

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Омский государственный университет путей сообщения

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, МАГНЕТИЗМУ И КОЛЕБАНИЯМ

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний
к лабораторным работам по физике

Омск 2014

УДК 53(076.5)
ББК 22.33я7
Э45

Лабораторный практикум по электричеству, магнетизму и колебаниям: Методические указания к лабораторным работам по физике / С. В. Вознюк, И. А. Дроздова, В. А. Исаков, С. Н. Крохин, А. Л. Литневский, В. П. Нестеров, Н. В. Покраса; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2014. 43 с.

Методические указания составлены в соответствии с программой курса общей физики для технических вузов и содержат описание семи лабораторных работ, посвященных изучению движения заряженных частиц в электростатическом и магнитном полях, правил графического построения электрических полей с помощью эквипотенциальных и силовых линий, определению магнитной индукции полей и основных характеристик ферромагнетиков, а также изучению процессов колебаний. Сформулированы задания, представлены порядок выполнения лабораторных работ и оформление результатов. В приложениях приведены дополнительные практические задания, предназначенные для наиболее успевающих студентов, правила вычисления погрешностей при прямых и косвенных измерениях, таблица простейших производных, справочные данные.

Предназначены для студентов первого курса всех факультетов очной формы обучения.

Библиогр.: 6 назв. Табл. 14. Рис. 15. Прил. 4.

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор В. А. Нехаев;
доктор физ.-мат. наук, доцент Г. И. Косенко.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Лабораторная работа 1. Движение электронов в электрических полях.....	6
Лабораторная работа 2. Изучение электрических полей.....	9
Лабораторная работа 3. Электрические цепи постоянного тока	12
Лабораторная работа 4. Измерение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли	15
Лабораторная работа 5. Явление гистерезиса в ферромагнетиках.....	17
Лабораторная работа 6. Изучение затухающих механических колебаний	21
Лабораторная работа 7. Вынужденные электрические колебания	22
Библиографический список.....	26
Приложение 1. Дополнительные практические задания.....	27
Приложение 2. Правила вычисления погрешностей.....	36
Приложение 3. Правила дифференцирования и таблица производных.....	40
Приложение 4. Справочные данные.....	42

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум курса физики в вузе является необходимой составляющей изучения этой интереснейшей науки, без него невозможно достичь глубокого понимания сути физических явлений и физических закономерностей. Выполнение лабораторных работ по физике является обязательным элементом учебного плана и помогает детально на практике ознакомиться с физическими явлениями, приборами, а также изучить основные методы физических измерений и оценки их результатов.

При подготовке к лабораторным занятиям необходимо заранее (в часы, отведенные для самостоятельной работы) повторить теоретический материал к лабораторной работе по учебнику и конспекту лекций, а также ознакомиться с порядком ее проведения по методическим указаниям.

При этом в рабочую тетрадь (дневник) необходимо вписать следующее:

- 1) название работы, цель исследования и перечень приборов и принадлежностей, используемых в работе;
- 2) начертить схему установки или ее рисунок;
- 3) рабочую формулу с расшифровкой входящих в нее величин и формулы расчета погрешностей;
- 4) таблицы для записи результатов измерений.

Получив допуск к выполнению лабораторной работы, необходимо ознакомиться с принципом действия приборов, собрать схему установки и после проверки схемы преподавателем приступить к эксперименту. Полученные результаты заносятся в таблицы, которые проверяются и визируются преподавателем.

По результатам измерений необходимо выполнить указанные в задании к работе расчеты и записать в рабочую тетрадь

расчет искомых величин и их погрешностей (в случае необходимости результаты эксперимента приводятся в виде графиков);

вывод (краткий анализ полученных результатов и погрешностей, сравнение их с табличными значениями).

Более подробно порядок выполнения лабораторной работы приведен в описании каждой работы.

Полное оформление результатов лабораторной работы должно быть выполнено не позднее чем к следующему лабораторному занятию. Результаты работы необходимо будет защитить на следующем или на специально предназначенном для защиты работ занятии. При этом надо быть готовым ответить на контрольные вопросы:

- 1) Как в лабораторной работе достигается поставленная цель?
- 2) Пояснить расчет погрешностей в лабораторной работе.
- 3) Проанализировать полученные результаты.
- 4) Сформулировать определения физических величин и физических законов, используемых в лабораторной работе.

Кроме описания обязательных для выполнения лабораторных работ в данных методических указаниях в приложениях приведены дополнительные практические задания (прил. 1), предназначенные для наиболее успевающих студентов, а также правила вычисления погрешностей при прямых и косвенных измерениях (прил. 2), таблица простейших производных (прил. 3), справочные данные (прил. 4), которые будут полезны при подготовке отчетов по лабораторным работам.

Методические указания полностью соответствуют учебным планам «третьего поколения», помогают реализовать компетентностный подход в обучении по физике.

Лабораторная работа 1

ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Ц е л ь р а б о т ы: изучить принцип работы электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) с электростатическим отклонением электронного луча и провести простейшие расчеты, связанные с движением электронов в продольном и поперечном электрических полях.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: электронный осциллограф, выпрямитель (источник постоянного напряжения), вольтметр.

1.1. Описание лабораторной установки

В лабораторной работе используется осциллографическая трубка с электростатическим отклонением электронного луча.

Рассмотрим случай, когда постоянное ускоряющее напряжение подается только на первый ускоряющий анод A_1 , а отклонение электронного луча от центра трубки находится в пределах экрана. На вертикально отклоняющие пластины Π_y подается небольшое постоянное напряжение, а напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах Π_x отсутствует.

С помощью рис.1.1 можно наглядно представить физические процессы, происходящие при движении электронов в ЭЛТ.

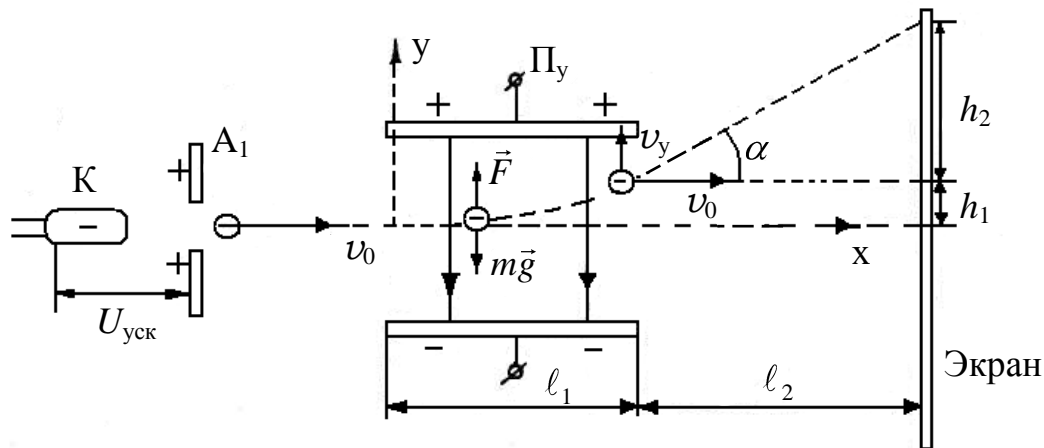


Рис. 1.1. Схема движения электронов в осциллографической трубке

На участке между катодом К и анодом А₁ создается продольное электрическое поле, которое ускоряет электроны, вылетающие из катода. Работа ускоряющего электрического поля идет на увеличение кинетической энергии электронов, которые движутся вдоль оси трубки к экрану:

$$|q_e| U_{\text{уск}} = \frac{m_e v_0^2}{2}, \quad (1.1)$$

где m_e и q_e – масса и заряд электрона, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг; $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $U_{\text{уск}}$ – ускоряющее постоянное напряжение между катодом К и анодом А₁; v_0 – модуль скорости электрона непосредственно за анодом А₁.

Между вертикально отклоняющими пластинами П_y создается однородное электрическое поле. Это поле отклоняет электроны к положительно заряженной пластине, и они начинают двигаться по параболе с ускорением a , направленным вертикально вверх (рис.1.1).

Смещение электронов от оси трубки при прохождении пластин П_y

$$h_1 = a \frac{t_1^2}{2} = \frac{|q_e| U}{m_e d} \cdot \frac{t_1^2}{2}, \quad (1.2)$$

где U – напряжение между пластинами П_y; d – расстояние между ними.

Время движения электронов t_1 между пластинами П_y длиной l_1 определяется по уравнению:

$$l_1 = v_0 t_1. \quad (1.3)$$

После прохождения пластин Π_y электроны движутся по инерции, при этом дополнительное смещение

$$h_2 = v_y t_2 = at_1 \frac{l_2}{v_0}, \quad (1.4)$$

где l_2 – расстояние от пластин Π_y до экрана.

Полное смещение электронов от оси трубки

$$h = h_1 + h_2. \quad (1.5)$$

1.2. Задание

Получить расчетную формулу для вычисления полного смещения электронов от оси трубки и провести необходимые вычисления.

Измерить значение смещения электронного пятна на экране осциллографа при данном значении отклоняющего напряжения U и сравнить его с расчетным.

1.3. Порядок выполнения работы

1) Изучить устройство ЭЛТ осциллографа и физические процессы, происходящие в ней.

2) Записать параметры ЭЛТ: $U_{\text{уск}} = 1500$ В, $l_1 = 50$ мм, $l_2 = 15$ см, $d = 3$ мм.

3) Вывести формулу для смещения электронов от оси трубки h .

4) Рассчитать величину h при значении постоянного напряжения U , взятом из табл. 1.1. Номер варианта равен порядковому номеру фамилии студента в списке подгруппы у преподавателя.

