

ФИЗИКА

Электродинамика

Колебательные и

волновые процессы

Лабораторный практикум

Учебное пособие по курсу «Физика»
для студентов, обучающихся по направлениям: «Радиотехника», «Биотехнические системы и технологии», «Электроника и нанoeлектроника», «Электроэнергетика и электро-техника», «Информационная безопасность», «Приборостроение», «Прикладная математика и информатика», «Информатика и вычислительная техника», «Управление в технических системах»;
по специальности: «Радиоэлектронные системы и комплексы»

О. В. Бирюкова, С. В. Григорьев, Б. В. Ермаков, Е. В. Зелепукина,
О. И. Коваль, И. В. Корецкая, В. Ф. Кубарев, К. М. Лапицкий,
О. И. Лубенченко, О. В. Петрова, А. Е. Тарасов, Г. М. Янина

IvanovaOII@mpei.ru

Оглавление

ОГЛАВЛЕНИЕ.....	2
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЁМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА.....	14
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ВЕСЫ НАПРЯЖЕНИЯ.....	19
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЁМКОСТИ КООКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ И ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ИЗУЧЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ	29
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА.....	34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 (ВВОДНАЯ) ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ.....	39
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ХОЛЛА	44
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРОМАГНЕТИКА	51
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА.....	59
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11 ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КАТУШКАХ ГЕЛЬМГОЛЬЦА.....	64
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12 ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ПО МЕТОДУ СТОЛЕТОВА.....	72
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ КАТУШЕК.....	76
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА	82
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ	92
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16 ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ	99
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ	105
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 20 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ФИГУР ЛИССАЖУ	110
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 21 ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЯЧИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ	116
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 22 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ	123
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 23 ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ СЛОЖЕНИЯ ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ	129

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 24 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА МЕТОДОМ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ.....	135
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 25 ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА	139
ПОГРЕШНОСТИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	147
ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА	150
СПЕЦИФИКАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ.....	152
ФОРМА ОТЧЁТА О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	153
ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ.....	154
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	155

Лабораторная работа № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ

Цель работы: экспериментальное исследование электростатического поля заряженных тел различной конфигурации и его описание с помощью эквипотенциальных и силовых линий.

В данной работе требуется опытным путём выявить расположение эквипотенциалей полей нескольких конфигураций и далее перейти к построению картины силовых линий.

Работа выполняется в двух вариантах: А, Б.

Введение

Электростатическое поле характеризуется в каждой точке пространства вектором напряжённости поля \vec{E} и потенциалом φ .

Напряжённость электрического поля равна $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$, где \vec{F} — сила, с которой

поле действует на неподвижный точечный положительный заряд q , находящийся в данной точке пространства.

Разность потенциалов равна $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1-2}}{q}$, где A_{1-2} — работа, совершаемая

полем (силами поля) при перемещении точечного положительного заряда q по произвольной траектории из точки **1** в точку **2**. Если принять потенциал какой-либо точки поля равным нулю, то потенциалы всех прочих точек поля определяются однозначно. Тогда **потенциал** данной точки поля будет численно равен работе, совершаемой полем при перемещении единичного положительного точечного заряда из данной точки в ту, где значение потенциала принято за нуль. В общем случае напряжённость и потенциал электростатического поля изменяются от точки к точке.

Работу поля можно вычислить по формуле

$$A_{1-2} = \int_1^2 q \cdot \vec{E} \cdot d\vec{l}.$$

Тогда между напряжённостью и потенциалом получается следующая **интегральная связь**:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}.$$

Для однородного поля ($\vec{E} = \text{const}$) эта формула приобретает вид $\varphi_1 - \varphi_2 = \vec{E} \cdot \vec{l}$ (\vec{l} — перемещение). Если поле неоднородно, то около любой точки B можно выбрать настолько малые перемещения $\Delta \vec{l}$, что поле в пределах этих перемещений можно считать однородным. Тогда

$$-\Delta\varphi = -(\varphi - \varphi_B) = \vec{E} \Delta \vec{l} = E \Delta l \cos \alpha = E_l \Delta l,$$

где $\Delta\varphi$ — изменение потенциала при смещении из точки B на $\Delta \vec{l}$, α — угол между векторами \vec{E} и $\Delta \vec{l}$, а E_l — проекция \vec{E} на направление смещения $\Delta \vec{l}$. Из последнего равенства имеем

$$E_l = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}. \quad (1)$$

Соотношение (1) позволяет находить проекцию напряжённости поля на любые направления в произвольной точке B , если известны значения потенциалов в окрестности этой точки. В общем случае при бесконечно малых перемещениях формула (1) выражает дифференциальную связь между E_l и φ в каждой точке поля $E_l = -\frac{d\varphi}{dl}$. Знак «-» указывает на то, что в направлении вектора \vec{E} потенциал убывает.

Графически электростатическое поле изображается силовыми линиями и эквипотенциальными поверхностями (рис. 1.1). **Силовая линия** — воображаемая линия в пространстве, касательная к которой в каждой точке совпадает по направлению с вектором напряжённости поля \vec{E} в этой точке.

Эквипотенциальная поверхность — геометрическое место точек с одинаковым потенциалом. Графически представить электростатическое поле на плоскости можно, изображая линии пересечения этих поверхностей данной плоскостью. Эти линии называются **эквипотенциальными**.

