит от выбранной функции прибора, значения класса точности приведены в таблицах 1 и 2.

Пример расчета погрешности измерения

Пусть результат измерения напряжения постоянного тока микроультиметром на пределе 20 В составил $U = 10,0$ В, класс точности 0,2, тогда:

$$\delta U = \left[0,2 + 0,1 \cdot \left(\frac{20}{10} - 1 \right) \right] \% = 0,3\%, \quad \Delta U = \frac{\delta U \%}{100} \cdot U = \frac{0,3 \cdot 10}{100} = 0,03 \text{ В}$$

ВАЖНОЕ ЗАМЕЧАНИЕ!!

При измерениях микроультиметром необходимо

- *вначале* установить необходимые пределы и функции,
- *затем* включить напряжение исследуемой цепи.

По окончании измерений

- *вначале* выключить питание исследуемой цепи,
- *затем* выключить прибор.

Например, при неправильном порядке выключения М830, которым измеряли ток 200мА (на пределе 200 мА), переключая его последовательно через пределы 20, 2, 0,2 мА до выключения, при этом *прибор может быть выведен из строя из строя*, так как происходит 1000-кратное превышение предела!

ВВОДНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы

Ознакомление с методами измерения физических величин, ознакомление с видами погрешностей измерения физических величин и способами их расчета, приобретение навыков подготовки протокола лабораторной работы и его оформления, экспериментальное определение ускорения свободного падения на широте Москвы методом математического маятника с последующей обработкой результатов измерений.

Теоретические основы работы

Математический маятник (рис.1) представляет собой точечную массу m , подвешенную на невесомой нерастяжимой нити к неподвижной точке. Если отклонить маятник от положения равновесия на малый угол $\alpha = (3 \div 6)^\circ$ и отпустить, то под действием силы тяжести mg и сила натяжения нити T маятник придет в состояние колебательного движения относительно положения равновесия, подчиняющееся закону косинуса (гармонические колебания):

$$x(t) = x_0 \cos \omega t, \quad (1)$$

где $x(t)$ – положение маятника (материальной точки) на оси x в некоторый момент времени t ; x_0 – амплитуда колебаний – максимальное смещение маятника от положения равновесия; ω – циклическая частота колебаний.

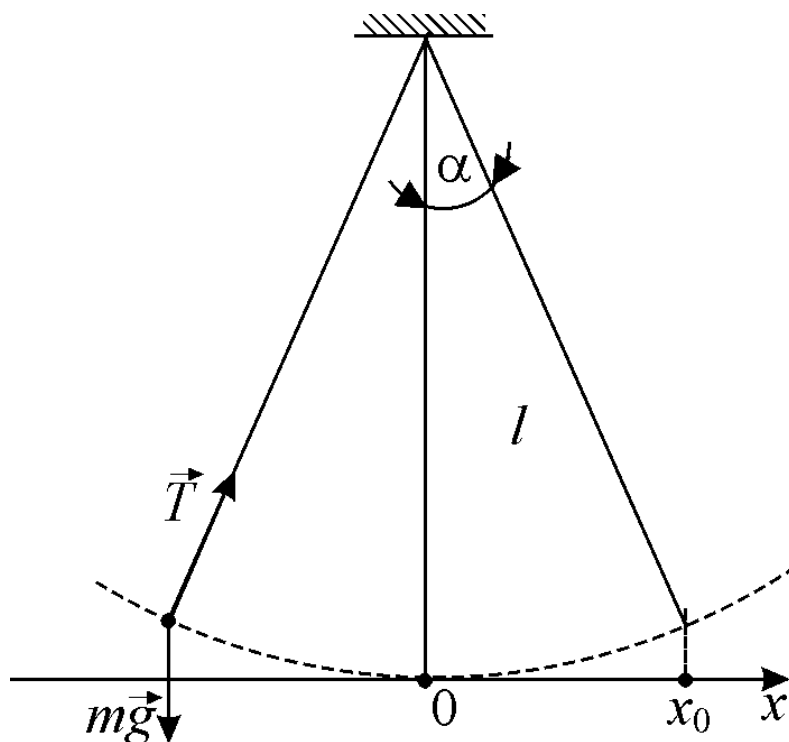


Рис. 1. Схема математического маятника

В теории колебательного движения показано, что циклическая частота колебаний ω связана с длиной маятника l и ускорением свободного падения g соотношением

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (2)$$

В свою очередь период колебаний T (время, за которое маятник совершает одно полное колебание) связан с циклической частотой соотношением

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (3)$$

Тогда, подставив (2) в (3), получаем:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (4)$$

Таким образом, зная период колебаний математического маятника, можем рассчитать ускорение свободного падения по формуле:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}. \quad (5)$$

Описание установки

Используемый в лабораторной работе маятник (рис. 2) представляет собой массивный груз 1, подвешенный на тонкой длинной нити 2 в точке А узла 3, расположенного на стойке 4 жестко закрепленной на массивном основании 5. Если длина нити подвеса l_n намного больше высоты груза h , то такой маятник по характеристикам движения близок к математическому. При малых амплитудах колебаний период колебаний такого маятника близок к периоду колебаний математического маятника (4), при этом под длиной маятника l следует понимать расстояние от точки подвеса до центра масс груза 1.

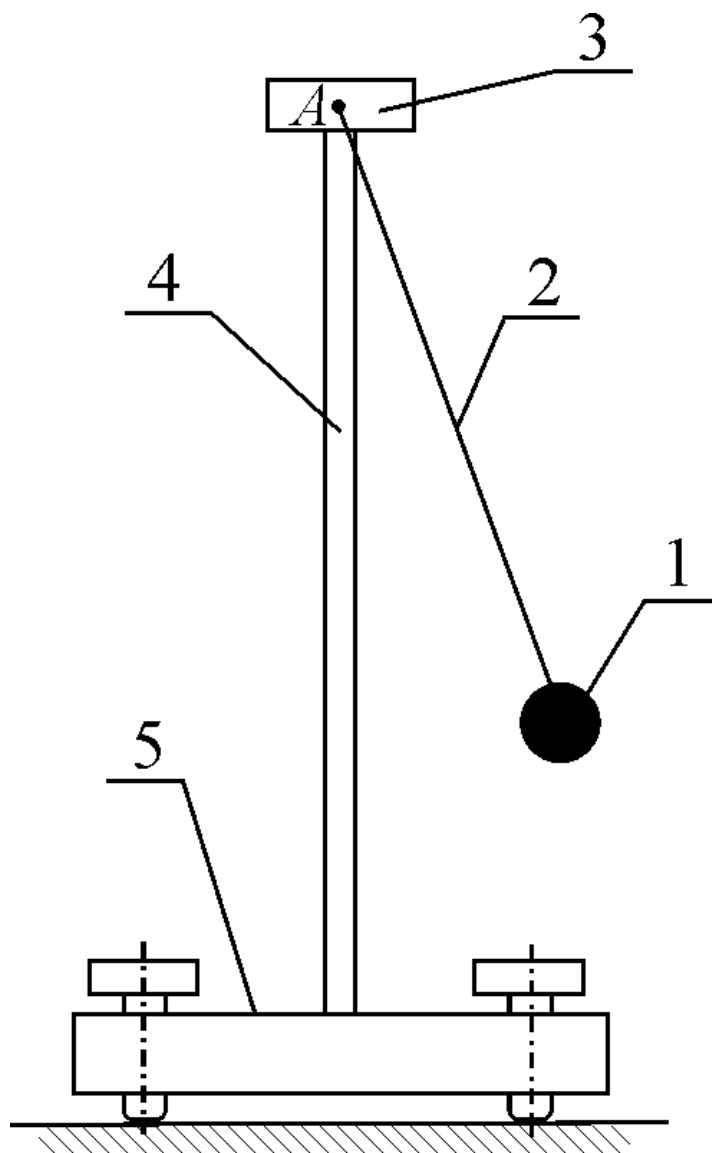


Рис. 2. Схема установки

Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу 1 спецификации измерительных приборов.

2. С помощью штангенциркуля проведите измерения высоты груза h . Результат занесите в таблицу 2.
3. Используя линейку с миллиметровой шкалой проведите измерения длины нити подвеса l_n . Результат занесите в таблицу 2.
4. Отклоните шарик с нитью от положения равновесия на малый угол $\alpha = (3 \div 10)^\circ$ и отпустите без толчков. Маятник начнет совершать колебания относительно положения равновесия
5. С помощью секундомера проведите измерения времени τ пяти периодов колебаний ($N = 5$). Результат занесите в таблицу 3.
6. Пункты 4-5 повторите еще четыре раза. Результаты измерений десяти полных колебаний занесите в таблицу 3.

Таблица 1 Спецификация измерительных приборов

№ п/п	Наименование прибора	Предел измерений	Цена деления	Приборная погрешность
1				
2				
3				

Таблица 2 Результаты измерений линейных размеров

Высота груза h , мм	Длина нити l_n , мм	Длина маятника l , мм

Таблица 3 Результаты измерений времени τ десяти полных колебаний

№ п/п	$\tau_i, \text{с}$	$ \tau_i - \bar{\tau} , \text{с}$	$ \tau_i - \bar{\tau} ^2, \text{с}^2$
1			
2			
3			
4			
5			
$\bar{\tau}$ среднее			

Обработка результатов измерений

1. По данным таблицы 2 рассчитать эффективную длину маятника равную расстоянию от точки подвеса до центра масс груза $l = l_n + h/2$. Результат расчета занесите в таблицу 2.

- По данным таблицы 3 рассчитайте среднее значение $\bar{\tau}$ времени $N = 5$ полных колебаний маятника.
- Рассчитайте случайную погрешность измерения времени $N = 5$ полных колебаний маятника по формуле:

$$\Delta\tau_{\text{сл}} = t_{p,n} \sqrt{\frac{\sum(\bar{\tau} - \tau_i)^2}{n(n-1)}},$$

где $t_{p,n}$ – коэффициент Стьюдента; n – полное число измерений ($n = 5$).

- В качестве приборной погрешности измерения времени выберите предельно допустимую инструментальную погрешность секундомера $\Delta\tau_{\text{пр}}$ согласно таблице 1.
- Рассчитайте полную абсолютную погрешность измерения времени

$$\Delta\tau = \sqrt{\Delta\tau_{\text{пр}}^2 + \Delta\tau_{\text{сл}}^2}.$$

- Запишите результат прямо измеренной величины τ в виде доверительного интервала в соответствии с правилами округления

$$\tau = \bar{\tau} \pm \Delta\tau$$

- Рассчитайте период колебаний маятника по формуле

$$T = \frac{\bar{\tau}}{5}.$$

- По формуле (5) рассчитайте ускорения свободного падения g .
- Рассчитайте относительную погрешность косвенного измерения g по формуле:

$$\delta g = \sqrt{(\delta l)^2 + 4(\delta\tau)^2 + 4(\delta\pi)^2},$$

т.к. $\delta\pi \ll \delta\tau$, то относительная погрешность может быть рассчитана как $\delta g = \sqrt{(\delta l)^2 + 4(\delta\tau)^2}$.