Таблица 1.1

Данные для расчета смещения h

Напряжение	Вариант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
U , В	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38

5) Подать с выпрямителя на вертикально отклоняющие пластины осциллографа постоянное напряжение U , соответствующее напряжению, указанному в подразд. 1.3 п. 4, измерить и записать в тетрадь это напряжение и соответствующее значение смещения h электронного пятна от центра на экране осциллографа.

б) Сравнить полученное экспериментальное и теоретическое значения смещения и сделать вывод.

1.4. Контрольные вопросы

1) Устройство и принцип действия ЭЛТ.

2) Характер движения электронов в ЭЛТ при условии, что постоянное или переменное напряжение на отклоняющих пластинах а) отсутствует; б) есть только на вертикально отклоняющих пластинах; в) есть только на горизонтально отклоняющих пластинах; г) одинаково на вертикально и горизонтально отклоняющих пластинах.

1.5. Дополнительное задание

Сравнить силу тяжести электрона и силу, с которой электрическое поле вертикально отклоняющих пластин Π_y действует на электрон, т. е. вычислить отношение $F_e/m_e g$ по формуле:

$$\frac{F_e}{m_e g} = \frac{|q_e| U}{d m_e g}. \quad (1.6)$$

Лабораторная работа 2

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Цель работы: исследовать конфигурацию электрических полей и определить основные характеристики электрического поля.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: электрическая ванна, осциллограф, источник питания, вольтметр, замкнутый проводящий контур.

2.1. Описание лабораторной установки

Электростатическое поле в данной лабораторной работе моделируется полем переменного электрического тока, так как оба поля являются потенциальными и распределение потенциалов в данных полях будет одинаковым.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.1.

В ванночку из пластмассы, заполненную слабо проводящей жидкостью (водой), помещают два металлических электрода в виде плоских пластин. От источника питания на них подают переменное напряжение.

Для измерения потенциалов в различных точках проводящей среды берут два небольших проводника (зонда) в виде коротких металлических стержней, присоединенных к зажимам вольтметра (В). Один зонд заземляют или подсоединяют к любому электроду в ванне, другой помещают в разные точки проводящей среды и определяют последовательно координаты точек одинакового потенциала для построения эквипотенциальной линии.

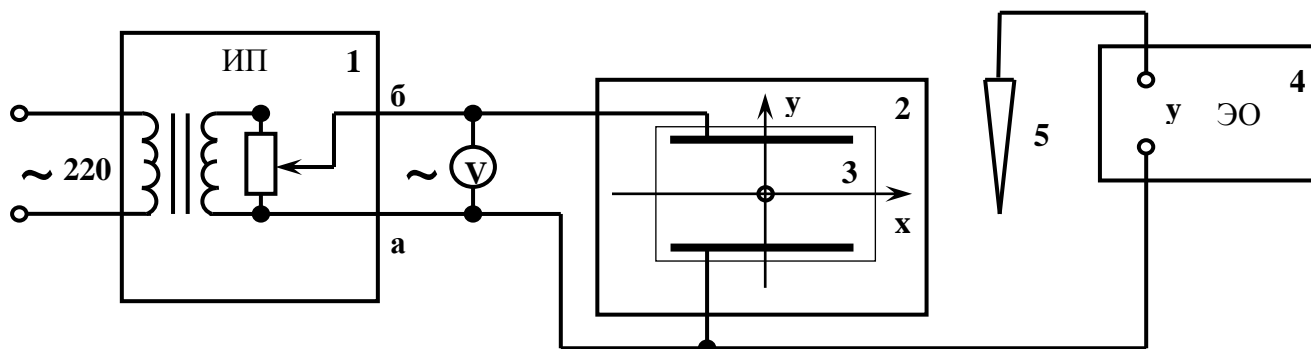


Рис. 2.1. Схема установки для моделирования электростатического поля:
1 – источник питания (ИП); 2 – электролитическая ванна; 3 – плоскопараллельные пластины, закрепленные на органическом стекле с координатной сеткой;
4 – электронный осциллограф (ЭО); 5 – щуп

Перемещая зонд, аналогичным способом определяют координаты точек следующей эквипотенциальной линии с другим значением потенциала и т. д. Распределение эквипотенциальных линий в ванне будет зависеть от формы и взаимного расположения электродов и замкнутого проводящего контура (кольца, квадрата, треугольника и т. д.).

2.2. Задание

Найти и построить эквипотенциальные и силовые линии электрического поля между электродами произвольной формы и определить напряженность и потенциал электрического поля в заданной точке N по формулам:

$$E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}, \quad (2.1)$$

где $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_{i+1}$ – разность потенциалов между двумя соседними эквипотенциальными линиями; $\Delta l = D_1 D_2$ – кратчайшее расстояние между соседними эквипотенциальными линиями, проведенное через точку N;

$$\varphi_N = \varphi_i - |\vec{E}_N| n_1, \quad (2.2)$$

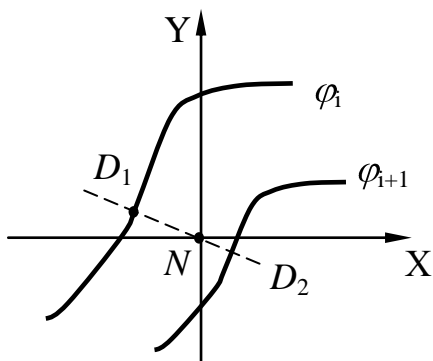


Рис. 2.2. Эквипотенциальные линии электрического поля

где n_1 – отрезок нормали D_1N , опущенной из данной точки поля (N) на эквипотенциальную линию с большим φ_i потенциалом (рис. 2.2.).

2.3. Порядок выполнения работы

1) Собрать электрическую цепь согласно схеме, приведенной на рис. 2.1.

2) Включить и подготовить к работе электронный осциллограф: для этого необходимо подключить зонд на вход к любому из

каналов ЭО, нажав соответственно кнопку «I» или «II» коммутатора; при этом генератор развертки выключить, нажав кнопку « \ominus X».

3) Коснуться зондом незаземленного электрода и, вращая ручку регулятора напряжения блока питания, установить напряжение между электродами по заданию преподавателя.

4) Ручкой грубой и плавной регулировки переключателя канала «V/дел» регулировки делителя входного напряжения осциллографа (ручка 6) довести длину световой полоски до восьми больших делений, что должно соответствовать максимально возможной длине световой полоски l_y в пределах экрана осциллографа.

5) Определить цену большого деления осциллографа, разделив значение напряжения между электродами на восемь.

6) На заготовленной ранее координатной сетке, выполненной на бумаге формата А4, в масштабе 1:1 нанести расположение плоскопараллельных пластин; далее не изменяя разности потенциалов между пластинами, поместить между ними замкнутый проводящий контур, положение которого задает преподаватель, и начертить его на координатной сетке.

7) Разделив разность потенциалов между пластинами на восемь равных частей, построить семь эквипотенциальных линий от большего потенциала к меньшему с равным шагом (при их построении использовать не менее семи – восьми точек как в пространстве между пластинами, так и за их пределами).

8) Соединить полученные точки с одинаковым потенциалом плавной кривой, рядом указать значение соответствующего ей потенциала, начертить на полученной диаграмме шесть – восемь силовых линий.

9) Полученный результат подписать у преподавателя.

10) Для указанной преподавателем точки N электрического поля определить напряженность E и потенциал φ по формулам (2.1) и (2.2).

- 11) Выполнить математическую обработку результатов измерений.
- 12) Записать окончательный результат (с учетом правил округления).
- 13) Сделать вывод об однородности электростатического поля вблизи проводящих контуров и на большом расстоянии от них.

Лабораторная работа 3

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: приобрести практические навыки работы с простейшими электрическими схемами и изучить особенности электрических цепей постоянного тока при последовательном и параллельном соединении проводников.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: генератор постоянного напряжения, амперметр, вольтметр, два исследуемых резистора, соединительные провода.

3.1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из генератора (источника) постоянного напряжения, цифровых приборов – амперметра и вольтметра – и блока, на котором размещены резисторы R_{1x} и R_{2x} , сопротивления которых неизвестны. Схемы для последовательного или параллельного соединения резисторов R_{1x} и R_{2x} следует собирать самостоятельно при помощи соединительных проводников.

При сборке схем следует помнить о том, что вольтметр включается параллельно нагрузке, а амперметр – последовательно с нагрузкой. Внутреннее сопротивление генератора (источника) постоянного напряжения (блок ГН) следует выключить (кнопка $R_{ВН}$ отжата).

3.2. Задание

Собрать электрическую схему постоянного тока с резистором R_{1x} , а затем – с резистором R_{2x} . Измерить значения тока и напряжения в каждой схеме. По закону Ома для однородного участка цепи вычислить величину неизвестного сопротивления резистора по формуле:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (3.1)$$

где U – напряжение на концах резистора R ; I – сила тока, текущего через резистор R .

Собрать электрические схемы с последовательным, а затем – с параллельным соединением резисторов R_{1x} и R_{2x} . Измерить значения тока и напряжения в каждой схеме. По формуле (3.1) рассчитать сопротивление участков цепи с последовательным и с параллельным соединением двух резисторов R_{1x} и R_{2x} .

3.3. Порядок выполнения работы

1) Собрать электрическую схему (рис. 3.1) с резистором R_{1x} .