Если заряд перемещается в направлении $\vec{\Delta l}$, перпендикулярном силовой линии, т. е. вектору \vec{E} , то $E_l = 0$ и $\varphi = \text{const}$. Следовательно, во всех точках кривой, расположенной перпендикулярно силовым линиям, потенциал одинаков, т. е. эквипотенциальные линии везде перпендикулярны силовым линиям.

Теорема Гаусса позволяет наглядно представить электрическое поле густотой силовых линий. Проведём в пространстве произвольный малый замкнутый контур L и через каждую его точку — силовую линию электростатического поля (рис. 1.2). Эти силовые линии образуют поверхность, называемую **силовой трубкой**. Рассмотрев замкнутую поверхность силовой трубки, по теореме Гаусса получим условие $ES = \text{const}$ вдоль силовой трубки. Это условие аналогично для жидкости, текущей по трубке переменного сечения S , т. е. $vS = \text{const}$, где v — скорость течения жидкости. Очевидно, что в местах с большей напряжённостью поля силовые линии гуще, а число силовых линий, проходящих сквозь площадку S , пропорционально модулю напряжённости поля. Поскольку поверхность проводника эквипотенциальна, то вектор \vec{E} направлен к ней по нормали. Модуль напряжённости электрического поля \vec{E} вблизи поверхности заряженного проводника (**электрода**) связан с поверхностной плотностью зарядов σ на этом проводнике соотношением $\sigma = \varepsilon_0 E_n$, E_n — проекция вектора \vec{E} на направление внешней нормали к поверхности электрода. С учётом формулы (1) получим

$$\sigma = -\varepsilon_0 \frac{\Delta\varphi}{\Delta l_n}, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi$ — изменение потенциала при смещении на малое расстояние Δl_n по нормали к поверхности проводника.

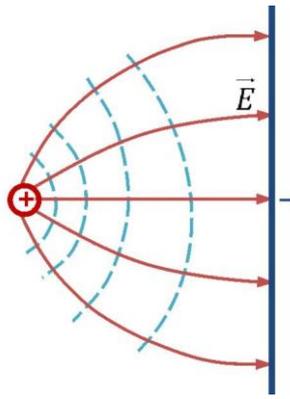


Рис. 1.1

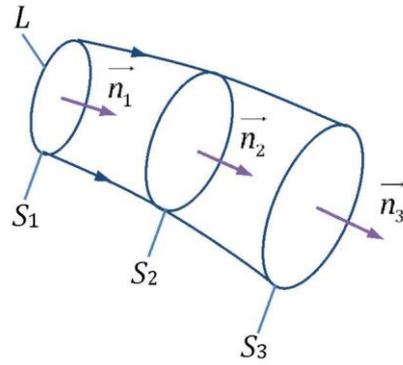


Рис. 1.2

1. Описание установки и метода измерений

Аналитический расчёт электростатических полей при сложной конфигурации электродов представляет большие трудности и для ряда случаев невыполним. В то же время при конструировании электронных, ионных и многих других приборов очень важно знать характер распределения поля между электродами сложной формы. Поэтому эту задачу решают либо на ЭВМ, либо экспериментально.

В основе данной работы лежит метод моделирования электростатического поля. Сущность этого метода заключается в замене электростатического поля неподвижных зарядов полем стационарного тока в слабопроводящей среде. С этой целью в электролит с малой удельной электропроводностью погружают электроды и прикладывают к ним разность потенциалов. Форма и взаимное расположение электродов должны быть такими же, как форма и расположение заряженных тел, создающих изучаемое электростатическое поле. Теоретический анализ показывает, что в этом случае существует аналогия между распределением потенциалов в поле тока в однородной слабопроводящей среде и в электростатическом поле.

Закон Ома в дифференциальной форме $\vec{j} = \lambda \vec{E}$ связывает плотность тока \vec{j} и напряжённость поля \vec{E} в одной и той же точке. Можно показать, что если проводящая среда однородна (удельная электропроводность λ не зависит от координат), то в наиболее интересных случаях поле \vec{E} в проводящей среде совпадает с полем $\vec{E}_{ст}$, которое существовало бы между данными электродами, если бы между ними было то же напряжение, что и при наличии тока, а вместо проводящей среды был бы вакуум. Отсюда следует, что в однородной проводящей среде силовые линии электростатического поля совпадают с линиями тока \vec{j} .

Покажем это расчётом. Из уравнения непрерывности $\text{div } \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$, где $\rho(x, y, z)$ — объёмная плотность зарядов в среде, и закона Ома в дифференциальной форме при условии $\rho = 0$ следует, что поле \vec{E} в проводящей среде удовлетворяет тому же уравнению, что и электростатическое поле $\vec{E}_{ст}$ в вакууме: $\text{div } \vec{E}_{ст} = 0$, при отсутствии объёмных зарядов ($\rho = 0$).