- Исходя из определения относительной погрешности, рассчитайте абсолютную погрешность косвенного измерения ускорения свободного падения g .
- Запишите окончательный результат в виде доверительного интервала.

$$g = \bar{g} \pm \Delta g$$

Шаблон отчета по вводной лабораторной работе приведен в конце Сборника лабораторных работ в Приложении №1.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

Цель работы

- исследовать зависимость сопротивления проволочного проводника от его длины;
- определить удельное сопротивление и материал, из которого проводник изготовлен;

Теоретические основы работы

Сопротивление проводника зависит от материала проводника и его геометрических размеров и может быть рассчитано по формуле,

$$R = \rho \frac{l}{s}, \quad (1)$$

где l – длина проводника, s – площадь поперечного сечения проводника.

Удельное сопротивление – это сопротивление проводника единичной длины и единичного поперечного сечения. Его размерность определяется по формуле:

$$[\rho] = \frac{1\text{Ом} \cdot 1\text{м}^2}{1\text{м}} = 1\text{Ом} \cdot \text{м}.$$

Чтобы определить значение сопротивления проводника R_x , нужно измерить напряжение между его концами U_R и силу тока I_R , протекающего по нему. Тогда по закону Ома

$$R_x = \frac{U_R}{I_R}.$$

Для измерения напряжения применяется реальный вольтметр с сопротивлением R_V , обозначим его показания U_0 ; силу тока можно измерить амперметром с сопротивлением R_A , его показания I_0 . Казалось бы, остаётся разделить показания вольтметра U_0 на показания амперметра I_0 , и задача решена. Но не всё так просто.

Возможны два варианта включения миллиамперметра и вольтметра (рис. 1).

В схеме (а)* амперметр измеряет ток, текущий через неизвестное сопротивление: $I_0 = I_{R_x}$, но вольтметр показывает напряжение не на резисторе, а между точками 1 и 2, равное сумме напряжений на R_x и на амперметре:

$$U_0 = U_{R_x} + U_A = I_0 R_x + I_0 R_A.$$

Очевидно, что, используя в законе Ома показания приборов, получим:

$$\frac{U_0}{I_0} = R_{12}, \quad (1)$$

где $R_{12} = R_x + R_A$ – сопротивление всего участка 1-2.

Неизвестное сопротивление R_x можно рассчитать:

$$R_x = \frac{U_0}{I_0} - R_A, \quad (2)$$

Из формулы (1) видно, что отношение U_0/I_0 тем ближе к R_x , чем меньше сопротивление амперметра. При $R_A \rightarrow 0$ (идеальный амперметр)

$$R_x = \frac{U_0}{I_0}.$$

На схеме (б) (схема с «точным» измерением напряжения).

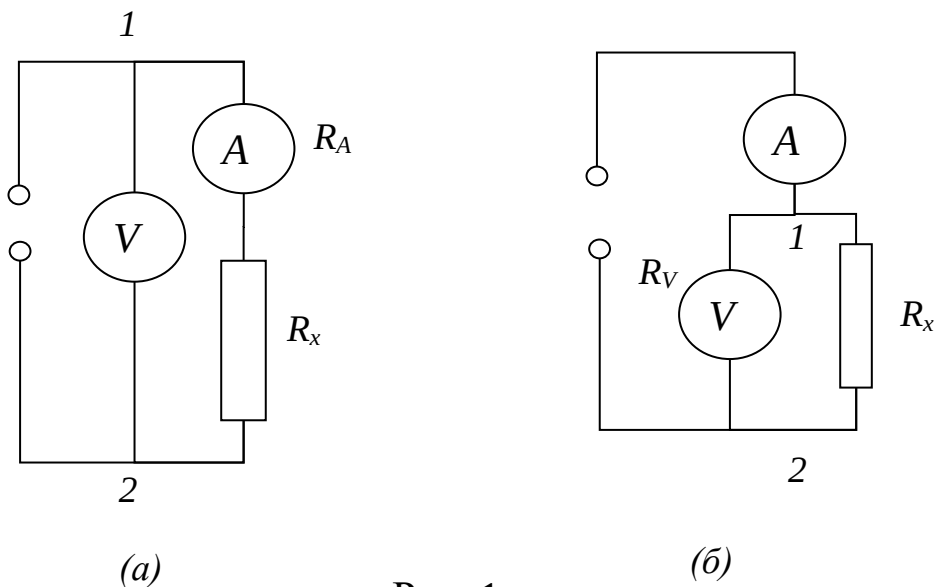


Рис. 1

*Схему (а) можно условно назвать схемой с «точным» измерением силы тока, текущего по резистору. Подумайте, почему термин «точное» измерение взят в кавычки.

$$R_x = \frac{R_{12}}{1 - \frac{R_{12}}{R_v}} = \frac{U_0}{I_0} \left(\frac{1}{1 - \frac{U_0 / I_0}{R_v}} \right). \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что R_{12} тем ближе к R_x , чем больше сопротивление вольтметра. При $R_v \rightarrow \infty$ (идеальный вольтметр) получим:

$$R_x = R_{12} = \frac{U_0}{I_0}.$$

Таким образом, применив закон Ома просто к значениям показаний реальных приборов, получим лишь *приблизительное значение* сопротивления исследуемого резистора:

$$R_x \approx \frac{U_0}{I_0}.$$

В этом случае при одинаковых условиях *схема (а)* дает меньшую ошибку, когда неизвестное сопротивление *велико по сравнению с сопротивлением амперметра*, а *схема (б)*, – когда неизвестное сопротивление *мало по сравнению с сопротивлением вольтметра*.

Однако, зная сопротивления приборов, можно при использовании любой схемы вычислить «точные» значения сопротивления по формулам (2) и (3).

Описание установки

Установка представляет собой единый блок, предназначенный для исследования сопротивлений. Изучаемое сопротивление – проволока (1), оснащенная контактным ползунком (2), от положения которого зависит рабочая длина проволоки. Она закреплена на штативе с измерителем линейного перемещения (3), по положению которого можно определить рабочую длину проволоки. Блок питания постоянного тока позволяет изменять напряжение на изучаемом сопротивлении, причем сила тока остаётся постоянной при изменении сопротивления. Значения напряжения и силы тока определяются по стрелочным приборам (4) и (5) на лицевой панели блока. Клавиша переключателя V_3 в процессе измерений должна быть в нажатом (утопленном) положении, клавиша переключателя V_2 должна быть отжата, что обеспечивает включение приборов по схеме рис.1.

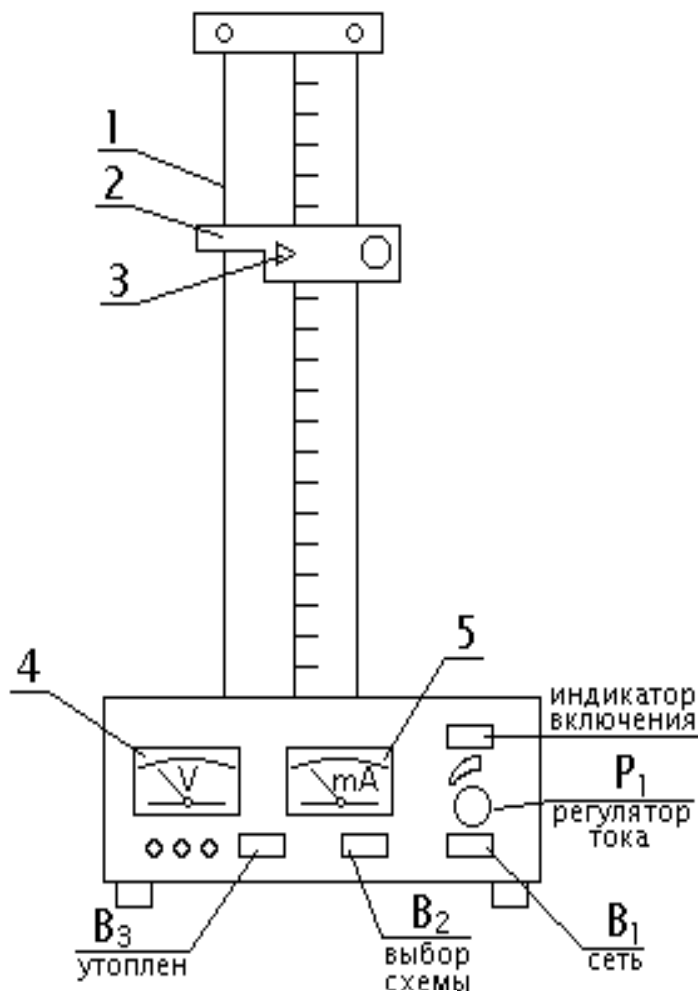


Рис. 2

Чтобы правильно снять показания приборов с зеркальной шкалой, необходимо следить за совпадением стрелки с одним из делений на шкале прибора и с ее собственным изображением в зеркале шкалы.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов.

Таблица 1. Спецификация измерительных приборов.

№ п/п	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность средства измерений
1					
2					
3					

2. Запишите данные установки:

Диаметр проводника $d = \dots$

3. Перед включением источника питания установите нулевое выходное напряжение и максимальное значение длины проволоки, запишите его в **таблицу 2**.
4. Включите установку, ручкой P_1 установите постоянное значение силы тока $I = \dots\dots\dots$ мА (по указанию учителя в пределах от 170 до 250 мА), запишите в протокол.
5. Перемещая контактный ползунок, измеряйте значения напряжения для 6-7 положений ползунка, определяющих значения длины проволоки; записывайте результаты в **таблицу 2**.

Таблица 2. Результаты измерений и расчёта.

№	1	2	3	4	5	6	7
l , мм							
U , В							
R_x , Ом							

6. Отключите установку.

Обработка результатов измерений

1. Для каждого значения длины проводника рассчитайте значения сопротивления по формуле (2) и запишите в **таблицу 2**.
2. По данным **таблицы 2** постройте график зависимости сопротивления от длины проводника.
3. Сделайте вывод, соответствует ли характер зависимости соотношению (1).