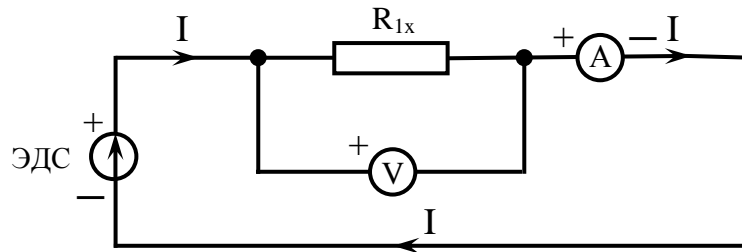


Рис. 3.1. Схема лабораторной установки при включении резистора R_{1x}

2) С помощью генератора (источника) установить некоторые значения ЭДС, чтобы напряжение на концах резистора R_{1x} было не менее 5 В (для повышения точности измерений). Измерить силу тока I , текущего через резистор R_{1x} .

3) Увеличивая напряжение U на резисторе R_{1x} через $(1 \div 2)$ В, провести не менее пяти опытов. Для каждого опыта измерять силу тока и напряжение. Результаты измерений записать в табл. 3.1.

4) В схеме (см. рис. 3.1) вместо резистора R_{1x} подсоединить резистор R_{2x} . Провести аналогичные действия для резистора R_{2x} , согласно п. 2 и 3. Результаты измерений записать в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.1

Результаты измерений
для резистора R_{1x}

Параметр	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
U , В					
I , А					
R_{1x} , Ом					
$\langle R_{1x} \rangle = \dots$ Ом					

Т а б л и ц а 3.2

Результаты измерений
для резистора R_{2x}

Параметр	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
U , В					
I , А					
R_{2x} , Ом					
$\langle R_{2x} \rangle = \dots$ Ом					

5) Собрать электрическую схему (рис. 3.2) с сопротивлениями R_{1x} и R_{2x} , соединенными последовательно.

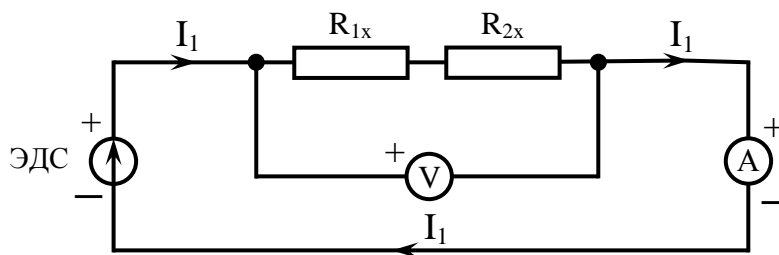


Рис. 3.2. Схема лабораторной установки при последовательном соединении резисторов R_{1x} и R_{2x}

6) Повторить операции, описанные в п. 2 и 3, для резистора R_{1x} . Результаты измерений записать в табл. 3.3.

7) Собрать электрическую схему (рис. 3.3) с сопротивлениями R_{1x} и R_{2x} , соединенными параллельно.

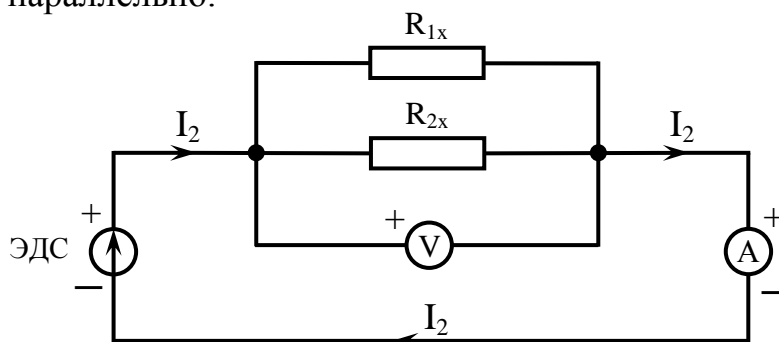


Рис. 3.3. Схема лабораторной установки при параллельном соединении резисторов R_{1x} и R_{2x} .

8) Повторить операции, описанные в п. 2 и 3, для резистора R_{1x} . Результаты измерений записать в табл. 3.4.

Т а б л и ц а 3.3

Результаты измерений
при последовательном соединении
резисторов R_{1x} и R_{2x}

Параметр	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
U , В					
I , А					
$R_{\text{посл}}$, Ом					
$\langle R_{\text{посл}} \rangle = \dots$ Ом					

Т а б л и ц а 3.4

Результаты измерений
при параллельном соединении
резисторов R_{1x} и R_{2x}

Параметр	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
U , В					
I , А					
$R_{\text{пар}}$, Ом					
$\langle R_{\text{пар}} \rangle = \dots$ Ом					

9) Провести оценочный (приблизительный) расчет сопротивлений R_{1x} , R_{2x} и их общих сопротивлений при последовательном и параллельном соединении по формуле (3.1). Результаты измерений и расчетов подписать у преподавателя.

10) Провести математическую обработку результатов измерений для резисторов R_{1x} , R_{2x} , $R_{\text{посл}}$ и $R_{\text{пар}}$. При этом следует учесть, что в данной работе такую обработку необходимо выполнять по *правилам обработки результатов косвенных измерений, если условия эксперимента невоспроизводимы* ([1], подразд. 3.2).

11) Записать окончательные результаты (с учетом правил округлений).

12) Вычислить общее сопротивление резисторов по формулам:

$$R_{\text{посл.}} = \langle R_{1x} \rangle + \langle R_{2x} \rangle; \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{\langle R_{1x} \rangle} + \frac{1}{\langle R_{2x} \rangle}. \quad (3.3)$$

Сравнить результаты расчетов с экспериментальными измерениями $\langle R_{\text{посл}} \rangle$ и $\langle R_{\text{пар}} \rangle$ соответственно.

13) Сделать выводы по результатам работы.

Лабораторная работа 4

ИЗМЕРЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы: изучить метод измерения слабых магнитных полей.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: экспериментальная установка, компас, линейка.

4.1. Описание установки

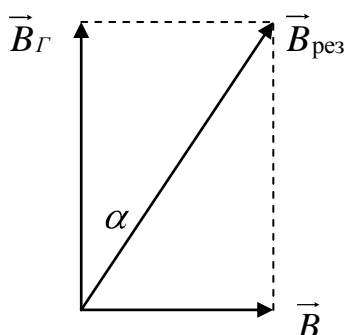


Рис. 4.1. Суперпозиция магнитных полей Земли и рамки с током

Экспериментальная установка представляет собой стенд, содержащий источник питания, многовитковую рамку, обмотанную медной проволокой, площадку, расположенную в центре рамки, для установки на ней компаса, миллиамперметр, переменный резистор для регулирования тока рамки, переключатели для выбора количества используемых витков рамки и направления тока в ней.

Экспериментальная установка позволяет создать магнитное поле, близкое по величине к полю

Земли. Величину магнитной индукции поля рамки можно вычислить по теоретическим формулам, измерив параметры рамки и силу тока, протекающего в ней. Если рамку расположить параллельно вектору магнитной индукции поля Земли и с ее помощью создать перпендикулярное магнитное поле, то по углу, на который отклонится магнитная стрелка компаса, расположенного в центре рамки, можно судить о величине магнитной индукции поля Земли.

4.2. Задание

Измерить геометрические параметры рамки (для круглой рамки – радиус R ; для прямоугольной – длину сторон a и b ; для рамки в виде равностороннего треугольника – длину стороны a), количество витков N и силу тока I в рамке, угол отклонения стрелки компаса α и вычислить величину горизонтальной составляющей вектора магнитной индукции поля Земли по формулам:

для круглой рамки –

$$B_r = \frac{\mu_0 IN}{2R \operatorname{tg} \alpha}; \quad (4.1)$$

для прямоугольной –

$$B_r = \frac{2\mu_0 IN \sqrt{a^2 + b^2}}{\pi ab \operatorname{tg} \alpha}; \quad (4.2)$$

для треугольной –

$$B_r = \frac{9\mu_0 IN}{2\pi a \operatorname{tg} \alpha}, \quad (4.3)$$

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

4.3. Порядок выполнения работы

1) Измерить геометрические размеры (радиус, длину сторон) и количество витков рамки. Результаты измерений и их инструментальные погрешности занести в рабочую тетрадь.

2) Расположить компас, являющийся индикатором магнитного поля, на подставке в центре рамки.

3) Установить по компасу рамку в плоскости магнитного меридиана, для чего следует поворачивать установку до тех пор, пока стрелка компаса не окажется параллельной плоскости рамки.

Т а б л и ц а 4.1

Результаты измерений и расчетов

№ п/п	Угол отклонения $<\alpha>$	Инстру- ментальная погрешность $\Delta\alpha$	Сила тока I , мА	Инстру- ментальная погрешность ΔI , мА	Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли B_H , мкТл
1					
2					
3					

4) Подключить источник питания к сети и включить его красной кнопкой.

5) Регулировкой силы тока добиться отклонения стрелки компаса на угол $\alpha_1 = 30^\circ$. Изменить переключателем направление тока в рамке на противоположное, не меняя силу тока. Определить угол поворота стрелки компаса α_2 .

Найти среднее значение угла поворота $<\alpha>$ стрелки компаса при данной силе тока и измерить величину силы тока в рамке. Результаты измерений и их инструментальные погрешности занести в табл. 4.1.

6) Выполнить операции, описанные в п. 5, для угла α_1 , равного 15 и 45° .

7) Сделать оценочный (приблизительный) расчет горизонтальной составляющей вектора магнитного поля Земли по формуле (4.1), (4.2) или (4.3) и результаты измерений и расчетов подписать у преподавателя.

8) Выполнить математическую обработку результатов измерений. При этом следует учесть, что в данной работе такую обработку необходимо выполнять по *правилам обработки результатов косвенных измерений, если условия эксперимента невозпроизводимы* ([1], подразд. 3.2).