Необходимы также одинаковые условия на границе электродов для совпадения полей \vec{E} и $\vec{E}_{ст}$. Расчёт даёт, что если удельная электропроводность электролита много меньше, чем удельная электропроводность электродов, то

электроды (проводники) будут иметь во всех точках практически один и тот же потенциал, и силовые линии электрического поля внутри проводящей среды будут нормальны к поверхности электродов, как и в электростатическом поле. Это следует из равенства нормальных к поверхности раздела сред составляющих векторов плотности тока, т. е. $j_{1n} = j_{2n}$. Последнее равенство означает преломление линий электрического тока на поверхности раздела проводников, причём $\frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\operatorname{tg}\alpha_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$, где α_1, α_2 — углы между линией тока в средах

1, 2 и нормалью к поверхности раздела; λ_1, λ_2 — удельные электропроводности сред **1, 2**. Рассуждения о тождественности электростатического поля в непроводящей среде (вакуум, диэлектрик) и поля постоянного тока в слабопроводящей среде становятся особенно понятны, если рассматривать диэлектрик как предельный случай среды с малой удельной проводимостью. Для большей простоты эксперимента проводят исследование так называемого плоского поля, не зависящего от одной из трёх координат, например, z . В таком поле потенциал постоянен вдоль любой вертикальной линии. В этом случае для изучения распределения потенциала используют вертикальные тонкие металлические стержни — *зонды*, вводимые внутрь поля. Такие зонды не искажают плоское поле.

Вариант А

Установка для изучения модели электрического поля представлена на [рис. 1.3](#). Установка состоит из ванны **1** с электролитом (водопроводной водой), электродов **Э1** и **Э2**, зонда **З**, индикаторного прибора **ИП**, переменных сопротивлений R_1 и R_2 , пантографа **2** и источника переменного напряжения U . Применение переменного напряжения¹ удобно для проведения измерений, а также позволяет избежать поляризации электродов, приводящей к искажению поля. При постоянном токе происходил бы процесс электролиза и на электродах выделялись бы составные части электролита. В результате напряжение между электродами в течении измерений менялось бы и измерения были бы менее точными.

Электрическая схема ванны изображена на [рис. 1.4](#). Такого рода схема называется *мостом*. Участок CD с сопротивлениями R_1 и R_2 образуют одну из ветвей моста, другая ветвь образована сопротивлением электролита между электродами **Э1** и **Э2**. Участок CD представляет собой потенциометр, который с помощью расположенной на нем шкалы разделён на 10 частей. В диагональ моста AB между зондом и движком потенциометра A включён индикаторный прибор **ИП** (см. [рис. 1.3](#)), в качестве которого используется осциллограф. Если, не изменяя потенциала точки A , перемещать зонд, то можно найти такую точку B в поле, потенциал которой равен потенциалу точки A ($\varphi_B = \varphi_A$). Равенство этих потенциалов устанавливают с помощью осциллографа. Разберём этот вопрос подробнее. От блока питания **БП** переменное напряжение подаётся на точки C и D потенциометра, на электроды **Э1** и **Э2** и на горизонтально отклоняющие пластины трубки осциллографа (вход X). На вход Y переменное напряжение подаётся с точек A и B ([рис. 1.4](#)). Предположим, зонд находится в такой точке B исследуемого поля, для которой $\varphi_B = \varphi_A$. В этом случае на вход Y

¹ Переход на переменный ток низкой частоты ($\nu = 50$ Гц) не изменяет расположение эквипотенциалей, так как длина волны λ , соответствующая переменной разности потенциалов, $\lambda = c/\nu = 3 \cdot 10^8 / 50 = 6 \cdot 10^6$ м, намного больше расстояния между электродами (0,2–0,3 м). Поэтому можно считать, что потенциал во всех точках поля изменяется одновременно.

осциллографа напряжение не поступает, вертикальное отклонение луча отсутствует. На горизонтально отклоняющие пластины (на вход X) постоянно подаётся переменное напряжение, заставляющее электронный луч перемещаться по экрану осциллографа то вправо, то влево, прочерчивая на нем горизонтальную прямую. Если передвинуть зонд в другую точку поля, для которой $\varphi_B \neq \varphi_A$, то картина на экране изменится. Пусть при этом положении зонда для положительного полупериода питающего напряжения выполняется условие $\varphi_A > \varphi_B$ (положительным условно назовём полупериод, для которого $\varphi_D > \varphi_C$). Под действием горизонтально отклоняющих пластин луч начинает движение вправо. Но теперь на вход Y через усилитель подаётся сигнал, пропорциональный $\varphi_A - \varphi_B$, под воздействием которого луч смещается вверх. В течение отрицательного полупериода ($\varphi_C > \varphi_D$) луч будет скользить одновременно влево и вниз. В результате на экране вместо горизонтальной линии появится наклонная прямая, угол наклона которой будет тем больше, чем дальше находится зонд от точек поля, где $\varphi_B = \varphi_A$. Если предположить, что $\varphi_A < \varphi_B$, то правый конец прямой отклоняется вниз, а левый вверх.