- Используя формулу (1), для максимальной длины рассчитайте удельное сопротивление проводника.
- Рассчитайте погрешность косвенного измерения сопротивления для одной точки по указанию учителя:

$$\delta R = \sqrt{(\delta U)^2 + (\delta I)^2}, \quad \Delta R = R \cdot \delta R,$$

где $\delta U = \frac{\Delta U}{U}$, $\delta I = \frac{\Delta I}{I}$

- Представьте результат измерения сопротивления в виде доверительного интервала: $R = R \pm \Delta R$.
- Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности измерения удельного сопротивления материала ρ :

$$\delta \rho = \sqrt{(\delta U_{\max})^2 + (\delta I)^2 + (\delta l_{\max})^2}, \quad \Delta \rho = \rho \cdot \delta \rho.$$

- Запишите значение ρ в виде доверительного интервала:

$$\rho = \rho \pm \Delta \rho.$$

- Используя табличные данные, установите, из какого материала сделан исследуемый проводник.

Литература.

- Пинский А.А. «Физика – 10», §50, 65, 66.
- Мякишев Т.Я., Синяков А.З., Слободсков Б.А. «Физика 10-11. Электродинамика», (учебник для углубленного изучения физики) М.: «Дрофа», 1996. §2.4.

Контрольные вопросы

- Что такое сопротивления проводника?
- От чего зависит сопротивления проводника?
- Что такое удельное сопротивления проводника?
- С какой целью вводится понятие удельного сопротивления материала проводника?
- Почему в данной работе используется проволока из материала с большим удельным сопротивлением?
- Всегда ли можно ли определить сопротивление проводника, разделив показание вольтметра на показание амперметра?
- Какие величины измеряются в ходе работы?
- Какие величины являются результатом косвенных измерений?
- Выведите формулу для расчета удельного сопротивления по результатам опыта.
- Какой физический смысл имеет тангенс угла наклона графика $R(l)$ к оси абсцисс?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы

- Исследование режима работы электрической цепи.
- Определить значения следующих величин:
 - ЭДС источника;
 - внутреннее сопротивление источника;
 - ток в режиме короткого замыкания;
 - *ток в режиме согласованной нагрузки (при максимальной мощности на нагрузке);
- *Исследовать зависимости:
 - *мощности в нагрузке от её сопротивления;
 - *мощности в нагрузке от силы тока.

Теоретические основы работы

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

Сила тока в замкнутой электрической цепи определяется законом Ома:

где ε – ЭДС источника тока с внутренним сопротивлением r , R – внешнее сопротивление, или *нагрузка*. Сила тока в цепи изменяется при изменении внешнего сопротивления.

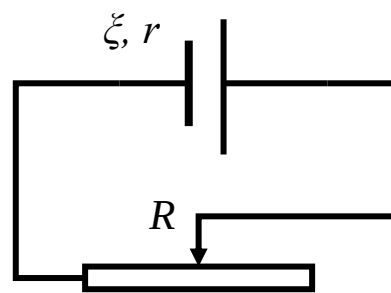


Рис.1

При $R = 0$ (режим короткого замыкания) сила тока наибольшая: $I_{\text{кз}} = \frac{\varepsilon}{r}$.

С ростом R сила тока уменьшается, при $R \rightarrow \infty$ (режим холостого хода) $I_{\text{хх}} = 0$.

Из (1) следует: $IR = \varepsilon - Ir$.

Произведение $IR = U$ называется напряжением на внешнем сопротивлении (нагрузке). Зависимость напряжения от силы тока можно выразить формулой:

$$U = \varepsilon - Ir. \quad (2)$$

Графиком функции $U(I)$ является прямая линия. Значение внутреннего сопротивления источника r определяется как тангенс угла наклона прямой $U(I)$ к оси абсцисс (рис. 2а.):

$$\operatorname{tg} \alpha = \left| \frac{\Delta U}{\Delta I} \right| = r$$

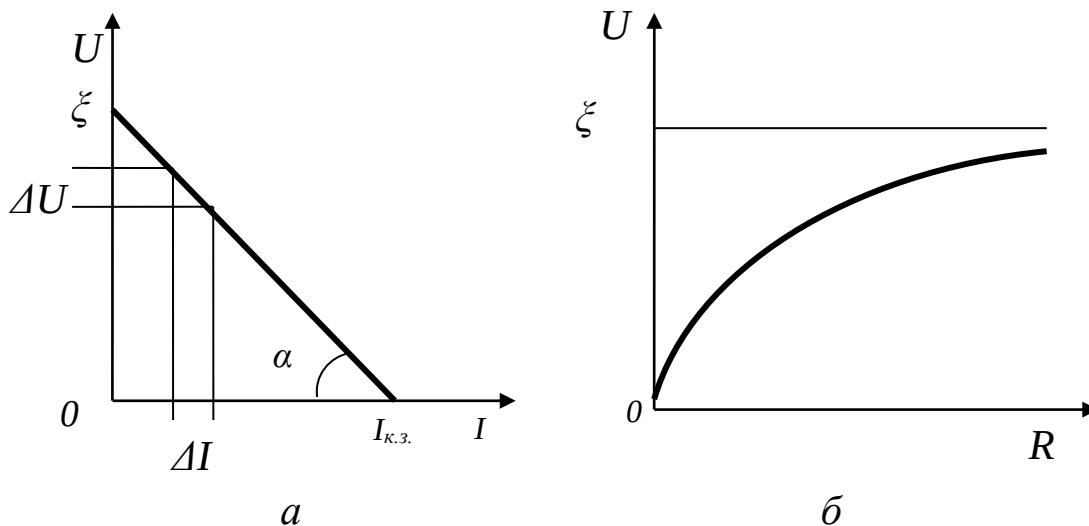


Рис.2

$$U(R) = IR = \frac{\varepsilon}{R + r} R = \frac{\varepsilon}{1 + \frac{r}{R}} \quad (4)$$

Зависимость напряжения на нагрузке от её сопротивления R имеет вид:

График этой функции показан на рис. 2б: при $R = 0$ $U = 0$ при $R \rightarrow \infty$ $U \rightarrow \varepsilon$.

*Мощностью электрического тока называется скалярная физическая величина, равная отношению энергии W к значению времени t , за которое эта энергия выделяется: $N = \frac{W}{t}$.

Мощность электрического тока, выделившуюся на резисторе R , можно рассчитать по формулам:

$$N = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (5)$$

Выясним, при каком значении силы тока нагрузки I в сопротивлении R выделяется максимальная мощность. Из закона сохранения энергии для данной цепи следует:

$$N_{\text{источника}} = N_{\text{полезная}} + N_{\text{потерь}},$$

где $N_{\text{полезная}} = I\varepsilon$, $N_{\text{потерь}} = I^2 r$ – тепловые потери в самом источнике.

Тогда зависимость мощности в нагрузке от силы тока выразится формулой:

$$N_{\text{нагрузки}} = N(I) = I\varepsilon - I^2 r. \quad (6)$$

График функции $N(I)$ показан на рис. 3а. Это парабола, обращенная ветвями вниз; $N = 0$ при $I=0$ и при $I = \frac{\varepsilon}{r} = I_{\text{кз}}$; вершине параболы, то есть максимальному значению мощности в нагрузке, соответствует значение силы тока $I_{N \text{ max}} = \frac{\varepsilon}{2r} = \frac{I_{\text{кз}}}{2}$.

Сравнивая это значение силы тока с формулой (1), получим $R = r$. Это означает, что мощность в нагрузке имеет максимальное значение, если сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника. Такой режим работы цепи называется режимом согласованной нагрузки. Значение максимальной мощности в нагрузке определится формулой:

$$N_{\text{max}} = I^2 R = \frac{\varepsilon^2}{(R + r)^2} \cdot R = \frac{\varepsilon^2}{4r^2} \cdot r = \frac{\varepsilon^2}{4r} \quad (7)$$

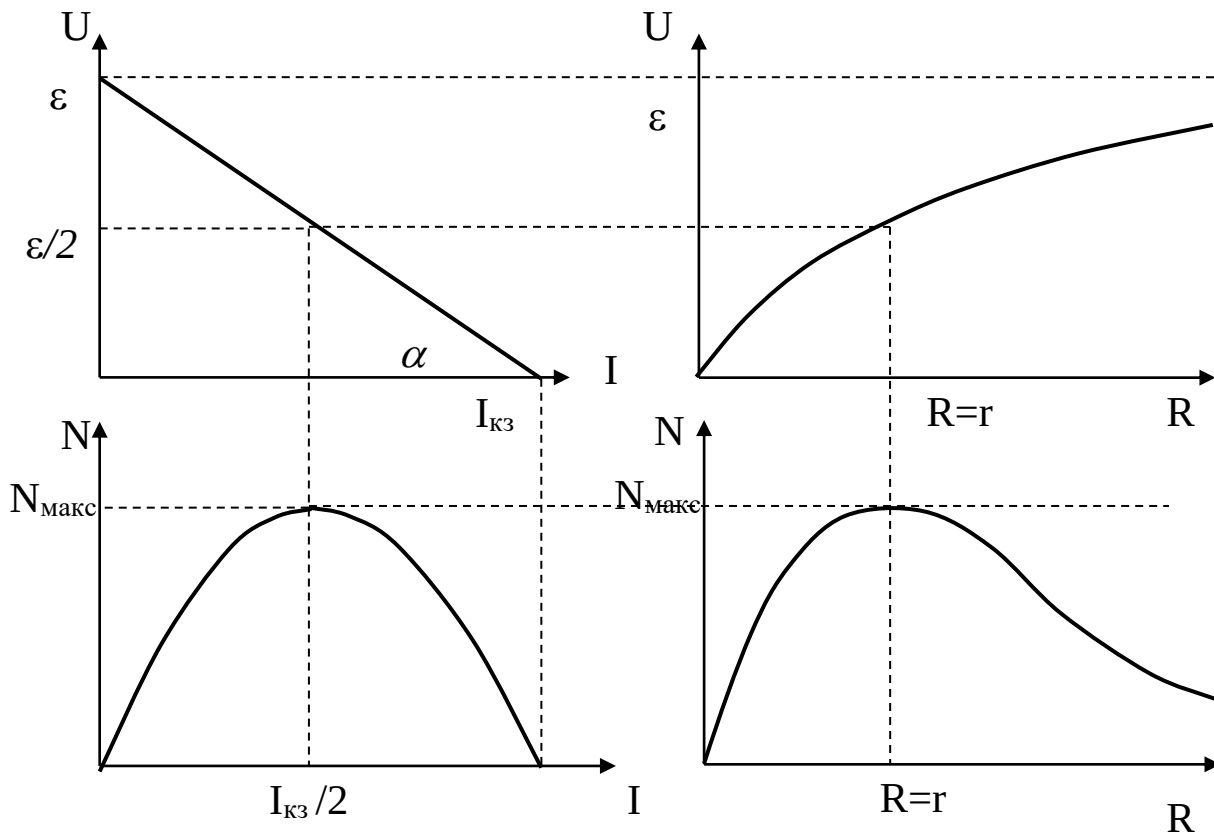
Зависимость мощности в нагрузке от сопротивления нагрузки R имеет вид:

$$N(R) = I^2 R = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2} = \frac{\varepsilon^2}{R + 2r + \frac{r^2}{R}}.$$

График функции $N(R)$ показан на рис. 3б.