9) Записать окончательный результат (с учетом правила округления).

10) Сравнить полученный результат с табличным ($B_{H\text{табл}} = 20$ мкТл) и сделать вывод.

Лабораторная работа 5

ЯВЛЕНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Цель работы: изучить процесс намагничивания ферромагнетиков с помощью осциллографа.

При б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: генератор переменного напряжения, осциллограф и блок, содержащий трансформатор с ферромагнитным сердечником и интегрирующую цепочку.

5.1. Описание установки

Лабораторная установка состоит из звукового генератора (ЗГ), осциллографа и блока, содержащего трансформатор с ферромагнитным сердечником и интегрирующую цепочку R_5C_4 . Из-за сложности схемы заранее произведена коммутация приборов соединительными проводами.

Схема лабораторной установки представлена на рис. 5.1.

На экране осциллографа получается изображение петли гистерезиса в ферромагнетиках.

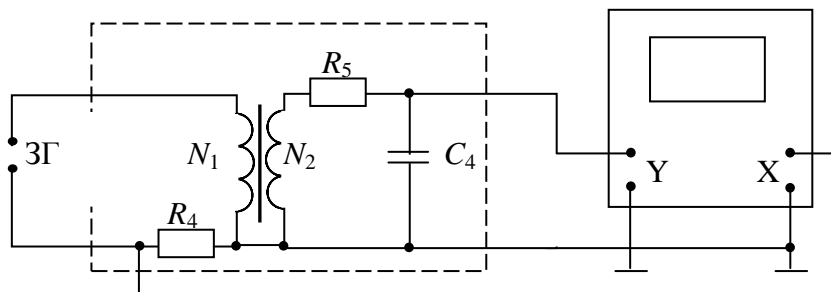


Рис. 5.1. Схема установки для изучения петли гистерезиса

5.2.Задание

Получить с помощью лабораторной установки параметры предельной петли гистерезиса и основной кривой намагничивания (рис. 5.2).

Построить графики основной кривой намагничивания и зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

Модуль напряженности намагничивающего поля вычислить по формуле:

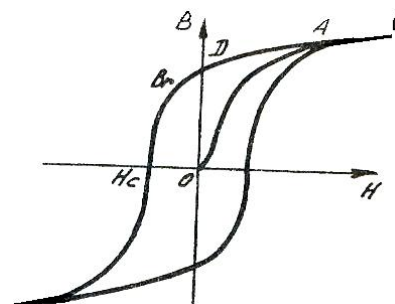


Рис. 5.2. Петля гистерезиса

$$H = \alpha X, \quad (5.1)$$

где α – постоянная, определяемая параметрами установки,

$$\alpha = \frac{k_x N_1}{R_4 l}; \quad (5.2)$$

X – координата луча на горизонтальной оси ОХ экрана осциллографа при условии, что начало координат находится в центре петли гистерезиса; k_x – коэффициент развертки по оси ОХ, В/дел.; N_1 – число витков в возбуждающей обмот-

ке; R_4 – сопротивление, на котором формируется напряжение, пропорциональное напряженности магнитного поля H ; l – длина средней линии ферромагнитного сердечника, на котором равномерно распределена первичная (намагничивающая) обмотка.

Модуль индукции магнитного поля в ферромагнетике вычислить по формуле:

$$B = \beta Y, \quad (5.3)$$

$$\beta = \frac{k_y R_5 C_4}{N_2 S}, \quad (5.4)$$

где Y – координата луча на вертикальной оси ОУ экрана осциллографа при условии, что начало координат находится в центре петли гистерезиса; k_y – коэффициент развертки по оси ОУ, В/дел.; N_2 – число витков в измерительной катушке; R_5 , C_4 – параметры интегрирующей цепочки, с помощью которой формируется напряжение, пропорциональное индукции магнитного поля B ; S – площадь поперечного сечения ферромагнитного образца (в лабораторной схеме – сердечника трансформатора).

Магнитную проницаемость вычислить по формуле:

$$\mu = \frac{B}{B_0} = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (5.5)$$

Вычислить коэрцитивную силу H_c и остаточную индукцию B_r по формулам (5.1) и (5.3).

5.3. Порядок выполнения работы

1) Проверить схему (см. рис. 5.1). Далее включить электронный осциллограф и звуковой генератор. Рекомендуемая частота колебаний напряжения, подаваемого с ЗГ, равна 30 – 60 Гц.

2) Установить максимальное напряжение ЗГ. Добиться устойчивого положения петли гистерезиса на экране ЭО, для чего на ЭО выключить развертку, нажав кнопку «х – о», и с помощью аттенюаторов канала У и ЗГ добиться, чтобы петля на экране имела участок насыщения и занимала бóльшую часть экрана. При этом ручка плавной регулировки аттенюатора канала У должна быть выведена в крайнее правое положение до щелчка. В дальнейшем положение аттенюатора канала У не менять до конца измерений. Записать коэффициент k_y по положению переключателя «V/дел.» аттенюатора канала У. Переключатель

скорости развертки 11 (рис. П.1.1) должен быть отжат в положение « $\times 0,2$ », что соответствует коэффициенту развертки по оси X $k_x = (5,3 \times 0,2) \text{ В/дел.} = 1,06 \text{ В/дел.}$

3) Расположить петлю гистерезиса симметрично относительно координатных осей. Для этого уменьшить напряжение ЗГ до нуля и установить получившуюся точку в начале координат.

4) Установить такое напряжение ЗГ, чтобы на экране осциллографа получилась петля гистерезиса с участком насыщения. При этом изображение петли должно занимать большую часть экрана. Зарисовать в тетрадь наблюдаемую петлю гистерезиса.

5) Уменьшить напряжение ЗГ до нуля. Постепенно увеличивая напряжение ЗГ до прежнего значения, измерить и записать в табл. 5.1 координаты X_i и Y_i вершины C положительной части петли (не менее 10 пар значений). Большую часть измерений следует выполнить для петель гистерезиса с наименьшими и наибольшими значениями X_i и Y_i . Результаты измерений записать в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Результаты измерений для определения величин H , B , μ

Номер п/п	Результаты измерений		Результаты расчетов		
	X_i , дел.	Y_i , дел.	H , А/м	B , Тл	μ

6) Сделать оценочный (приблизительный) расчет напряженности и магнитной индукции по формулам (5.1) и (5.3) и магнитной проницаемости ферромагнетика по формуле (5.5) и результат подписать у преподавателя. Предварительно следует вычислить постоянные коэффициенты α и β по формулам (5.2) и (5.4). Параметры установки приведены на ее лицевой панели.

7) Рассчитать значения H , B и магнитной проницаемости μ по формулам (5.1), (5.3) и (5.5) для каждой пары значений X_i и Y_i . Полученные значения H , B и μ записать в табл. 5.1.

8) Построить графики зависимостей $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$ один под другим с одинаковым масштабом для H .

9) Рассчитать коэрцитивную силу H_c и остаточную индукцию B_r по формулам (5.1) и (5.3). Выполнить математическую обработку результатов измерений.

10) Записать окончательные результаты (с учетом правил округления).

11) Сделать выводы.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Ц е л ь р а б о т ы: измерить основные характеристики затухающих колебаний осциллятора.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: математический или физический маятник, линейка, секундомер.

6.1. Описание установки

Экспериментальная установка представляет собой математический или физический маятник, совершающий слабозатухающие колебания. Амплитуду колебания можно измерить с помощью линейки, время колебания – секундомером.

6.2. Задание

Измерить начальную амплитуду колебаний A_0 , запустить маятник и по истечении N полных колебаний измерить время t и амплитуду колебания $A(t)$ к этому моменту времени и вычислить

период затухающих колебаний по формуле

$$T = t/N; \quad (6.1)$$

коэффициент затухания

$$\beta = \frac{1}{t} \ln \frac{A_0}{A(t)}; \quad (6.2)$$

логарифмический декремент затухания

$$\Lambda = \frac{1}{N} \ln \frac{A_0}{A(t)}; \quad (6.3)$$

добротность осциллятора (в случае слабого затухания)

$$Q \approx \frac{\pi}{\Lambda}. \quad (6.4)$$

6.3. Порядок выполнения работы

1) Определить на линейке начало отсчета амплитуды x_0 (если есть возможность, установить на нулевой отметке) и занести его в табл. 6.1.

Т а б л и ц а 6. 1

Результаты измерений

x_0 , мм	x_1 , мм	Δx , мм	A_0 , мм	N	t , с	Δt , с	x_2 , мм	$A(t)$, мм

2) Отклонить маятник на небольшое расстояние от положения равновесия x_1 (угол отклонения нити от положения равновесия установить не более 10°) и занести x_1 в табл. 6.1.

3) Отпустить маятник, включить секундомер и по завершении N -го колебания (значение N задает преподаватель) измерить время t и отклонение маятника от положения равновесия x_2 . Данные измерений и их инструментальные погрешности занести в табл. 6.1.

4) Вычислить значения начальной амплитуды $A_0 = x_1 - x_0$ и амплитуды N -го колебания $A(t) = x_2 - x_0$ и занести их в табл. 6.1.

5) Провести многократные измерения.

6) Сделать оценочный (приблизительный) расчет периода, коэффициента затухания, логарифмического декремента затухания и добротности затухающих колебаний по формулам (6.1) – (6.4) и результат подписать у преподавателя.

7) Выполнить математическую обработку результатов измерений.

8) Записать окончательные результаты (с учетом правил округления).

9) Проверить выполнимость соотношения $\Lambda = \beta T$ и сделать вывод.