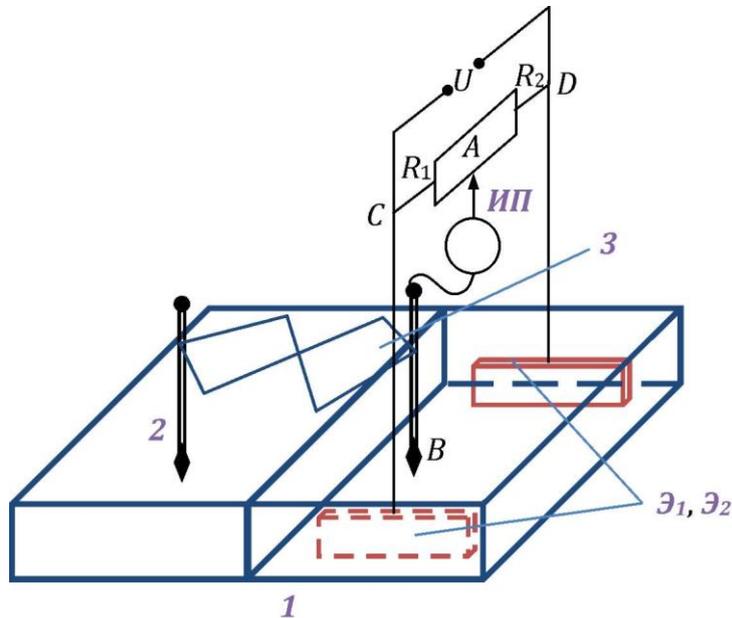


Рис. 1.3

Следовательно, только в точках поля, удовлетворяющих условию $\varphi_B = \varphi_A$, прямая на экране горизонтальна. Пользуясь этим критерием, можно выявить все точки поля, в которых потенциал одинаков и равен потенциалу точки A. Определив эту эквипотенциальную кривую, с помощью движка потенциометра изменяют потенциал точки A и аналогичным образом находят новую эквипотенциаль.

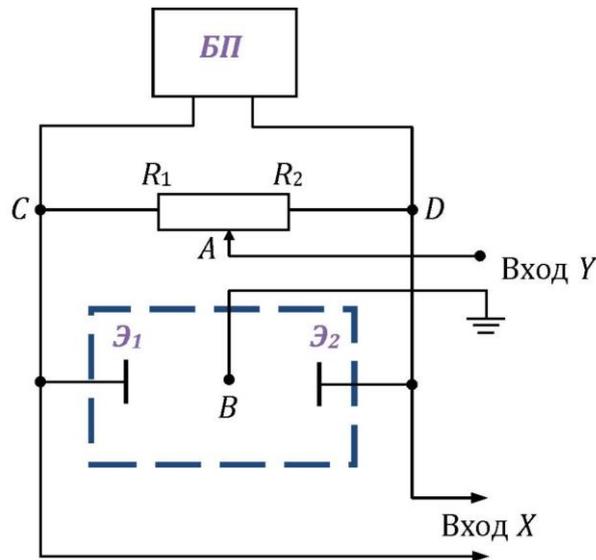


Рис. 1.4

Найдём связь между положением движка и потенциалом точки A . При условии $\varphi_B = \varphi_A$ ток через сопротивления R_1 и R_2 будет одинаков, и напряжение U , подаваемое на диагональ моста CD , делится на участках CA и AD в отношении R_1/R_2 . Если условно принять потенциал точки C (электрода \mathcal{E}_1) равным 0, то потенциал точки D (электрода \mathcal{E}_2) будет равен $U = \varphi_D - \varphi_C$, т. е. $\varphi_D = U$. Тогда потенциал точки A определится из соотношения

$$\frac{\varphi_A - \varphi_C}{\varphi_D - \varphi_A} = \frac{R_1}{R_2}$$

или, учитывая, что $\varphi_C = 0$ и $\varphi_D = U$, получим

$$\varphi_A = U \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Величина $(R_1 + R_2)$ является *полным сопротивлением потенциометра*. Так как потенциометр разделён шкалой на 10 частей, то, установив движок на отметку «1», получим отношение $\frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0,1$ и $\varphi_A = 0,1U$. Следовательно, значения потенциалов точек находят по формуле

$$\varphi_B = \varphi_A = \frac{U}{10} N, \quad (3)$$

где N — число делений потенциометра. Значение U определяют по вольтметру блока питания. При данном положении движка A находят совокупность точек равного потенциала, т. е. эквипотенциаль. Изменяя положения движка и тем самым меняя отношение $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$, находят серию эквипотенциалей, со-

ответствующих $\varphi_1 = 0,1U$; $\varphi_2 = 0,2U$ и т. д. Величина U не влияет на картину поля. Так, в частности, эквипотенциаль $0,1U$ остаётся на одном и том же месте при $U = 10$ В и $U = 20$ В, только в первом случае абсолютное значение потенциала на ней будет 1 В, во втором — 2 В.

Положение точек равного потенциала фиксируют на миллиметровой бумаге с помощью пантографа (рис. 1.3). *Пантограф* — прибор, служащий для копирования рисунков с изменением или без изменения масштаба оригинала. Система рычагов на шарнирах обеспечивает перемещение иглы (карандаша) по

бумаге. При движении зонда вдоль эквипотенциали на поверхности воды карандаш отмечает ряд точек, повторяя форму эквипотенциали на бумаге. Масштаб изображения определяют как отношение длин плеч рычагов.

Вариант Б

Экспериментальная установка представлена на [рис. 1.5](#). Установка выполнена на базе микропроцессорной техники и снабжена цифровыми системами управления и измерения и жидкокристаллическим дисплеем.

В плоский сосуд (ванну), заполненный водой, устанавливаются электроды **A** и **K** (катод и анод), которые прикрепляются к держателям ([рис. 1.5А](#)). Электроды являются сменными и позволяют моделировать электрическое поле, возникающее при различных конфигурациях анода и катода. Электроды **1** и **2** (см. [рис. 1.5Б](#)) подключаются к выходам «+» и «-» учебной установки (катод и анод выбираются произвольно) соединительными проводами. Для измерения потенциала точки поля используется специально собранный цифровой вольтметр «ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР» с высоким входным сопротивлением. Потенциал точки поля измеряется относительно потенциала катода (при этом потенциал катода принимается равным нулю). Постоянное напряжение 5 В подаётся от специального стабилизированного источника питания **ИП**, находящегося внутри лабораторного модуля ФЭЛ-8.