Мощность в нагрузке – это полезная мощность. Коэффициент полезного действия такой цепи определяется отношением:

$$\eta = \frac{N_{\text{полезн}}}{N_{\text{загр}}} = \frac{N_{\text{нагр}}}{N_{\text{источн}}} = \frac{UI}{\varepsilon I} = \frac{R}{R + r}. \quad (8)$$



а

Рис. 3

б

Описание установки

Принципиальная схема установки показана на рис. 4, где внутреннее сопротивление ЭДС моделируется резистором r .

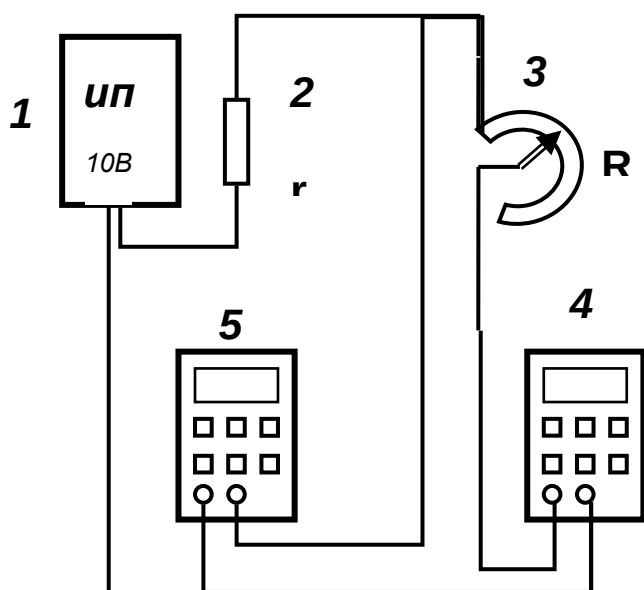


Рис.5

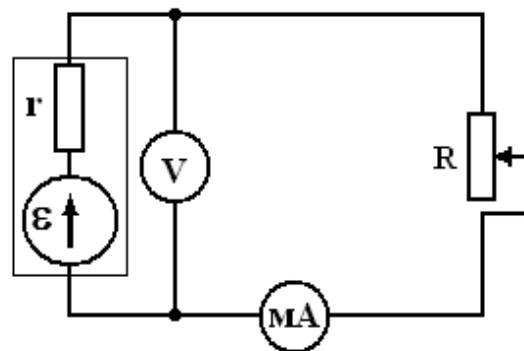


Рис.4

Ра-
бочая

установка схематически представлена на рис.5. Основой установки служит лабораторный модуль, внутри которого смонтированы провода. Узловые точки схемы выведены на панель в виде контактных гнёзд, к которым присоединены элементы схемы: источник питания (1), внутреннее сопротивление которого моделируется резистором r (2), кольце-

вой переменный резистор R (3). Для измерения силы тока и напряжения используются микроультиметры (4) и (5) соответственно.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу 1 спецификации измерительных приборов.

Таблица 1. Спецификация измерительных приборов.

№	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность
1					
2					

2. Запишите номер элемента «*внутреннее сопротивление источника*» $r = \dots\dots\dots \text{Ом}$.
3. Включите источник питания «ИП», установите выходное напряжение близкое к 10 В по вольтметру на источнике питания.
4. Включите питание микроультиметров.
5. Движком кольцевого реостата изменяйте сопротивление нагрузки, установите *минимальное* значение сопротивления. Запишите показания «*вольтметра*» и «*амперметра*» (т.е. соответствующих микроультиметров) в этом режиме в строку 1 **таблицы №2**.
6. Затем установите *максимальное* значение сопротивления и запишите показания микроультиметров в этом положении в строку 10 **таблицы 2**.
7. Изменяя сопротивление нагрузки R , запишите еще 8 промежуточных значений напряжения U и силы тока I , равномерно распределенных между режимами 1 и 10.
8. Установите другой элемент «*внутреннее сопротивление источника*» на соответствующее место в схеме, запишите его номер и повторите выполнение пунктов с 3 по 5, заполняя **таблицу 3** аналогичную **таблице 2**.

Таблица 2. Результаты измерений с элементом «внутреннее сопротивление источника» №....

№ точки	U , В	I , мА	R , Ом	$*N$, Вт	$*\eta$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Таблица 3. Результаты измерений с элементом «внутреннее сопротивление источника» № (аналогичная таблице 2).

9. Измерьте напряжение в режиме *холостого хода*, разомкнув цепь нагрузки (для этого нужно вынуть одну из перемычек в схеме). Запишите значение U_{xx} .
10. Отключите источник питания цепи, выключите питание мультиметров и покажите результаты учителю.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте значения R по формуле $R = U/I$ для каждого режима и запишите в таблицы 2 и 3.
2. * Рассчитайте значения мощности, выделяющейся на сопротивлении R , для каждого режима по формуле $N = UI$ и запишите их в таблицы.
3. По данным таблиц постройте графики зависимости: $U = U(I)$, $U = U(R)$, $*N = N(R)$, $*N = N(I)$. Графики выполняйте в едином масштабе по соответствующим осям и на одних и тех же координатных сетках для двух внутренних сопротивлений источника, как на рис.3.
4. **Работа с графиками зависимости напряжения от силы тока.**
 - Для определения значения ЭДС источника продлите линии графиков зависимости $U = U(I)$ пунктирной линией до пересечения с осью U . Полученные значения ЭДС запишите в протокол.

Сравните с измеренным значением напряжения в режиме холостого хода U_{xx} .

- Для определения значения токов короткого замыкания продлите графики зависимости $U = U(I)$ пунктирной линией до пересечения с осью I . Полученные значения токов короткого замыкания запишите в протокол для обоих случаев.
- Для определения значения внутренних сопротивлений каждого элемента найдите тангенсы углов наклона прямых по формуле:

$$r = \frac{\varepsilon}{I_{кз}}.$$

Полученные значения сопротивлений $r_{1,2}$ запишите в протокол для обоих случаев.

5. *Работа с графиками зависимости мощности от силы тока.

- По графику определите силы тока I_{Nmax} , соответствующие максимальной мощности для обоих случаев. Сравните полученные значения со значениями соответствующих токов короткого замыкания, найденных в п.4, проверьте справедливость соотношения: $I_{Nmax} = I_{кз}/2$.
- Используя значения I_{Nmax} , по графику $U = U(I)$ определите значения напряжения U_{Nmax} , соответствующие максимальной мощности на нагрузке. Проверьте справедливость соотношения: $U_{Nmax} = \varepsilon/2$.
- Определите значения максимальной мощности и сравните их со значениями, рассчитанными по формуле (7).

6. *Работа с графиками зависимости мощности от сопротивления.

- Определите значения сопротивлений нагрузки, соответствующие максимальной мощности, сравните их с ранее найденными значениями внутренних сопротивлений.

7. *Рассчитайте значения коэффициента полезного действия цепи по формуле (8), занесите в таблицы 2 и 3.

8. *Постройте графики зависимости коэффициента полезного действия цепи от значения сопротивления R . Определите значения коэффициента полезного действия в режиме максимальной мощности и запишите в протокол.

9. Произведите расчёт погрешностей измерения для одного опыта по указанию учителя.

- рассчитайте абсолютные погрешности измерения силы тока и напряжения по формулам:

$$\Delta U = U \delta U \quad \Delta I = I \delta I,$$

где δU , δI – относительные погрешности измерения, определяемые точностью микроультиметров в соответствии со спецификацией приборов.

- рассчитайте относительную и абсолютную погрешности измерения сопротивления нагрузки, погрешность определения внутреннего сопротивления источника и *мощности:

$$\delta R = \sqrt{(\delta U)^2 + (\delta I)^2} = \delta N, \quad \Delta R = R \cdot \delta R \approx \Delta r, \quad \Delta N = N \cdot \delta N,$$

- запишите результаты измерений значений силы тока, напряжения, сопротивлений и *мощности с учетом их погрешностей в виде доверительных интервалов.

10. Сделайте выводы:

- о характере зависимости $U = U(I)$;
- о равенстве U_{xx} и ЭДС источника;
- *о равенстве $R_{N\max}$ и r в пределах погрешностей измерений.
- *о достижении максимальной мощности при $I = I_{кз}/2$ и $U = \varepsilon/2$;
- *о зависимости КПД от значения внутреннего сопротивления источника и внешнего сопротивления цепи.

11. *Сформулируйте и обоснуйте рекомендации по наиболее рациональному подбору значения нагрузочного сопротивления.

Литература

1. Под ред. Пинского А.А. «Физика-10», М., Просвещение, 1995. §48-52.
2. Мякишев Г.Я., Синяков А.З., Слободсков Б.А. «Физика. Электродинамика» 10-11 классы (учебник для углубленного изучения физики), М., Дрофа, 2002. §2.4, 2.11, 2.14, 2.16.

Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл понятия “ЭДС”?
2. Сформулируйте закон Ома для полной цепи.
3. Каков характер зависимостей $I(R)$, $U(R)$, $U(I)$ в замкнутой цепи?
4. По какому графику и как определить ЭДС и ток короткого замыкания? Ответ обосновать.
5. По какому графику и как определить внутреннее сопротивление источника? Ответ обосновать.
6. Что покажет идеальный вольтметр, подключенный к клеммам источника тока, если: 1) цепь разомкнута; 2) цепь замкнута?

7. *Как определяется работа и мощность постоянного тока?
8. *Два разных резистора включены в цепь последовательно. В каком резисторе выделяется большая мощность?
9. *Два разных резистора включены в цепь параллельно. В каком резисторе выделяется большая мощность?
10. *При каком значении сопротивления внешней нагрузки полезная мощность максимальна? Докажите свой ответ.
11. *Выведите формулу зависимости $N_{\text{полезная}}(I)$.
12. *Выведите формулу зависимости $N_{\text{потерь}}(R)$.
13. *От чего зависит КПД схемы?
14. *Как зависит КПД от силы тока нагрузки?
15. *Какое значение нагрузочного сопротивления наиболее рационально с энергетической точки зрения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КАТУШКИ С ТОКОМ

Цель работы

- наблюдение зависимости магнитной индукции поля, создаваемого короткой катушкой с током и соленоидом, от координаты на оси;
- экспериментальное определение модуля вектора магнитной индукции на оси катушки и соленоида;
- *изучение зависимости магнитной индукции от силы тока в катушке;
- *теоретический расчет модуля вектора магнитной индукции на оси катушки и сравнение с результатами эксперимента.