Лабораторная работа 7

ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Ц е л ь р а б о т ы: изучить явление резонанса в электрическом колебательном контуре.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: электрический колебательный контур, электронный осциллограф, генератор гармонических сигналов.

7.1. Описание установки

Лабораторная установка включает в себя последовательный электрический колебательный контур, генератор гармонических сигналов ЗГ и электронный осциллограф ЭО (рис. 7.1).

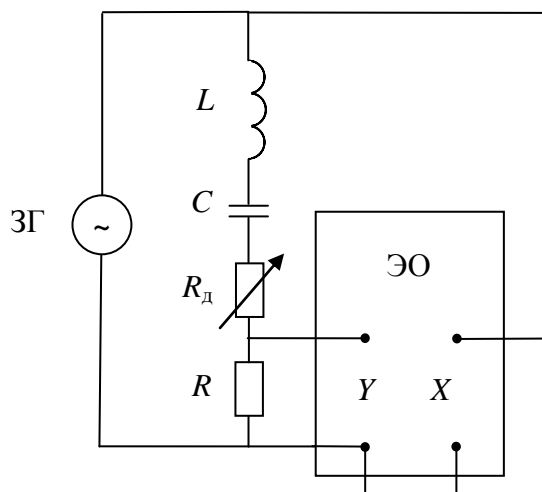


Рис. 7.1. Схема установки для изучения электрических колебаний

Генератор подключается к колебательному контуру и возбуждает в нем вынужденные электрические колебания, параметры которых определяются свойствами колебательного контура. Эти свойства можно изменять с помощью магазина сопротивлений, включенного в состав колебательного контура. Осциллограф подключен к колебательному контуру таким образом, что на вертикально и горизонтально отклоняющих пластинах ЭО формируются

напряжения с разностью фаз, изменяющейся от нуля до 2π , что приводит к появлению на экране ЭО фигур Лиссажу.

Если подать напряжение, пропорциональное силе тока в контуре, на

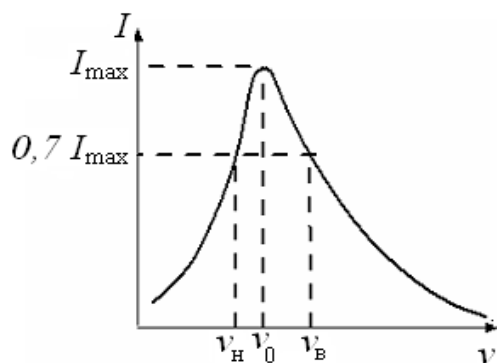


Рис. 7.2. Резонансная кривая

вертикально отклоняющие пластины осциллографа, а напряжение внешней ЭДС – на горизонтально отклоняющие, то при значениях частоты внешней ЭДС, отличных от значения резонансной, на экране осциллографа будет наблюдаться фигура Лиссажу в виде эллипса. При совпадении частоты внешней ЭДС с частотой собственных колебаний в контуре эллипс вырождается в отрезок прямой. Это явление может быть использовано в качестве индикатора резонансных колебаний в контуре.

График зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей ЭДС (резонансная кривая) представлен на рис. 7.2, на котором показаны полоса пропускания контура ($\nu_H \leq \nu \leq \nu_B$) и графическое определение резонансной частоты ν_0 . Полоса пропускания $\Delta\nu$ определяет добротность контура:

$$Q = \frac{\nu_0}{\Delta \nu} = \frac{\nu_0}{\nu_{\text{в}} - \nu_{\text{н}}}, \quad (7.1)$$

где $\nu_{\text{в}}$, $\nu_{\text{н}}$ – верхняя и нижняя частоты полосы пропускания контура (в некоторых технических дисциплинах частота колебаний обозначается буквой f , в физике колебаний – символом ν);

Q – добротность контура.

7.2. Задание

Построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) контура (резонансную кривую) для двух значений добавочного сопротивления контура, определить его резонансную частоту, полосу пропускания и вычислить добротность контура по формуле (7.1), изучить влияние сопротивления контура на его характеристики.

7.3. Порядок выполнения работы

1) Выставить на магазине сопротивлений первое из двух значений добавочного сопротивления контура $R_{\text{д1}}$ и $R_{\text{д2}}$, заданных преподавателем.

2) Изменяя частоту сигнала генератора, получить на экране ЭО результат суперпозиции двух взаимно перпендикулярных колебаний – опорного и сигнала, снимаемого с сопротивления R , – в виде эллипса. Подбором частоты сигнала генератора превратить эллипс в отрезок прямой, что будет свидетельствовать о совпадении частоты сигнала генератора с частотой собственных колебаний контура ν_0 .

3) Уменьшить изображение сигнала на экране ЭО по горизонтали до нуля, отключив провод, идущий на канал развертки сигнала по оси X (это превратит фигуру Лиссажу в вертикальный отрезок). Регулировкой выходного сигнала генератора увеличить вертикальную линию на экране ЭО до максимально возможного видимого размера (восемь делений шкалы). Этот размер вертикальной линии определяет удвоенную амплитуду $2A$ колебаний в контуре (8 дел.) при резонансной частоте ν_0 . Записать значения удвоенной амплитуды $2A$ и резонансной частоты ν_0 в табл. 7.1.

4) Уменьшая частоту ν сигнала генератора, фиксировать значения частоты при уменьшении длины вертикальной линии на экране ЭО на одно деление от восьми до двух делений. Полученные значения записать в табл. 7.1.

Т а б л и ц а 7.1

Значения удвоенной амплитуды
при различных значениях частоты колебаний

Добавочное сопротивление $R_{\text{д}}$, Ом	Частота колебаний ν , Гц, при удвоенной амплитуде $2A$, дел.												
	2	3	4	5	6	7	8	7	6	5	4	3	2
$R_{\text{д1}}$													
$R_{\text{д2}}$													

5) Регулируя частоту сигнала генератора, вернуться к резонансной частоте и, увеличивая частоту сигнала генератора, далее фиксировать значения частоты при уменьшении длины линии на экране ЭО на каждое деление от восьми до двух делений. Результаты записать в табл. 7.1.

6) Повторить измерения (см. п. 2 – 5) для второго значения добавочного сопротивления.

7) По результатам измерений построить график зависимости удвоенной амплитуды колебаний $2A$ в контуре от частоты ν (см. табл. 7.1) для двух значений добавочного сопротивления контура (R_{d1} и R_{d2}) – две кривые на одном графике. Результаты измерений подписать у преподавателя.

8) На полученном графике провести горизонтальную линию на уровне 0,7 от максимальной удвоенной амплитуды и определить по точкам пересечения этих линий с резонансными кривыми значения нижней ν_n и верхней ν_v частоты полосы пропускания контура.

9) Вычислить по формуле (7.1) добротность контура Q при каждом из заданных значений добавочного сопротивления и определить погрешность этих величин как результат косвенных измерений. Поскольку измерения ν_v , ν_n и ν_0 для каждого значения добавочного сопротивления являются прямыми однократными, то их абсолютная погрешность равна приборной погрешности шкалы генератора для ν_0 и цене деления по графику (АЧХ) для ν_v и ν_n . Результаты вычислений и измерений записать в табл. 7.2.

Результаты вычислений добротности

Добавочное сопротивление R_d , Ом	Резонансная частота ν_0 , Гц	Полоса пропускания контура по частоте		Добротность контура Q
		верхняя ν_v , Гц	нижняя ν_n , Гц	

10) Записать окончательный результат (с учетом правил округления), сделать вывод о влиянии величины активного сопротивления контура на вид резонансной кривой, полосу пропускания $\Delta\nu$, резонансную частоту ν_0 и добротность Q .

Библиографический список

1. Крохин С. Н. Измерения и расчет погрешностей в лабораторном практикуме по физике / С. Н. Крохин, Л. А. Литневский, С. А. Минабудинова / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. 29 с.
2. Трофимова Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. М.: Академия, 2006. 560 с.
3. Детлаф А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. М.: Академия, 2008. 720 с.
4. Оселедчик Ю. С. Физика. Модульный курс для технических вузов / Ю. С. Оселедчик, П. И. Самойленко, Т. Н. Точилина. М.: Юрайт, 2012. 525 с.
5. Физика: Большой энциклопедический словарь / Под ред. А. М. Прохорова. М.: Большая российская энциклопедия, 2003. 944 с.
6. Физические величины / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

П.1.1. Электронный осциллограф

Цель работы: изучить устройство, принцип действия и назначение ручек управления электронного осциллографа.

Приборы и принадлежности: осциллограф С1-93, генератор сигналов низкой частоты ГЗ-109, соединительные провода.

П.1.1.1. Описание установки

Осциллограф С1-93 позволяет наблюдать электрические колебания в диапазоне частоты от 0 до 15 МГц, измерять напряжение от 0 до 200 В и временные интервалы от 0,08 мкс до 1 с.

Источником синусоидального переменного напряжения является генератор сигналов низкой частоты ГЗ-109, он позволяет подавать на вход ЭО переменное напряжение различной амплитуды в диапазоне частоты от 0 до 200 кГц.

П.1.1.2. Задание

Изучить устройство, принцип действия и назначение ручек управления ЭО, получить практические навыки измерения переменного напряжения, для этого измерить двойную амплитуду l_y переменного сигнала в делениях шкалы экрана ЭО и рассчитать значение действующего переменного напряжения по формуле:

$$U_y = \frac{l_y K}{2\sqrt{2}}, \quad (\text{П.1.1})$$

где K – коэффициент отклонения канала.