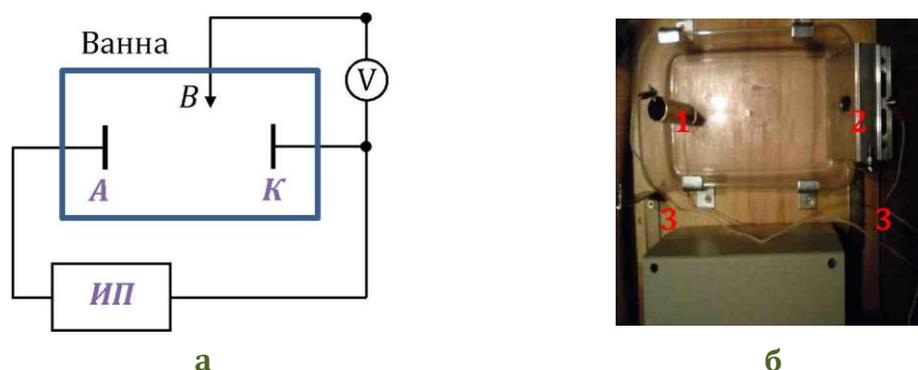


Рис. 1.5

Зонд **B** соединяется с измерительным вольтметром **V**. Потенциал зонда равен потенциалу того места, где находится зонд. При касании зондом какой-либо точки граничной плоскости вольтметр покажет потенциал этой точки относительно катода. Точность измерения потенциала вольтметром составляет 0,02 В. Измеряя потенциалы различных точек, имеющих один и тот же потенциал, можно построить систему эквипотенциалей, затем изобразить совокупность силовых линий и при необходимости вычислить напряжённость в любой точке поля по формуле (1). Положение точек равного потенциала фиксируют на миллиметровой бумаге с помощью пантографа (см. [ВАРИАНТ А](#)).

2. Порядок выполнения работы

Вариант А

1. Установите электроды в ванне так, чтобы они выступали из воды на 2-3 мм.
2. Укрепив на столе пантографа лист миллиметровой бумаги, отметьте на ней положение электродов. Для этого, обязательно отключив напряжение U , приблизьте зонд вплотную к электроду и с помощью пантографа отметьте на бумаге несколько точек. По ним проведите линию, изображающую пересечение электрода с поверхностью воды.

3. Включите источник питания БП, установите напряжение 10-20 В и запишите значение U .
4. Наблюдайте изображение на экране осциллографа. Фактически в силу особенностей электрической цепи вместо прямой на экране виден эллипс. Однако всё сказанное выше об ориентации этой прямой справедливо для большой оси эллипса. Величину оси эллипса регулируют ручкой «Усиление» осциллографа. Добиваются расположения эллипса в центре экрана с помощью ручек «смещ. X », «смещ. Y ». Остальные ручки осциллографа влияния на изображение не оказывают.
5. Снимите картины 2-3 полей (форма и расположение электродов задаются преподавателем). Для этого установите движок потенциометра так, чтобы потенциал зонда составлял $0,1U$ (или $0,2U$). Перемещая зонд, с помощью пантографа отметьте карандашом на бумаге точки, соответствующие данной эквипотенциали. Точки отмечайте для тех положений зонда, при которых прямая (или большая ось эллипса) занимает горизонтальное положение.
6. Повторите действия п. 5 для других эквипотенциалей через каждые $0,1U$ ($0,2U$). Для этого перемещайте движок на одно (два) деление вдоль всего потенциометра.

Вариант Б

1. Установите электроды в ванне так, чтобы они выступали из воды на 2-3 мм.
2. Укрепив на столе пантографа лист миллиметровой бумаги, отметьте на ней положение электродов. Для этого приблизьте зонд вплотную к электроду и с помощью пантографа отметьте на бумаге несколько точек. По ним проведите линию, изображающую пересечение электрода с поверхностью воды.
3. Проверьте целостность сетевого провода и включите установку в сеть ~ 220 В. Поставьте переключатель «СЕТЬ» в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный индикатор, и дайте прибору прогреться в течение не менее 5 минут.
4. Подключите измерительный зонд к выходу лабораторного модуля «ИЗМЕРЕНИЕ». Определите потенциал анода φ_a , прикоснувшись к нему измерительным зондом. Проверьте равенство нулю потенциала катода φ_k .
5. Постройте эквипотенциали, в которых потенциал имеет значение $\varphi_1 = 1,5$ В. Для этого следует, плавно перемещая зонд в ванне, наблюдать за показаниями цифрового вольтметра. В некоторой точке вольтметр покажет значение потенциала φ_1 . Это и будет первая точка эквипотенциальной линии. Отметьте с помощью пантографа положение этой точки на миллиметровке. Аналогичным образом постройте другие точки эквипотенциали так, чтобы расстояние между двумя соседними точками одной и той же эквипотенциали составляло на миллиметровой бумаге от 0,5 см до 3-4 см в зависимости от сложности формы эквипотенциали. Необходимо учитывать, что измерительный вольтметр обеспечивает точные показания только при нахождении зонда в жидкости; при нахождении его в воздухе на дисплее будут наблюдаться «шумовые» эффекты, связанные с работой АЦП вольтметра. Измерения проводите с точностью до 0,1 В. Постройте эквипотенциаль, соединив полученные точки плавной кривой.
6. Постройте другие эквипотенциали со значениями потенциала от 1,5 до 5 В с интервалом 0,3-0,5 В (величина интервала задаётся преподавателем).