Теоретические основы работы

Вокруг проводника с током существует магнитное поле. Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции $\vec{B}$. Графически магнитное поле можно изобразить с помощью линий магнитной индукции. Линии магнитной индукции – это линии, в каждой точке которых вектор магнитной индукции направлен по касательной к ним. Направление вектора $\vec{B}$ для поля катушки с током можно определить с помощью правила буравчика (правила правой руки): если вращать рукоятку буравчика по направлению тока в витке, то поступательное перемещение буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции поля, созданного током в катушке на её оси. Густота линий магнитной индукции пропорциональна модулю магнитной индукции B . Важная особенность линий магнитной индукции состоит в том, что они всегда замкнуты, поэтому магнитное поле называется вихревым.

На рис. 1 изображены графически магнитное поле короткой катушки с током (1а) и магнитное поле длинной катушки – соленоида (1б). По густоте линий магнитной индукции видно, что поле на оси короткой катушки ослабевает с расстоянием, а поле внутри соленоида практически однородное, магнитная индукция лишь немного уменьшается на концах.

Магнитная индукция на оси x , перпендикулярной к плоскости короткой катушки (рис.1а), пропорциональна силе тока I , зависит от радиуса катушки R , числа витков N и координаты x рассматриваемой точки и определяется формулой (1):

$$B(x) = \frac{\mu_0 R^2 IN}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (1)$$

Из формулы видно, что с ростом x магнитная индукция убывает, а при $x = 0$ (в центре катушки) ее значение определяется формулой:

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2R}. \quad (2)$$

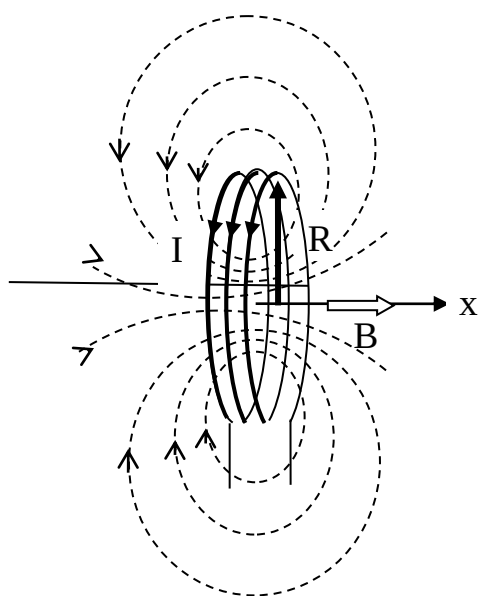


Рис.1а

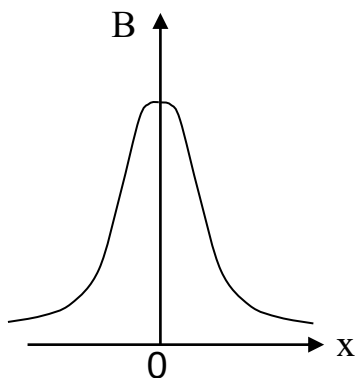


Рис.2а

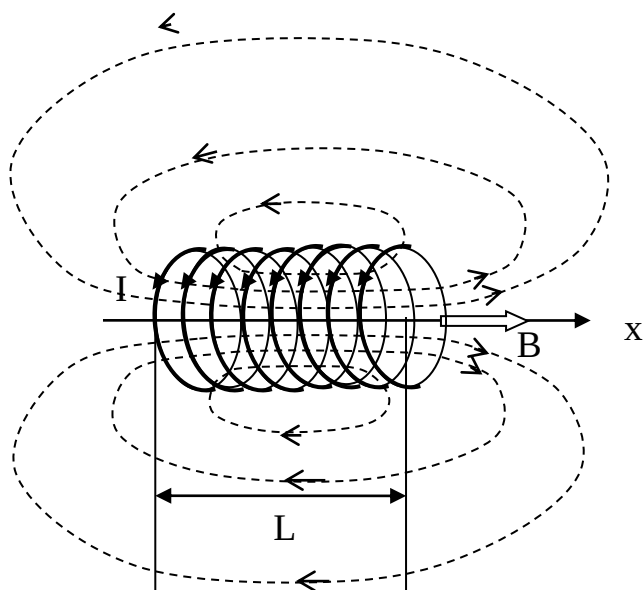


Рис.1б

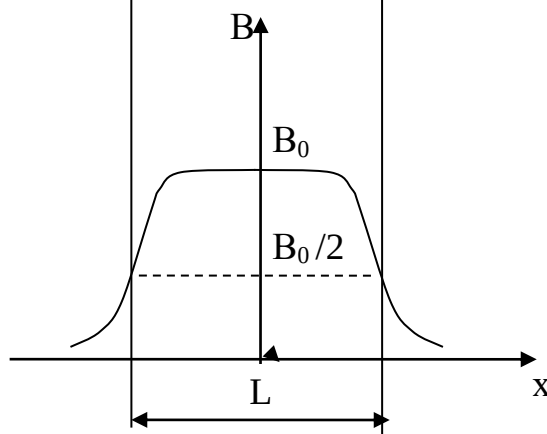


Рис.2б

График функции (1) представлен на рис. 2а.

Магнитная индукция внутри длинной катушки (соленоида) с током I почти постоянная, определяется по формуле:

$$B = \mu_0 I \frac{N}{L}, \quad (2)$$

где N – число витков, L – длина соленоида.

На концах магнитная индукция уменьшается, так что в центре основания составляет половину максимальной. График зависимости магнитной индукции на оси длинной катушки (соленоида) от координаты представлен на рис. 2б.

Описание установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 3.

1, 2 - рабочий участок (короткая катушка 1 и длинная катушка 2 (соленоид) в сборе); 3 - датчик магнитной индукции;

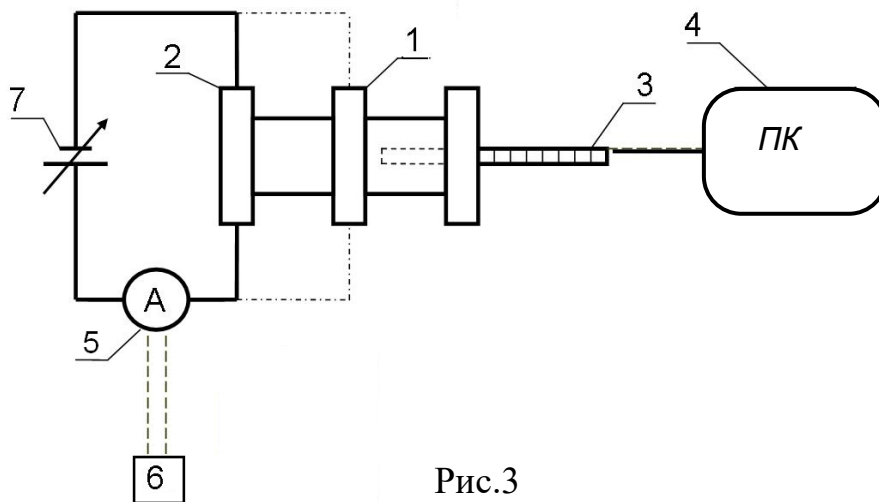


Рис.3

4 - компьютер; 5 - микроультиметр; 6 - источник питания микроультиметра; 7 - источник питания катушек.

Источник питания (7) служит для обеспечения питания катушки. Рабочая сила тока катушки устанавливается с помощью ручки управления на лицевой панели источника (7) и контролируется по показаниям микроультиметра. Определение координаты датчика магнитной индукции выполняется по шкале, закрепленной на датчике.

Порядок выполнения работы

Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов.

Таблица 1. Спецификация измерительных приборов.

№ п/п	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность средства измерений
1	Датчик магнитной индукции				
2	Шкала координаты датчика				
3	Мультиметр				

Часть 1. Изучение магнитного поля катушки с током

1. Запишите данные установки:

Число витков катушки $N_k =$, $\Delta N_k =$

Радиус катушки $R_k =$ мм, $\Delta R_k =$

2. Подключите короткую катушку к источнику питания (7).

3. Установите катушку в центре рабочего участка.

4. Установите регулятор выходного напряжения источника питания катушки в минимальное положение (предельное при повороте против часовой стрелки), включите источник кнопкой «сеть».

5. Установите такое значение напряжения источника питания, чтобы сила тока катушки **не превышала максимально допустимого уровня (0,4 А)**.

6. Включите компьютер.

7. Запустите программу Logger Pro.

Опыт 1. Экспериментальное определение положения катушки, соответствующее координате $x = 0$.

1. Установите датчик магнитной индукции на координату $x = 0$.

2. Текущее значение продольной проекции вектора магнитной индукции отображается в левом нижнем углу рабочего поля окна программы Logger Pro. Перемещая короткую катушку и наблюдая за изменениями значений магнитной индукции, добейтесь максимального значения магнитной индукции (датчик магнитной индукции должен оставаться на координате $x = 0$). Это положение катушки соответствует размещению датчика в центре катушки, оно должно оставаться неизменным в ходе следующего опыта.

Опыт 2. Экспериментальное определение зависимости модуля вектора магнитной индукции на оси короткой катушки от координаты.

1. Произведите настройку регистратора: выберите пункты меню программы Logger Pro *Эксперимент*, *Сбор данных*; параметр *Режим* установите *Выбранные события*, нажмите кнопку *Готово*.

2. Установите датчик магнитной индукции в положение с координатой $x = -2$ см по координатной оси.

3. Начните регистрацию, нажав кнопку *Сбор данных* .

4. Запишите первое измеренное значение (координата $x = -2,0$ см) нажатием кнопки *Сохранить* .

5. Переместите датчик на 0,5 см, получите значение магнитной индукции в точке с координатой $x = -1,5$ см нажатием кнопки *Сохранить* .

6. Продолжайте процедуру измерений «по точкам», перемещая датчик каждый раз на 0,5 см по оси катушки.
7. Произведя установленное число измерений, прекратите процедуру записи нажатием кнопки *Стоп*.
8. Покажите полученный график учителю.
9. Используя нужные значения координат и магнитной индукции, занесите данные в Таблицу № 2.
10. Измените значение тока в катушке на 0,1 А и повторите пп. 2 - 9.
11. Выведите регуляторы выходного напряжения источника питания катушки в крайнее левое положение, выключите источник кнопкой «сеть».

Таблица 2. Зависимость магнитной индукции от координаты на оси короткой катушки

№	x , см	$I_{k1} =$		$I_{k2} =$	
		$B_{\text{эксп}}$, мТл	$B_{\text{теор}}$, мТл	$B_{\text{эксп}}$, мТл	$B_{\text{теор}}$, мТл
1	-2				
2	-1				
3	0				
4	1				
5	2				
6	3				
7	4				
8	5				
9	6				
10	7				

Часть 2. Изучение магнитного поля соленоида

Опыт 3. Экспериментальное определение зависимости магнитной индукции на оси соленоида от координаты.