П.1.1.3. Порядок выполнения работы

- 1) Не подключая ЭО к сети, ознакомиться с расположением разъемов и ручек управления на его лицевой панели (рис. П.1.1).
- 2) Включить ЭО, потянув ручку 1 на себя, и отрегулировать яркость и четкость изображения с помощью ручек 3 («☀») и 4 («☉») на лицевой панели ЭО.

3) С помощью переключателя 8 выбрать для работы канал I (вертикального отклонения луча), включить генератор развертки, поставив переключатель 11 («ВРЕМЯ/ДЕЛ») в положение 0,2 мс/дел. Переключатель вида синхронизации 10 установить в положении «Внутр. 1».

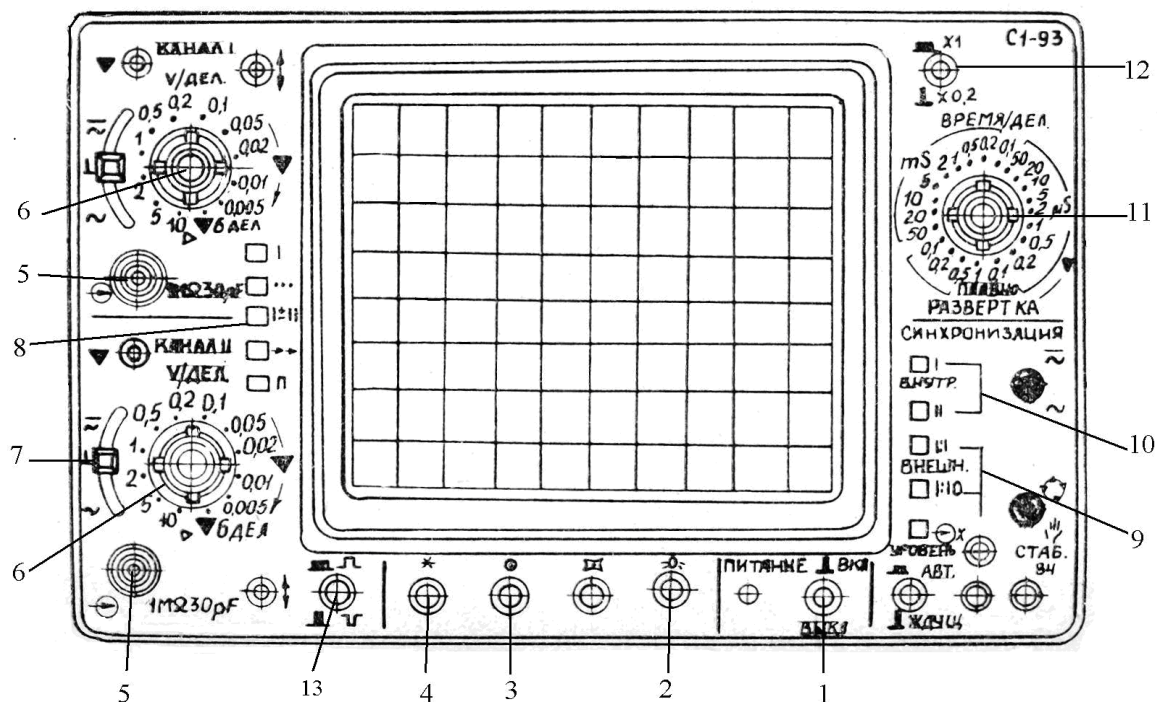


Рис. П.1.1. Лицевая панель универсального осциллографа С1-93 и его основные ручки управления: 1 – тумблер «Питание»; 2 – ручка регулировки освещения линий экрана; 3 – ручка фокусировки изображения; 4 – ручка регулировки яркости изображения; 5 – входы каналов I и II для подачи исследуемых сигналов; 6 – переключатели «V/ДЕЛ» (делитель входного напряжения); 7 – переключатель входа; 8 – переключатели режима работы усилителя каналов I и II; 9 – переключатели для синхронизации развертки внешним сигналом; 10 – переключатели для синхронизации развертки внутренним сигналом; 11 – переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛ» для управления разверткой осциллографа; 12 – переключатель скорости развертки; 13 – переключатель изменения фазы исследуемых сигналов

4) Подать калибровочное напряжение 1,2 В с канала I на вертикально отклоняющие пластины ЭО. С этой целью переключатель канала I «V/ДЕЛ» установить в положение «▼ 6ДЕЛ», ручку «▷», обеспечивающую плавное изменение коэффициента отклонения канала, повернуть в крайнее правое положение. На экране ЭО появится изображение сигнала калибратора (прямоугольные импульсы), величина которого по вертикали должна быть равна шести делениям.

5) С помощью ручек вертикального «↕» и горизонтального «↔» смещения луча установить изображение прямоугольных импульсов в пределах экрана ЭО. (Эта операция называется калибровкой. При необходимости попросить препо-

давателя, чтобы он установил необходимый размер импульсов с помощью ручки потенциометра «▼», выведенной под шлиц на передней панели осциллографа.) Величина изображения импульсов по вертикали должна быть равна шести делениям.

6) Аналогично провести калибровку коэффициента отклонения канала II.

7) Включить генератор и подать напряжение на вход 5 любого канала, например, 11. Тогда переключатель 10 вида синхронизации поставить в положение «ВНУТР» для 11-го канала.

8) Переключатель 7 («≅, ⊥, ~») поставить в положение «~».

9) Установить переключатель 6 («V/ДЕЛ») в такое положение, чтобы вертикальные размеры изображения сигнала не превышали размера экрана. Записать величину коэффициента отклонения канала. Ручка плавной регулировки «▷» должна быть повернута в крайнее правое положение.

10) Подобрать переключателем 11 («ВРЕМЯ/ДЕЛ») такой режим генератора развертки, чтобы на экране наблюдалось несколько полных колебаний исследуемого сигнала.

11) Ручкой вертикального смещения «↑» установить нижний край изображения сигнала (синусоиды) так, чтобы он совпал с одной из горизонтальных линий экрана.

12) Ручкой горизонтального смещения «↔» передвинуть синусоиду исследуемого напряжения таким образом, чтобы один из ее максимумов находился на средней вертикальной линии шкалы (рис. П.1.2).

13) Измерить двойную амплитуду l_y переменного сигнала в делениях шкалы экрана ЭО.

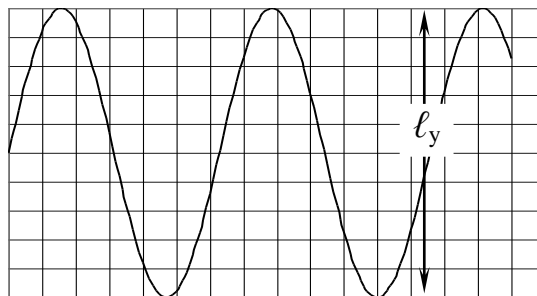


Рис. П.1.2. Изображение синусоидального напряжения на экране осциллографа

14) Рассчитать значение действующего переменного напряжения по формуле (П.1.1).

15) Сделать вывод по итогам работы.

П.1.2. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона

Цель работы: изучить поведение заряженных частиц в электрических и магнитных полях и ознакомиться с методом определения удельного заряда электрона с помощью магнетрона.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка, вольтметр, два амперметра.

П.1.2.1. Описание установки

Лабораторная установка имеет две независимые электрические цепи (рис. П.1.3), одна из которых содержит последовательно соединенные миллиамперметр и соленоид, подключаемые к регулируемому выпрямителю ВС, а вторая – электронную лампу, выполняющую роль магнетрона, миллиамперметр и вольтметр, регистрирующие значения анодного тока I_A и анодного напряжения U_A . Цепь питается от специального выпрямителя, подключенного к выходу регулятора напряжения ЛАТР.

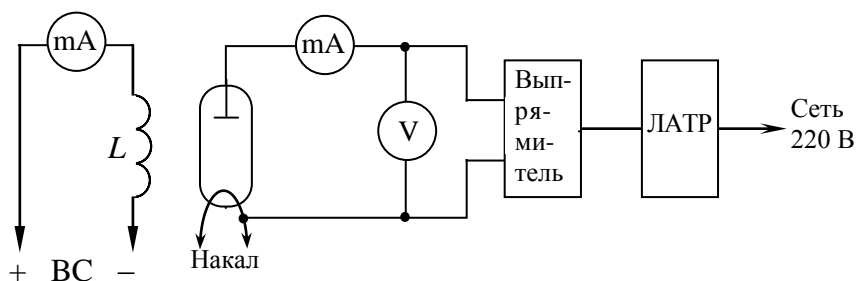


Рис. П.1.3. Схема лабораторной установки

П.1.2.2. Задание

Измерить анодное напряжение U_A , снять сбросовую характеристику (зависимость силы анодного тока I_A от силы тока соленоида I_c), определить значение критического тока в цепи соленоида $I_{кр}$ и рассчитать значение удельного заряда электрона по формуле:

$$\frac{|q_e|}{m} = \frac{kU_A}{I_{кр}^2}, \quad (\text{П.1.2})$$

где k – коэффициент, значение которого указывается на установке.

П.1.2.3. Порядок выполнения работы

1) Установить с помощью ЛАТРа анодное напряжение U_A , заданное преподавателем. Анодный ток I_A измерить миллиамперметром. Значения U_A , инструментальной погрешности ΔU_A и коэффициента k записать в табл. П.1.1.

2) Постепенно увеличить силу тока I_c в соленоиде с помощью выпрямителя ВС до момента, когда анодный ток начнет резко уменьшаться. Далее силу тока в соленоиде увеличивать ступенями так, чтобы изменения силы анодного тока на каждой ступени были не более 3 – 4 мА. Таким образом силу тока в соленоиде увеличивать до тех пор, пока анодный ток I_A не перестанет заметно изменяться.