7. Снимите картины двух полей (форма и расположение электродов задаются преподавателем).

3. Обработка результатов измерений

1. Снимите лист миллиметровой бумаги и по найденным точкам прочертите эквипотенциали, для каждой из них отмечая соответствующее ей значение потенциала в долях U [см. формулу (3)] в варианте А или в вольтах в варианте Б.
2. Проведите силовые линии нормально к эквипотенциалам, в том числе и к электродам: поверхность одного из электродов разбейте с равным шагом и далее по нормальям из этих точек проведите искомые силовые линии.
3. По экспериментальным точкам постройте график зависимости потенциала от расстояния $\varphi(l)$ по направлению, указанному преподавателем. За начало отсчёта l примите электрод с нулевым потенциалом.
4. Постройте график зависимости проекции напряжённости E_l на направление, заданное преподавателем (см. п. 3) от l .
5. Вычислите по формуле (2) поверхностную плотность заряда в произвольной точке электрода; $\Delta\varphi$ найдите из графической картины поля как разность потенциалов этого электрода и ближайшей к нему эквипотенциали. Величину $\Delta\varphi$ выразите в вольтах в соответствии с формулой (3). Значение Δl_n найдите с учётом масштаба изображения.

Дополнительное задание (по указанию преподавателя)

1. Постройте график распределения поверхностной плотности заряда σ по длине плоского электрода. Продумайте, как, пользуясь этим графиком, найти заряд электрода q .
2. Определив напряжённость электрического поля вблизи поверхности электродов, найдите графически поток \vec{E} сквозь замкнутые поверхности S , окружающие эти электроды.
3. В предположении, что между электродами — вакуум, найдите заряд на поверхности электрода. В расчётах используйте теорему Гаусса.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение напряжённости, разности потенциалов, потенциала электростатического поля.
2. Какова интегральная и дифференциальная связь между напряжённостью и потенциалом?
3. Что называется силовой линией, эквипотенциальной поверхностью, эквипотенциалью? Каково их взаимное расположение?
4. Поясните электрическую схему экспериментальной установки. Объясните принцип работы установки.
5. Каковы особенности структуры электростатического поля вблизи поверхности проводника?
6. Каковы физические условия возможности замены электростатического поля неподвижных зарядов электрическим полем стационарного тока?
7. Чему равны напряжённость поля и потенциал внутри исследуемых проводников?

8. В какой части поверхности проводника поверхностная плотность зарядов максимальна?
9. Две большие плоские параллельные пластины, находящиеся в вакууме на расстоянии d друг от друга, заряжены до разности потенциалов U . Найдите модуль напряжённости электрического поля в пространстве между пластинами. Считая заряды пластин одинаковыми по модулю, найдите поверхностную плотность заряда.
10. Две концентрические сферы радиусами R_1 и $R_2 > R_1$ имеют заряды Q_1 и Q_2 соответственно. Найдите зависимость проекции напряжённости электрического поля E_r на радиальное направление от расстояния r от центра сфер и постройте её график. Приняв потенциал равным нулю в бесконечно удалённой точке, найдите зависимость потенциала от расстояния от центра сфер и разность потенциалов между сферами; постройте график $\varphi(r)$. Постройте картину поля.

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЁМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА

Цель работы: экспериментальное определение электрической ёмкости конденсаторов.

Введение

Электрическая ёмкость конденсатора равна отношению его заряда q к разности потенциалов между обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}. \quad (1)$$

При соединении нескольких конденсаторов в батарею её общая электроёмкость зависит от способа их соединения. При параллельном соединении конденсаторов общая электрическая ёмкость

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i. \quad (2)$$

Если $n = 2$, то

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2.$$

Электроёмкость $C_{\text{посл}}$ батареи из последовательно соединённых конденсаторов определяется выражением

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}. \quad (3)$$

Если $n = 2$, то

$$C_{\text{посл}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Для измерения электрической ёмкости C достаточно измерить заряд конденсатора q при известной разности потенциалов U .

1. Описание установки и метода измерений

Заряд конденсатора измеряют с помощью *баллистического гальванометра*. Баллистический гальванометр относится к приборам магнитоэлектрической системы. Принцип его устройства показан на [рис. 2.1](#). Между полюсами постоянного магнита N, S , имеющими цилиндрическую форму, неподвижно закреплён стальной цилиндр. В зазоре возникает однородное радиально направленное магнитное поле. Между полюсами магнита и цилиндром может свободно вращаться рамка **1** с обмоткой из тонкой проволоки, подвешенная на металлической или кварцевой нити **2**. Для отсчёта углов поворота рамки служит зеркальце **3**, на которое падает свет от осветительного устройства. После отражения от зеркальца свет попадает на прозрачную шкалу.