1. Подключите соленоид к источнику питания (7).
2. Установите регулятор выходного напряжения источника питания катушки в минимальное положение (предельное при повороте против часовой стрелки), включите источник кнопкой «сеть».
3. Установите такое значение напряжения источника питания, чтобы сила тока соленоида **не превышала максимально допустимого уровня**.
4. Установите датчик магнитной индукции в положение с координатой $x = 0$ см по координатной оси.
5. Начните регистрацию, нажав кнопку *Сбор данных* .

6. Запишите первое измеренное значение (координата $x = 0,0$ см) нажатием кнопки *Сохранить* .
7. Переместите датчик на 0,5 см, получите значение магнитной индукции в точке с координатой $x = 0,5$ см нажатием кнопки *Сохранить* .
8. Продолжайте процедуру измерений «по точкам», перемещая датчик каждый раз на 0,5 см по оси соленоида.
9. Произведя установленное число измерений, прекратите процедуру записи нажатием кнопки *Стоп*.
10. Покажите полученный график учителю.
11. Используя нужные значения координат и магнитной индукции, занесите данные в Таблицу № 3.

Таблица 3. Зависимость магнитной индукции от координаты на оси соленоида.

№	x , см	$B_{\text{эксп.}}$, мТл
1	0	
2	1	
3	2	
4	3	
5	4	
6	5	
7	6	
8	7	

Обработка результатов измерений

Обработка результатов опыта с короткой катушкой.

1. По данным **таблицы 2** постройте график зависимости экспериментальных значений магнитной индукции от координаты на оси тонкой катушки для значений силы тока по указанию учителя.
2. Рассчитайте теоретические значения магнитной индукции по формуле (1) и запишите в таблицу 1.
3. На той же координатной плоскости постройте график зависимости теоретических значений магнитной индукции от координаты.
4. Для одной строки в таблице 2 рассчитайте погрешность прямых измерений магнитной индукции, как приборную погрешность используемого датчика

$$\Delta B_{\text{эксп}} =$$

и погрешность теоретического значения по формуле:

$$\delta B_{\text{теор}} = \sqrt{\delta I^2 + \delta R^2 + 9\delta x^2 + \delta N^2}.$$

Представьте результаты измерений в виде доверительного интервала $B \pm \Delta B$.

5. Сравните значения $B_{\text{теор}}$ и $B_{\text{эксп.}}$ с учетом погрешностей и сделайте вывод.

6. *Проверьте справедливость соотношения для одной координаты по указанию учителя: $\frac{B_1}{B_2} = \frac{I_1}{I_2}$, сделайте вывод.

Обработка результатов опыта с соленоидом.

1. Произведите аналогичную обработку результатов и постройте график зависимости экспериментальных значений магнитной индукции от координаты на оси соленоида.
2. Рассчитайте по формуле (2) теоретическое значение магнитной индукции в центре соленоида и в середине основания, запишите в таблицу 2.
3. Вычислите погрешность прямых измерений по формуле (3) и погрешность теоретического расчёта по формуле:

$$\delta B_{\text{теор}} = \sqrt{\delta I^2 + \delta L^2 + \delta N^2}.$$

4. Сравните значения $B_{\text{теор}}$ и $B_{\text{эксп.}}$ с учетом погрешностей и сделайте вывод.

Литература

1. Пинский А.А. «Физика-10», М., Просвещение, 1995.
2. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б. «Физика-11», М., Просвещение, 2005, §§1- 3

Контрольные вопросы

1. Что такое магнитная индукция? В каких единицах измеряется
2. Перечислите основные свойства магнитного поля.
3. Опишите способы определения направления вектора магнитной индукции поля, созданного током.
4. Что такое линии магнитной индукции? Какую информацию по картине магнитных линий можно получить?
5. Какие поля называются вихревыми?
6. Нарисуйте магнитные поля прямого и кругового тока, соленоида с помощью линий магнитной индукции.
7. В чем заключается принцип суперпозиции для магнитных полей?
8. Какие величины измеряются в ходе работы?
9. Какие величины являются результатом косвенных измерений?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

РЕАКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы

- *наблюдение осциллограмм переменного тока; измерение разности фаз между напряжениями на активном сопротивлении, на индуктивности и на конденсаторе в последовательной цепи;
- исследование зависимости реактивных сопротивлений от частоты переменного тока;
- определение емкости конденсатора;
- *определение индуктивности катушки.

Теоретические основы работы

Переменный электрический ток – это ток, периодически меняющийся по величине и направлению.

Рассмотрим случаи, когда переменное напряжение, изменяющееся по закону

$$u(t) = U_m \cos \omega t \quad (1),$$

подается на различные элементы цепи: резистор R , или индуктивность L , или емкость C .

Резистор R в цепи переменного тока

В резисторе R , изображенном на рис. 1, происходит превращение потребляемой электрической энергии во внутреннюю энергию, поэтому его называют активным сопротивлением. В этом случае ток в цепи определяется законом Ома:

$$\begin{aligned} i(t) &= u(t)/R; \\ i(t) &= I_m \cos \omega t \end{aligned} \quad (2)$$

В цепи с активным сопротивлением нет сдвига по фазе между напряжением и током.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока

При протекании переменного тока через катушку в ней возникает ЭДС самоиндукции. Колебания напряжения на концах катушки опережают по фазе колебания силы тока на $\pi/2$:

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \cos \omega t. \\ u(t) &= U_m \cos(\omega t + \pi/2) \end{aligned} \quad (3)$$

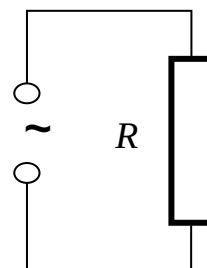


Рис. 1

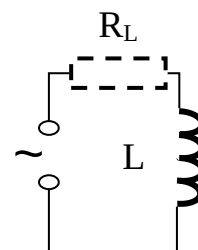


Рис.2

Для мгновенных значений силы тока и напряжения закон Ома не выполняется, но его можно применить для амплитудных и действующих значений:

$$I_m = \frac{U_m}{X_L}, \text{ где } X_L = \omega L \quad (4)$$

– индуктивное сопротивление. Реальная катушка обладает активным сопротивлением R_L , полное сопротивление определяется формулой:

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2} \quad (5)$$

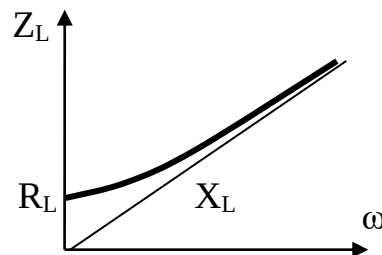


Рис.3

График зависимости полного сопротивления катушки индуктивности от частоты показан на рис. 3. Амплитуда силы тока определяется законом Ома:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R_L^2 + X_L^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \quad (6)$$

Аналогичным соотношением связаны действующие значения напряжения и силы тока.

Конденсатор в цепи переменного тока

При подаче переменного напряжения происходит периодическая зарядка и разрядка конденсатора, так что в цепи течет переменный ток.

Колебания напряжения на конденсаторе отстают от колебаний силы тока на $\pi/2$:

$$i(t) = I_m \cos \omega t \quad u(t) = U_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (7)$$

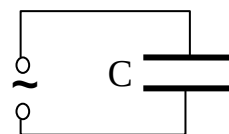


Рис.4

Закон Ома в этом случае для амплитудных и действующих значений записывается так:

$$I_m = \frac{U_m}{X_C}, \text{ где } X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (8)$$

– емкостное сопротивление.

Зависимость $X_C(\omega)$ имеет вид гиперболы (рис.5).

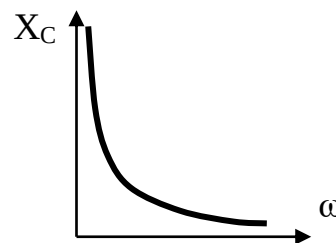


Рис.5

Сопротивления X_C и X_L называются реактивными. В течение одной половины периода эти сопротивления потребляют энергию от источника, в течение второй половины возвращают ее обратно, поэтому работа электрического тока и потребляемая энергия за период равны нулю.

Описание установки

Лабораторная установка схематически представлена на рис. 6. Основной установки служит лабораторный модуль, внутри которого смонтированы провода. Узловые точки схемы выведены на панель в виде контактных гнёзд, к которым присоединены элементы схемы: генератор пе-

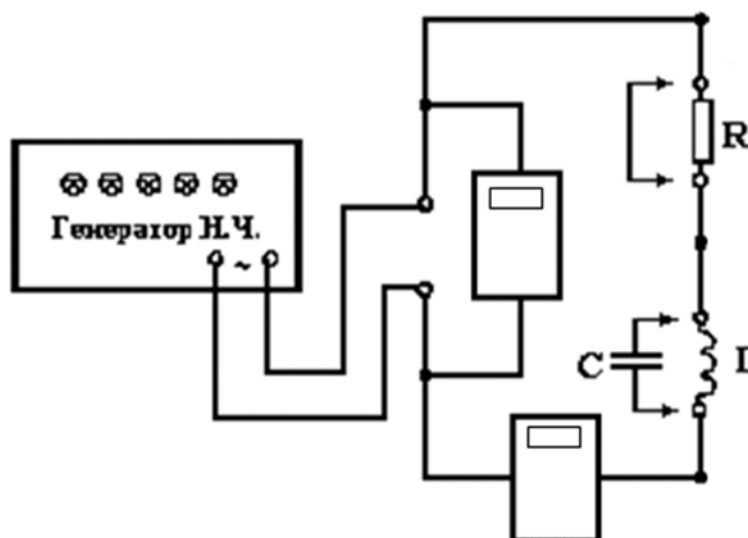


Рис. 6

ременного тока низкой частоты, сопротивление R , катушка индуктивности L (или конденсатор C). Для измерения силы тока и напряжения используются микроультиметры.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов.

Таблица 1. Спецификация измерительных приборов.

№ п/п	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность средства измерений
1	Микро мультиметр				
2	Микро мультиметр				
3	Генератор				

2. Соберите схему, установив, согласно рисунку, конденсатор и вместо сопротивления – перемычку в соответствующие гнезда на схеме.
3. Установите начальное значение частоты на панели управления генератора, согласно значению, указанному на установке.
4. Перед включением генератора установите минимальное выходное напряжение.
5. Установите напряжение сигнала генератора, значение которого указано на установке, *в течение всего эксперимента поддерживайте его постоянным.*
6. Определите по микромультиметру действующее значение силы тока и запишите в **таблицу 2**.
7. Изменяя частоту от начального до конечного значений, указанных на установке, с заданным шагом, измеряйте соответствующее каждому состоянию значение силы тока; результаты заносите в **таблицу 2**.

Таблица 2. Исследование емкостного сопротивления.