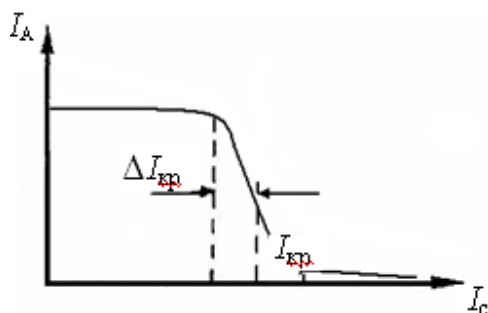


Рис.П.1.4. Сбросовая характеристика

При изменении силы тока в соленоиде I_c происходят небольшие изменения анодного напряжения U_A , вызванные изменениями внутреннего сопротивления электронной лампы, поэтому перед регистрацией значений сил тока I_A и I_c следует восстанавливать уровень анодного напряжения до исходного.

3) Значения анодного тока I_A и тока в соленоиде I_c (не меньше 10 пар значений) записать в табл. П.1.1.

4) По полученным данным построить сбросовую характеристику $I_A = f(I_c)$.

Таблица П.1.1.

Результаты измерений для определения $|q_e|/m$

$U_A =$	$\Delta U_A =$	$I_c, \text{ мА}$										
$k =$		$I_A, \text{ мА}$										

5) На сбросовой характеристике определить участок с наибольшей крутизной, выделить на нем прямолинейную часть и из ее середины опустить перпендикуляр на ось I_c . Точка пересечения перпендикуляра с указанной осью будет соответствовать критическому току $I_{кр}$ при данном анодном напряжении.

6) Рассчитать значение удельного заряда электрона по формуле (П.1.2) и результаты измерений и расчетов подписать у преподавателя.

7) Провести математическую обработку результатов измерений. При определении абсолютной погрешности измерения критического тока $I_{кр}$ в со-

леноиде следует воспользоваться сбросовой характеристикой, приняв за абсолютную погрешность $\Delta I_{\text{кр}}$ интервалы изменений тока в соленоиде I_c от измеренного значения $I_{\text{кр}}$ до участков сбросовой характеристики с максимальной кривизной (см. рис. П.1.4).

8) Записать окончательный результат (с учетом правил округления).

9) Вычислить теоретическое значение удельного заряда электрона $(|q_e|/m)_{\text{теор}}$, приняв: $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

10) Сравнить полученный результат с теоретическим значением удельного заряда электрона и сделать вывод.

П.1.3. Незатухающие колебания (математический маятник)

Ц е л ь р а б о т ы: изучить линейные гармонические колебания с помощью математического маятника.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: математический маятник, секундомер, измерительная линейка.

П.1.3.1. Описание установки

Математическим маятником называют идеализированную колебательную систему, состоящую из невесомой и нерастяжимой нити, на которой подвешена материальная точка.

Лабораторная установка представляет собой штатив, в верхней части которого крепится нить. К нижнему концу нити привязан металлический шарик.

П.1.3.2. Задание

Измерить длину маятника l , время t_N , за которое маятник совершает N полных колебаний, и определить ускорение свободного падения (напряженность гравитационного поля Земли) по формуле:

$$g = \frac{4\pi^2 l N^2}{t_N^2}. \quad (\text{П.1.3})$$

П.1.3.3. Порядок выполнения работы

1) Измерить длину l маятника от точки подвеса до центра тяжести шарика, определить инструментальную погрешность измерения длины $\Delta l_{\text{ин}}$ и записать результаты измерения в табл. П.1.2.

2) Отклонить маятник от положения равновесия на расстояние не более 10 % от длины маятника (в этом случае колебания маятника можно считать линейными и гармоническими). Отпустить маятник и измерить с помощью секундомера время t_N совершения маятником N колебаний (N задается преподавателем). Измерения провести многократно. Результаты измерений t_N и N и инструментальную погрешность $\Delta t_{N \text{ ин}}$ секундомера записать в табл. П.1.2.

Т а б л и ц а П.1.2

Результаты измерения
при определении ускорения свободного падения

l , м	$\Delta l_{\text{ин}}$, м	N	t_N , с	$\Delta t_{N \text{ ин}}$, с

3) Сделать оценочный (приблизительный) расчет ускорения свободного падения в гравитационном поле Земли по формуле (П.1.3) и результаты измерений и расчетов подписать у преподавателя.

4) Выполнить математическую обработку результатов измерений.

5) Записать окончательный результат (с учетом правил округления).

6) Сравнить полученный результат с табличным значением ускорения свободного падения и сделать вывод.

П.1.4. Незатухающие колебания (пружинный маятник)

Ц е л ь р а б о т ы: изучить линейные гармонические колебания с помощью пружинного маятника.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: пружинный маятник, секундомер, измерительная линейка.

П.1.4.1. Описание установки

Лабораторная установка представляет собой штатив, в верхней части которого крепится один из концов пружины, ко второму концу пружины подвешивается груз массой m , способный совершать колебания вдоль оси пружины под действием упругой силы.

П.1.4.2. Задание

Измерить удлинение пружины Δl под действием груза массой m и из условия равновесия определить статическим методом коэффициент жесткости пружины по формуле:

$$k_{\text{стат}} = \frac{mg}{\Delta l}, \quad (\text{П.1.4})$$

где Δl – удлинение пружины под действием подвешенного груза, $\Delta l = l - l_0$; l и l_0 – длина пружины в нагруженном и ненагруженном состоянии.

Измерить время t_N , за которое маятник совершает N полных колебаний, и определить динамическим методом коэффициент жесткости пружины по формуле:

$$k_{\text{дин}} = \frac{4\pi^2 m N^2}{t_N^2}. \quad (\text{П.1.5})$$

П.1.4.3. Порядок выполнения работы

1) Измерить массу груза, подвешенного к пружине, результат измерения и инструментальную погрешность записать в табл. П.1.3.

2) Освободить пружину от действия груза и измерить ее длину l_0 в ненагруженном состоянии (длиной пружины считается расстояние от первого до последнего витка), результат измерения записать в табл. П.1.3.

3) Нагрузить пружину и добиться статического равновесия, измерить длину l пружины в деформированном состоянии и результат измерения и инструментальную погрешность записать в табл. П.1.3. Измерения провести многократно.

4) Вывести груз, подвешенный к пружине, из положения равновесия на расстояние, не превышающее 10 % от длины пружины в равновесном состоянии (при этом выполняются условия линейности и гармоничности колебаний), и отпустить груз, одновременно включив секундомер.

5) Измерить с помощью секундомера время t_N совершения N полных колебаний пружинного маятника (N задается преподавателем). Полученный результат и инструментальную погрешность записать в табл. П.1.3. Измерения провести многократно.

6) Сделать оценочный (приблизительный) расчет коэффициента жесткости пружины $k_{\text{стат}}$ по формуле (П.1.4) и коэффициента жесткости пружины $k_{\text{дин}}$ по формуле (П.1.5) и результаты измерений и расчетов подписать у преподавателя.

- 7) Выполнить математическую обработку результатов измерений.
- 8) Записать окончательные результаты (с учетом правил округления).
- 9) Сравнить результаты измерения коэффициента жесткости пружины статическим и динамическим методами и сделать вывод.

Т а б л и ц а П.1.3

Результаты измерения жесткости пружины

m , кг	Δm , кг	l_0 , м	l , м	Δl , м	N	t_N , с	Δt_N , с

ПРАВИЛА ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Подробное изложение методики измерения и расчета погрешности представлено в методических указаниях [1]. В данной работе приведены лишь основные правила вычисления погрешности при прямых и косвенных измерениях.

Большая часть измерений – косвенные, а они включают в себя два различных этапа: прямые измерения и последующие расчеты. Следовательно, и оценка погрешности таких измерений также должна состоять из двух этапов. Сначала необходимо оценить погрешность значений тех величин, которые определяются непосредственно при прямых измерениях, а затем выяснить, как эта погрешность при расчетах приведет к погрешности в конечном результате.

Основной порядок математической обработки результатов многократных прямых измерений:

1) вычислить среднеарифметическое (действительное) значение измеряемой величины:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}; \quad (\text{П.2.1})$$

2) рассчитать абсолютную погрешность прямых многократных измерений:

$$\Delta x = \Delta x_{\text{ин}} + \frac{|\langle x \rangle - x_1| + |\langle x \rangle - x_2| + \dots + |\langle x \rangle - x_n|}{n}; \quad (\text{П.2.2})$$

3) вычислить относительную погрешность результата измерений:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100\%; \quad (\text{П.2.3})$$

4) записать окончательный результат (с учетом правила округления) в виде:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x \text{ ед. изм. с } \varepsilon_x = \dots\%. \quad (\text{П.2.4})$$

При записи окончательного результата измерений (и оценки погрешности) необходимо придерживаться следующего правила: значение абсолютной погрешности результата измерений округляют до двух значащих цифр слева, а среднее значение – до того разряда, в котором находится вторая значащая цифра абсолютной погрешности.

П р и м е р. Пусть в результате измерений и расчетов было получено: $\langle x \rangle = 17,968$ см и $\Delta x = 0,237$ см. Тогда окончательный результат (с учетом правил округления) следует записать в виде: $x = (17,97 \pm 0,24)$ см.