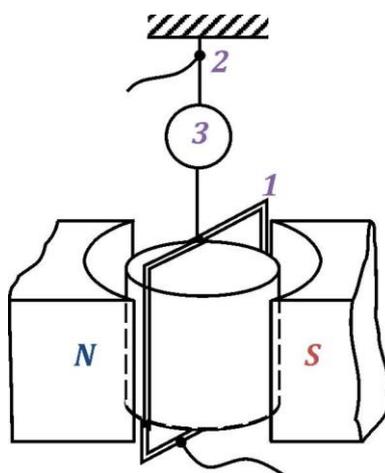


Рис. 2.1

Баллистический гальванометр используется для измерения заряда q , время τ протекания которого через обмотку подвижной рамки мало по сравнению с периодом T собственных колебаний рамки ($\tau \ll T$). Баллистический гальванометр отличается от обычных зеркальных гальванометров увеличенным значением момента инерции I его подвижной системы. Если через рамку гальванометра пропустить кратковременный импульс тока, то магнитное поле подействует на рамку. Вращающий момент равен $M = \beta i$, где β — коэффициент пропорциональности, i — мгновенное значение тока. Благодаря большому моменту инерции рамка за малое время τ практически не успевает выйти из положения равновесия, но она приобретает угловую скорость ω_0 и, следовательно, кинетическую энергию $\frac{I\omega_0^2}{2}$. Рамка начинает вращение по инерции с начальной угловой скоростью ω_0 и закручивает нить. В момент остановки рамки её начальная кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию закрученной нити $\frac{D\varphi_m^2}{2}$, где D — постоянная кручения нити, φ_m — максимальный угол отклонения рамки:

$$\frac{I\omega_0^2}{2} = \frac{D\varphi_m^2}{2}.$$

Из этого уравнения

$$\varphi_m = \omega_0 \sqrt{\frac{I}{D}}. \quad (4)$$

Уравнение динамики вращательного движения рамки $I \frac{d\omega}{dt} = M$ запишем в виде $I \cdot d\omega = \beta i \cdot dt$, где $i \cdot dt = dq$ — заряд, прошедший через рамку за время dt . После интегрирования

$$\int_0^{\omega_0} I d\omega = \int_0^q \beta dq$$

получим

$$I\omega_0 = \beta q. \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) $q = \frac{\sqrt{ID}\varphi_m}{\beta} = B\varphi_m$. Отклонение светового пятна измеряется в делениях шкалы n . Тогда заряд q определяется по формуле

$$q = C_6 n, \quad (6)$$

где C_6 — **баллистическая постоянная**, численно равная заряду, вызывающему максимальный отброс на одно деление шкалы, если шкала круговая с центром, совпадающим с осью вращения рамки. Если шкала плоская, то зависимость $q(n)$ — нелинейная. В этом случае необходима градуировка шкалы гальванометра. Для этого через гальванометр пропускают заряд q_3 конденсатора известной электрической ёмкости C_3 (*эталоны*) при различных значениях разности потенциалов U и измеряют отклонение светового пятна в делениях шкалы n .

Заряд q_3 рассчитывают по формуле

$$q_3 = C_3 U. \quad (7)$$

По градуировочному графику $q_3 = f(n)$ находят заряд q неизвестного конденсатора, соответствующий измеренному отклонению n светового пятна на шкале гальванометра.

Электрическую ёмкость конденсаторов вычисляют по формуле (1).

Схема экспериментальной установки показана на [рис. 2.2](#), где **БП** — блок питания, **G** — баллистический гальванометр, **V** — вольтметр, **П** — двойной переключатель. В положении **I** переключателя **П** конденсатор C заряжается; при переводе переключателя в положение **II** конденсатор разряжается через гальванометр. В этот момент измеряют максимальное отклонение светового пятна n по шкале гальванометра.

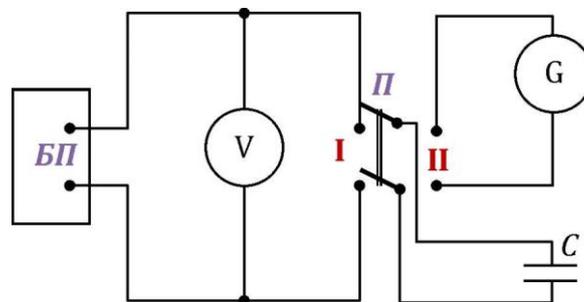


Рис. 2.2

2. Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. [Приложение 3](#)).
2. Соберите электрическую цепь по схеме [рис. 2.2](#), включая эталонный конденсатор C_3 .
3. С помощью ручки, расположенной на панели блока питания **БП**, установите разность потенциалов 4–5 В, измеряя её вольтметром **V**.
4. Зарядите конденсатор, установив переключатель **П** в положение **I**.
5. Переведите переключатель **П** в положение **II** и измерьте отброс светового пятна по шкале гальванометра (n).
6. Повторите измерения пп. 4–5, изменяя разность потенциалов U на 1 В до такого значения (10–14 В), при котором n будет максимально возможным в пределах шкалы. Результаты измерений запишите в [Таблицу 2.1](#).

7. Вместо эталонного конденсатора в схему включите исследуемый конденсатор C_1 . Измерения пп. 4–5 проведите при двух значениях U . Сначала установите U_1 , соответствующее максимальному отклонению n светового пятна на шкале гальванометра (при подборе U_1 следует начинать с малых значений разности потенциалов), а затем U_2 — приблизительно вдвое меньшее U_1 .