№ точки	ν , Гц	ω , с ⁻¹	I , А	X_C , Ом	$1/X_C$, Ом ⁻¹
1					
2					
.					
.					
.					

8. Установите в соответствующие гнезда в схеме вместо перемычки – резистор R , а вместо конденсатора – катушку индуктивности.

9. Повторите действия аналогичные пп. 3-7. Значения силы тока записывайте в **таблицу 3**.

Таблица 3. Исследование индуктивного сопротивления.

№ точки	ν , Гц	ω , с ⁻¹	I , А	Z_L , Ом
1				
2				
.				
.				
.				
10				

Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте значения циклической частоты ω для всех значений частоты ν : $\omega = 2\pi\nu$ и запишите в таблицы 2 и 3.
2. Рассчитайте значения X_C и Z_L , используя формулы (4) и (8) по действующим значениям силы тока и напряжения. Результаты запишите в таблицы 2 и 3.
3. По данным таблиц постройте два отдельных графика зависимости реактивных сопротивлений от циклической частоты ω .
4. Сделайте вывод о характере этих зависимостей, сравнив с теоретическими.
5. Определите значение емкости конденсатора при значении частоты, указанном учителем, по формуле:

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{I}{2\pi U}.$$

6. Рассчитайте погрешности измерения емкости конденсатора по формулам:

$$\delta C = \sqrt{(\delta \nu)^2 + (\delta U)^2 + (\delta I)^2}, \quad \Delta C = C \cdot \delta C.$$

Запишите значение ёмкости в виде доверительного интервала.

7. Рассчитайте значения обратных величин $1/X_C$, запишите в таблицу 3. По данным таблицы постройте график зависимости $1/X_C = C\omega$ от циклической частоты ω . Сделайте вывод о характере этой зависимости.
8. Определите значение емкости C , как тангенс угла наклона прямой линии графика $1/X_C = f(\omega)$ к оси ω . Результат запишите в протокол, сравните с полученным в п. 5.

***Определение активной (R_L) и реактивной (X_L) составляющих индуктивного сопротивления Z_L .**

Из формулы (5) следует: $Z^2 = R^2 + L^2 \omega^2$, то есть зависимость $Z^2 = f(\omega^2)$ – линейная; график этой зависимости показан на рис. 7. Линия графика пересекает ось ординат в точке, ордината которой равна R_L^2 . Тангенс угла наклона прямой к оси ω^2 равен L^2 .

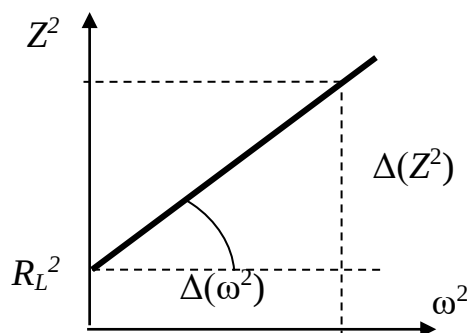


Рис. 7

9. * Рассчитайте и занесите в **таблицу 4** пять-шесть значений из **таблицы 3** по указанию учителя.

*** Таблица 4.** Определение R_L и X_L

№ точки	ω , с ⁻¹	ω^2 , с ⁻²	Z^2 , Ом ²	X_L , Ом

10. * По данным таблицы 4 постройте график зависимости Z^2 от квадрата циклической частоты ω^2 .
11. * По графику, руководствуясь рисунком 7, определите значение R_L и запишите в протокол.
12. * По графику, руководствуясь рисунком 7, определите значение индуктивности: $L = \sqrt{\frac{\Delta Z^2}{\Delta \omega^2}}$ (ΔZ^2 , $\Delta \omega^2$ – величины соответствующих отрезков, определенные из графика) и запишите в протокол.
13. * Рассчитайте значения X_L по формуле (5), занесите в таблицу 4 и постройте график зависимости X_L от ω . Сравните его с теоретическим и сделайте вывод.

Литература

1. П/ред. Пинского А.А. “Физика –11”, М., Просвещение, 1995. §§ 4–8.
2. Мякишев Т.Я., Синяков А.З., Слободсков Б.А. “Физика -11. Колебания и волны”, М., Дрофа, 2002 §§ 2.4–2.9.

Контрольные вопросы

1. Что такое фаза колебания?
2. По какому закону меняется сила переменного тока? Почему можно считать, что во всех элементах последовательной цепи колебания силы тока совпадают по фазе?
3. Каково соотношение между фазами колебаний силы тока и напряжения на идеальной катушке индуктивности?
4. Каково соотношение между фазами колебаний силы тока и напряжения на конденсаторе в цепи переменного тока?
5. Запишите закон Ома для цепи переменного тока с а) резистором, б) конденсатором, в) катушкой индуктивности.
6. Запишите закон Ома для цепи переменного тока с последовательным соединением резистора, конденсатора и катушки индуктивности.
7. От чего и как зависит индуктивное сопротивление?
8. От чего и как зависит емкостное сопротивление?
9. Как по результатам работы определить значение емкости конденсатора?
- 10.*Как по результатам работы определить значение индуктивности катушки?
- 11.*Как по результатам работы определить значение активного сопротивления катушки?
12. Чем отличается реактивное сопротивление от активного?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы

- исследование зависимости амплитуды переменного тока от частоты;
- определение резонансной частоты колебательного контура;
- определение значений индуктивности катушки и емкости конденсатора;

– *построение векторных диаграмм напряжений при различных частотах.

Теоретические основы работы

Рассмотрим последовательную электрическую цепь, состоящую из резистора, катушки индуктивности и конденсатора, подключенных к генератору переменного напряжения (рис.1).

Амплитудное значение силы тока можно рассчитать по закону Ома для цепи переменного тока $I_m = \frac{U_m}{Z}$,

где $Z = \sqrt{(X_L - X_C)^2 + R^2}$ – полное сопротивление переменному току,

R – активное сопротивление,

$X_C = 1/\omega C$ – емкостное, сопротивление,

$X_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление.

Таким образом, полное сопротивление переменному току зависит не только от параметров элементов цепи R, L, C , но и от частоты переменного напряжения $\omega = 2\pi\nu$. На низких частотах X_C велико, а X_L мало. При некотором значении частоты ω_p

$X_C - X_L = 0$, полное сопротивление переменному току принимает минимальное значение, амплитуда колебаний силы тока становится максимальной. При дальнейшем увеличении частоты напряжения растет индуктивное сопротивление X_L , амплитуда колебаний силы тока уменьшается (рис.2).

Явление возрастания амплитуды силы тока при некотором значении частоты вынуждающей ЭДС называют *резонансом* в цепи переменного тока, а циклическую частоту вынужденных колебаний, при которой наблюдается это явление $\omega_p = 2\pi\nu_p$ – *резонансной частотой*. Так как при резонансе $X_C = X_L$,

$$\text{то } \omega_p L = \frac{1}{\omega_p C} \Rightarrow \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 \quad (1),$$

то есть резонансная частота равна частоте свободных колебаний, – собственной частоте колебательного контура при малом активном сопротивлении. Соответствующая частота колебаний ЭДС определяется формулой:

$$\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

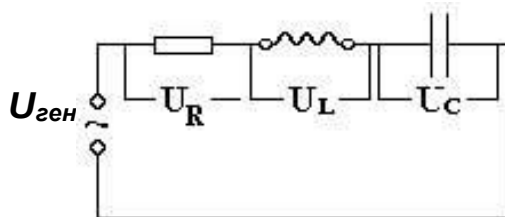


Рис.1

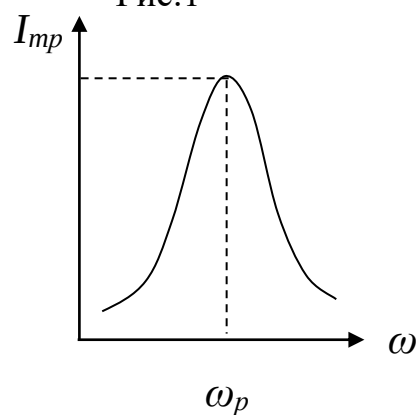


Рис.2

*Соотношения между амплитудами и фазами напряжений в цепи переменного тока удобно анализировать с помощью метода векторных диаграмм. Для последовательной цепи справедливо:

$$\vec{U}_{m\text{ген}} = \vec{U}_{mR} + \vec{U}_{mC} + \vec{U}_{mL},$$

где вектор $\vec{U}_{mR}$ совпадает по фазе с вектором $\vec{I}_m$. (Рис.3)

При резонансе, когда $X_C = X_L$ амплитуды напряжений на индуктивном и емкостном сопротивлениях одинаковы по величине и противоположны по фазе $\vec{U}_{mL} = -\vec{U}_{mC}$. В этом случае напряжение генератора совпадает по фазе с током в цепи и равно напряжению на активном сопротивлении.

Резонанс в цепи переменного тока при последовательном соединении ее элементов называют резонансом напряжений.

Описание установки

Принципиальная схема установки показана на рис. 1. Рабочая лабораторная установка схематически представлена на рис.4. Основой установки служит лабораторный модуль, внутри которого смонтированы провода. Узловые точки схемы выведены на панель в виде контактных гнёзд, к

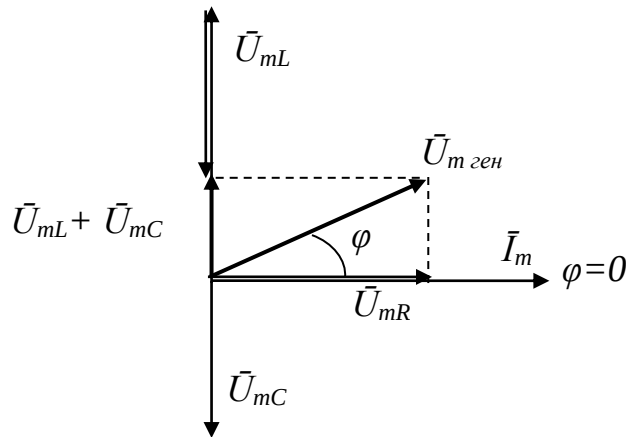


Рис.3

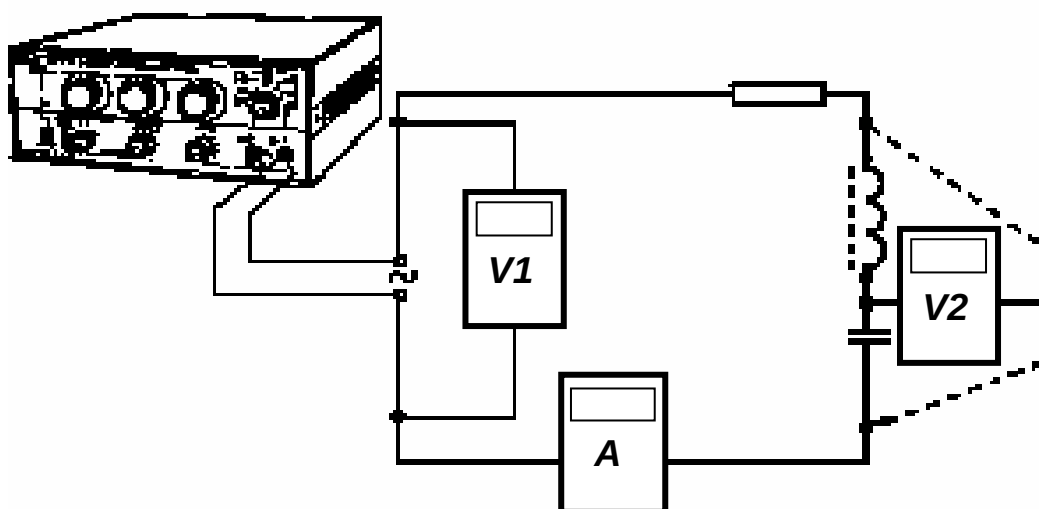


Рис.4

которым присоединены элементы схемы: генератор переменного тока низкой частоты, сопротивление R , катушка индуктивности L и конденса-

тор C . Для измерения силы тока и напряжения используются микромультиметры.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов.