Основные этапы математической обработки результатов косвенных измерений:

1) провести прямые измерения всех величин (x, y, z, \dots), входящих в рабочую формулу $f = f(x, y, z, \dots)$, и математическую обработку полученных результатов;

2) вычислить действительное (среднеарифметическое) значение измеряемой величины $\langle f \rangle$, подставив в рабочую формулу среднеарифметические значения переменных $\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle, \dots$:

$$\langle f \rangle = f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle, \dots); \quad (\text{П.2.5})$$

3) рассчитать абсолютную погрешность результата:

$$\Delta f = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\langle x \rangle} \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{y=\langle y \rangle} \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right|_{z=\langle z \rangle} \Delta z + \dots, \quad (\text{П.2.6})$$

где $\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\langle x \rangle}, \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{y=\langle y \rangle}, \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right|_{z=\langle z \rangle}, \dots$ – модули частных производных функции по переменным x, y, z, \dots , вычисленные по среднеарифметическим значениям $\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle, \dots$;

4) вычислить относительную погрешность результата:

$$\varepsilon_f = \frac{\Delta f}{\langle f \rangle} \cdot 100 \%; \quad (\text{П.2.7})$$

5) записать окончательный результат (с учетом правила округления) в виде:

$$f = \langle f \rangle \pm \Delta f \text{ ед. изм. с } \varepsilon_f = \dots\%. \quad (\text{П.2.8})$$

Если искомая величина представляет собой выражение вида

$$f = f(x, y, z) = x^a y^b z^c, \quad (\text{П.2.9})$$

т. е. не содержит операций сложения и вычитания, причем постоянные a, b, c могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, проще сначала найти относительную погрешность ε_f :

$$\varepsilon_f = \left| \frac{a}{\langle x \rangle} \right| \Delta x + \left| \frac{b}{\langle y \rangle} \right| \Delta y + \left| \frac{c}{\langle z \rangle} \right| \Delta z = a\varepsilon_x + b\varepsilon_y + c\varepsilon_z. \quad (\text{П.2.10})$$

После этого рассчитывают абсолютную погрешность Δf по формуле $\Delta f = \varepsilon_f \langle f \rangle$ и записывают окончательный результат в стандартном виде (П.2.8).

Если при косвенных измерениях практически невозможно воспроизвести прежние условия проведения эксперимента, то в этом случае после проведения многократных прямых измерений величин x, y, z, \dots для получения окончательного результата, т. е. $\langle f \rangle, \Delta f, \varepsilon_f$, необходимо выполнить действия в следующем порядке:

1) для каждого из значений x_i, y_i, z_i, \dots вычислить значение f_i косвенно определяемой величины:

$$f_i = f(x_i, y_i, z_i, \dots); \quad (\text{П.2.11})$$

2) определить среднее значение измеряемой величины:

$$\langle f \rangle = \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i; \quad (\text{П.2.12})$$

3) вычислить погрешность каждого измерения:

$$\Delta f_i = \langle f \rangle - f_i, \quad i = 1, \dots, n; \quad (\text{П.2.13})$$

4) рассчитать случайную погрешность измерений:

$$\Delta f_{\text{сл}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta f_i|; \quad (\text{П.2.14})$$

5) вычислить погрешность, вносимую различными инструментами в абсолютную погрешность косвенно измеряемой величины (назовем формально эту погрешность инструментальной $\Delta f_{\text{ин}}$):

$$\Delta f_{\text{ин}} = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x_{\text{ин}} + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y_{\text{ин}} + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \Delta z_{\text{ин}} + \dots \quad (\text{П.2.15})$$

При этом после нахождения частных производных в полученное выражение следует подставить наименьшие из измеренных значений x, y, z, \dots , приводящие к наибольшей погрешности $\Delta f_{\text{ин}}$;

6) определить абсолютную погрешность:

$$\Delta f = \Delta f_{\text{сл}} + \Delta f_{\text{ин}}; \quad (\text{П.2.16})$$

7) рассчитать относительную погрешность:

$$\varepsilon_f = \frac{\Delta f}{\langle f \rangle} \cdot 100 \% ; \quad (\text{П.2.17})$$

8) произведя округление результатов расчета, записать окончательный результат измерения в стандартном виде (П.2.8).

Абсолютную погрешность Δf косвенно измеряемой величины f можно определить без непосредственного вычисления частных производных, используя формулы численного дифференцирования (прил. 3). Полученная на основе выражения (П.2.6) формула для расчета Δf примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta f &= \Delta f_x + \Delta f_y + \Delta f_z + \dots = \\ &= \left| f(\langle x \rangle + \Delta x, \langle y \rangle, \langle z \rangle, \dots) - f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle, \dots) \right| + \\ &+ \left| f(\langle x \rangle, \langle y \rangle + \Delta y, \langle z \rangle, \dots) - f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle, \dots) \right| + \\ &+ \left| f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle + \Delta z, \dots) - f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle, \dots) \right| + \dots, \end{aligned} \quad (\text{П.2.18})$$

где $f(\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle z \rangle, \dots) = \langle f \rangle$ – среднее значение величины f .

ПРАВИЛА ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ И ТАБЛИЦА ПРОИЗВОДНЫХ

Из определения *производной* вытекают несколько *правил дифференцирования*, использование которых позволяет свести дифференцирование функций к вычислению производных элементарных функций:

производная постоянной величины (константы) равна нулю:

$$C' = 0; \quad (\text{П.3.1})$$

постоянная величина (константа), являющаяся сомножителем функции, при дифференцировании выносится за знак производной:

$$(c f(x))' = c f'(x); \quad (\text{П.3.2})$$

производная суммы (разности) функций равна сумме (разности) производных функций:

$$(f(x) \pm g(x))' = f'(x) \pm g'(x); \quad (\text{П.3.3})$$

производная произведения двух функций равна производной первой функции, умноженной на вторую, плюс произведение первой функции на производную второй:

$$(f(x) \times g(x))' = f'(x) \times g(x) + f(x) \times g'(x); \quad (\text{П.3.4})$$

производная частного при делении двух функций преобразовывается по формуле:

$$\left(\frac{f(x)}{g(x)} \right)' = \frac{f'(x) \times g(x) - f(x) \times g'(x)}{g^2(x)}; \quad (\text{П.3.5})$$

производная сложной функции (т. е. функции от функции) равна произведению производной внешней функции по всему ее аргументу (т. е. по вложенной функции g) и производной вложенной функции по ее аргументу:

$$f'_x(g(x)) = f'_g(g) g'_x(x) \quad (\text{П.3.6})$$

или

$$\frac{df(g(x))}{dx} = \frac{df(g)}{dg} \frac{dg(x)}{dx}. \quad (\text{П.3.7})$$

(Производная сложной функции – наиболее сложное для практического применения правило дифференцирования, поэтому приведены две формы записи этого правила.)

Расчет погрешности косвенных измерений при выполнении лабораторных работ требует умения вычислять *частные производные функции многих переменных*. Чтобы вычислить такую производную по одному из аргументов, необходимо все остальные переменные объявить константами и руководствоваться далее обычными правилами дифференцирования:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(x, y, z, \dots)}{\partial x} &= \left. \frac{df(x, y, z, \dots)}{dx} \right|_{y, z, \dots = \text{const}}; \\ \frac{\partial f(x, y, z, \dots)}{\partial y} &= \left. \frac{df(x, y, z, \dots)}{dy} \right|_{x, z, \dots = \text{const}}. \end{aligned} \quad (\text{П.3.8})$$

Производные некоторых наиболее часто встречающихся элементарных функций:

гармонических функций синуса и косинуса –

$$\frac{d \sin x}{dx} = \cos x; \quad (\text{П.3.9a}) \quad \frac{d \cos x}{dx} = -\sin x; \quad (\text{П.3.9б})$$

экспоненциальной и логарифмической функций –

$$\frac{d e^x}{dx} = e^x; \quad (\text{П.3.10a}) \quad \frac{d \ln x}{dx} = \frac{1}{x}; \quad (\text{П.3.10б})$$

степенной функции и два ее частных случая для $n = -1$ и $n = 1/2$ соответственно –

$$\frac{d x^n}{dx} = n x^{n-1}; \quad (\text{П.3.11a}) \quad \frac{d \frac{1}{x}}{dx} = -\frac{1}{x^2}; \quad (\text{П.3.11б}) \quad \frac{d \sqrt{x}}{dx} = \frac{1}{2\sqrt{x}}. \quad (\text{П.3.11в})$$

(Более полную таблицу производных можно найти в учебниках по высшей математике либо в специальных справочниках.)

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Т а б л и ц а П.4.1

Десятичные приставки

Наименование	Обозначение	Отношение	Наименование	Обозначение	Отношение
деци	д	10^{-1}	дека	да	10^1
санتي	с	10^{-2}	гекто	г	10^2
милли	м	10^{-3}	кило	к	10^3
микро	мк	10^{-6}	мега	М	10^6
нано	н	10^{-9}	гига	Г	10^9
пико	п	10^{-12}	тера	Т	10^{12}

Учебное издание

ВОЗНЮК Сергей Викторович, ДРОЗДОВА Илга Анатольевна,
ИСАКОВ Владислав Антонович, КРОХИН Сергей Николаевич,
ЛИТНЕВСКИЙ Андрей Леонидович, НЕСТЕРОВ Владимир Петрович,
ПОКРАСА Николай Владимирович

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, МАГНЕТИЗМУ И КОЛЕБАНИЯМ

Редактор Н. А. Майорова
Корректор И. А. Сенеджук

Подписано в печать .02.2014. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,7. Уч.-изд. л. 3,0.
Тираж 1000 экз. Заказ .

**

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа
Типография ОмГУПСа

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, МАГНЕТИЗМУ И КОЛЕБАНИЯМ**

ОМСК 2014