Таблица 1. Спецификация измерительных приборов.

№ п/п	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность средства измерений
1	мультиметр V1	напряжение генератора			
2	мультиметр V2	напряжение на или			
3	мультиметр А	сила тока			
4	Генератор низкой частоты	Частота переменного тока			

2. Соберите схему установки, вставьте в соответствующие гнезда элемент “Конденсатор известной емкости”.
3. Установите пределы измерительных приборов согласно данным спецификации.
4. Перед включением источника питания установите нулевое выходное напряжение.
5. Включите источник питания и установите выходное напряжение генератора, значение которого указано на установке. *Поддерживайте это напряжение постоянным в течение всего эксперимента.*
6. Установите начальную частоту генератора согласно значению, указанному на установке.
7. Измерьте значения силы тока, напряжения на катушке и напряжения на конденсаторе, переключая один из контактов микромультиметра V2. Запишите результаты в первую строку **таблицы 2**.
8. Изменяя частоту генератора в интервале, указанном на установке с соответствующим шагом, записывайте в **таблицу 2** значения силы тока, и напряжений, соответствующие каждому значению частоты.
9. Замените элемент “Конденсатор известной емкости” на элемент “Конденсатор неизвестной емкости” и повторите выполнение пунктов 6 - 8. Заполните **таблицу 3** аналогичную **таблице 2**.

Таблица 2. Результаты измерений напряжений и силы тока при разных частотах с конденсатором емкостью $C =$ мкФ.

№	ν , Гц	I , мА	U_L , В	U_C , В
1				
2				
.				
.				
20				

Таблица 3. Результаты измерений напряжений и силы тока при разных частотах с конденсатором неизвестной емкости

№	ν , Гц	I , мА	U_L , В	U_C , В
1				
2				
.				
.				
20				

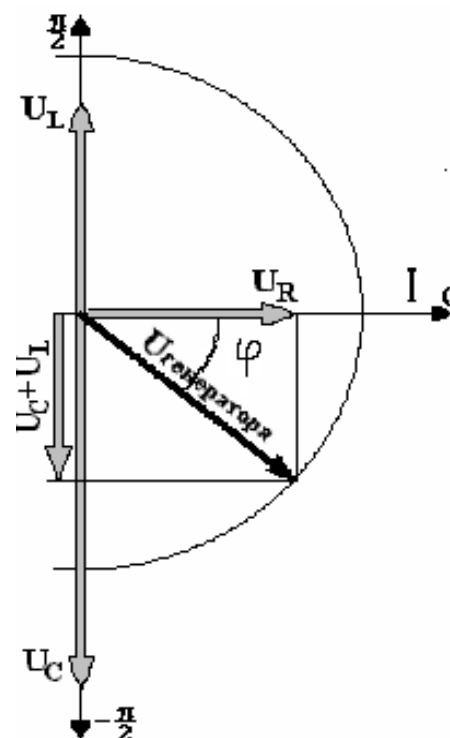
Обработка результатов измерений

1. Постройте графики зависимости силы тока от частоты для обеих емкостей на одной координатной сетке. Сделайте вывод о наличии явления резонанса.
2. Определите по графикам резонансные частоты ν_{01} и ν_{02} , запишите в протокол.
3. Определите индуктивность катушки L , используя формулу (2) и значение резонансной частоты ν_{01} .
4. Определите значение неизвестной емкости, сопоставив значения резонансных частот по формуле (2):

$$\frac{\nu_{01}^2}{\nu_{02}^2} = \frac{2\pi L C_2}{2\pi L C_1} \Rightarrow C_2 = C_1 \frac{\nu_{01}^2}{\nu_{02}^2}$$

5. *Постройте векторные диаграммы действующих значений напряжений для двух значений частот (по указанию учителя) ($\nu_1 < \nu_{01}$ и $\nu_2 > \nu_{01}$) (пример приведён на рисунке). Последовательность действий:

а) отложить от начала координат в выбран-



ном масштабе векторы $\vec{U}_L$ и $\vec{U}_C$ с учетом сдвига по фазе по отношению к току;

б) построить векторную сумму $\vec{U}_C + \vec{U}_L$;

в) провести дугу окружности радиусом $U_{ген}$ в том же масштабе;

г) провести горизонтальную прямую через конец вектора суммы $\vec{U}_C + \vec{U}_L$ до пересечения с дугой окружности;

д) соединить начало координат с этой точкой пересечения, – получим вектор напряжения генератора $\vec{U}_{ген}$;

е) провести вертикальную прямую через конец вектора напряжения генератора $\vec{U}_{ген}$; до пересечения с линией тока, – получим вектор напряжения на активном сопротивлении;

ж) по чертежу рассчитать $\cos\varphi$ и угол φ , определяющий разность фаз между током в цепи и напряжением генератора (ток совпадает по фазе с напряжением на активном сопротивлении).

6.*Для каждой векторной диаграммы рассчитайте величину активного сопротивления ($R = U_R/I$); результаты сравните.

7. *Сопоставьте сдвиги фаз напряжения генератора относительно тока при частотах больше и меньше резонансной. Сделайте вывод.

Литература.

1. Пинский А.А. «Физика-11», М., Просвещение, 1995 г. §§4-9.

2. Мякишев Т.Я., Синяков А.З., Слободсков Б.А.

«Физика -11. Колебания и волны», М., Дрофа, 2002 §§ 2.4–2.11.

Контрольные вопросы

1. Почему амплитуда переменного тока в LCR-цепи зависит от частоты?
2. По какому закону меняется сила переменного тока?
3. В чем заключается явление резонанса?
4. При каком условии наблюдается резонанс напряжений? Чем определяется значение резонансной частоты?
5. От чего зависит вид резонансной кривой?
6. Что такое фаза колебания?
7. Каково соотношение между фазами колебаний силы тока и напряжения на идеальной катушке индуктивности?
8. Каково соотношение между фазами колебаний силы тока и напряжения на конденсаторе в цепи переменного тока?
9. Как найти полное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора, конденсатора и катушки индуктивности?

10. Запишите закон Ома для действующих значений силы тока и напряжения цепи переменного тока, состоящей из последовательно соединенных резистора, конденсатора и катушки индуктивности.
11. Каково соотношение между фазами колебаний силы тока и напряжения источника в последовательной LCR -цепи при резонансе?
12. На чем основан метод векторных диаграмм?
13. В чем состоит метод векторных диаграмм?
14. Постройте векторную диаграмму для изучаемой цепи при резонансе.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

Шаблон отчета по лабораторной работе

Вводная лабораторная работа

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Таблица 1

Спецификация измерительных приборов

Название прибора и его тип	Предел измерения	Цена деления	Инструментальная погрешность

Число π $\pi = 3,14159$ $\Delta\pi = 0,000005$ $\delta\pi = 1,5 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2

Результаты измерений линейных размеров

Высота груза h , мм	Длина нити l_n , мм	Длина маятника l , мм

Таблица 3

Результаты измерений времени τ пяти полных колебаний

№ опыта	τ_i , с	$ \tau_i - \bar{\tau} $, с	$ \tau_i - \bar{\tau} ^2$, с ²
1			
2			
3			
4			
5			
$\tau_{\text{сред}}, \text{с}$			

Обработка результатов измерений

1. Длина маятника l :

$$l = l_n + h/2 = \quad \text{м}$$

2. Среднее время пяти полных колебаний:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum \tau_i}{5} = \quad \text{с}$$

3. Период колебаний математического маятника:

$$T = \frac{\bar{\tau}}{5} = \quad \text{с}$$

4. Экспериментальное значение ускорения свободного падения (косвенное измерение):

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} = \quad \text{м/с}^2$$

Расчет погрешностей прямых измерений

1. Расчет случайной погрешности для среднего времени пяти полных колебаний:

$$\Delta\tau_{\text{сл}} = t_{0,95,n} \sqrt{\frac{\sum (\bar{\tau} - \tau_i)^2}{n(n-1)}} = \quad \text{с}$$

2. Расчет абсолютной погрешности для среднего времени пяти полных колебаний:

$$\Delta\tau = \sqrt{\Delta\tau_{\text{пр}}^2 + \Delta\tau_{\text{сл}}^2} = \quad \text{с}$$

3. Расчет относительной погрешности для среднего времени пяти полных колебаний:

$$\delta\tau = \frac{\Delta\tau}{\tau} =$$

4. Расчет абсолютной погрешности длины математического маятника:

$$\Delta l_{\text{н}} = \quad \text{м}, \Delta h = \quad \text{м},$$

$$\Delta l = \sqrt{\Delta l_{\text{н}}^2 + \frac{1}{4} \Delta h^2} = \quad \text{м}$$

5. Расчет относительной погрешности длины математического маятника:

$$\delta l = \frac{\Delta l}{l} =$$

Расчет погрешности косвенных измерений

1. Относительная погрешность экспериментального значения ускорения свободного падения:

$$\delta g = \sqrt{(\delta l)^2 + 4(\delta\tau)^2 + 4(\delta\pi)^2}$$

$$\text{т.к. } \delta\pi \ll \delta\tau, \delta g = \sqrt{(\delta l)^2 + 4(\delta\tau)^2} =$$

2. Абсолютная погрешность экспериментального значения ускорения свободного падения:

$$\Delta g = g \cdot \delta g = \quad \text{м/с}^2$$

Ответ:

$$\tau = \bar{\tau} \pm \Delta\tau = \quad \text{с}$$

$$g = \bar{g} \pm \Delta g = \quad \text{м/с}^2$$