8. Замените конденсатор C_1 конденсатором C_2 . Повторите измерения пп. 4–5 при двух значениях U (см. п. 7), одно из значений U должно совпадать с предыдущим U_1 (или U_2).

9. Соедините конденсаторы C_1 и C_2 сначала параллельно, затем последовательно. Измерения n проведите при одном значении разности потенциалов U , совпадающем с U_1 (или U_2).

10. Результаты измерений пп. 7, 8, 9 запишите в [ТАБЛИЦУ 2.2](#).

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $C_3 = \dots$

Таблица 2.1

Градуировка шкалы гальванометра

№ п/п	U , В	n , дел.	q , мкКл

Таблица 2.2

Определение электрических ёмкостей неизвестных конденсаторов C_1 и C_2 и их соединений $C_{\text{пар}}$, $C_{\text{посл}}$

Конденсатор	U , В	n , дел.	C , мкФ	\bar{C} , мкФ
C_1				
C_2				
$C_{\text{пар}}$				
$C_{\text{посл}}$				

1. По формуле (7) вычислите q_3 для каждого значения разности потенциалов U (ТАБЛ. 2.1).

2. Постройте график зависимости $q_3 = f(n)$.

3. По градуировочному графику определите значение заряда q и вычислите электрические ёмкости C_1 , C_2 , $C_{\text{пар}}$, $C_{\text{посл}}$ по формуле (1), используя результаты ТАБЛ. 2.2.

4. Рассчитайте электроёмкости $C'_{\text{пар}}$ и $C'_{\text{посл}}$ по формулам (2) и (3).

5. Рассчитайте абсолютные погрешности ΔC_1 , ΔC_2 , $\Delta C_{\text{пар}}$, $\Delta C_{\text{посл}}$ по формуле

$$\Delta C = C \sqrt{\left(\frac{\Delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2},$$

Δq определяется по градуировочному графику ($\Delta q = \frac{dq}{dn} \Delta n$, $\Delta n = 1$ дел);

$$\Delta U = \frac{K \cdot U_{\max}}{100},$$

где K — класс точности электроизмерительного прибора, U_{\max} — максимальное значение измеряемой разности потенциалов на выбранном пределе вольтметра. Запишите результаты измерений в виде

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

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

6. Сравните разности значений общих электрических ёмкостей при параллельном (или последовательном) соединении конденсаторов $|C'_{\text{пар}} - C_{\text{пар}}|$ с погрешностью $\Delta(C'_{\text{пар}} - C_{\text{пар}})$ (или $|C'_{\text{посл}} - C_{\text{посл}}|$ с погрешностью $\Delta(C'_{\text{посл}} - C_{\text{посл}})$):

$$\Delta(C'_{\text{пар}} - C_{\text{пар}}) = \sqrt{\Delta C_{\text{пар}}'^2 + \Delta C_{\text{пар}}^2},$$

$$\Delta(C'_{\text{посл}} - C_{\text{посл}}) = \sqrt{\Delta C_{\text{посл}}'^2 + \Delta C_{\text{посл}}^2},$$

где

$$\Delta C'_{\text{пар}} = \sqrt{\Delta C_1^2 + \Delta C_2^2},$$

$$\Delta C'_{\text{посл}} = C'_{\text{посл}} \sqrt{\left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_2}{C_2}\right)^2 + \frac{\Delta C_1^2 + \Delta C_2^2}{C_1 C_2}}.$$

Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение электроёмкости уединённого проводника, конденсатора. В каких единицах измеряют эту величину?
2. От каких величин зависит ёмкость плоского конденсатора? Изменяется ли ёмкость конденсатора при изменении разности потенциалов между его обкладками?
3. Выведите формулы для электроёмкости батареи конденсаторов при параллельном и последовательном их соединении.
4. Рассчитайте напряжённость электростатического поля в плоском воздушном конденсаторе.
5. Выведите формулу для расчёта электроёмкости плоского конденсатора.
6. Рассчитайте электрическую ёмкость плоского конденсатора, заполненного двумя слоями диэлектриков параллельно обкладкам (относительные диэлектрические проницаемости ϵ_1, ϵ_2).
7. Рассчитайте электроёмкость плоского конденсатора, погружённого наполовину в диэлектрик с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ (граница диэлектрика перпендикулярна пластинам конденсатора).
8. Как устроен баллистический гальванометр? Что он измеряет?
9. С какой целью проводится градуировка гальванометра?
10. Как по величине измеряемого заряда рассчитывают неизвестную ёмкость?

Лабораторная работа № 3 ВЕСЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: определение разности потенциалов между двумя параллельными плоскими пластинами с использованием явления взаимного притяжения пластин.

Введение

Пусть две заряженные пластины, расстояние между которыми равно d , образуют плоский конденсатор ([рис. 3.1](#)). Установим связь между силой взаимодействия пластин F и разностью потенциалов U между ними. Нижняя пластина с зарядом $-q$ находится в электростатическом поле, создаваемом верхней пластиной с зарядом $+q$. Если расстояние между пластинами много меньше их линейных размеров, то электростатическое поле верхней пластины можно считать однородным. Тогда модуль силы притяжения, с которой положительно заряженная пластина действует на отрицательно заряженную, определяется формулой

$$F = qE, \quad (1)$$

где E — модуль напряжённости электростатического поля, создаваемого верхней пластиной, q — модуль заряда нижней пластины. Направление этой силы показано на [рис. 3.1](#).

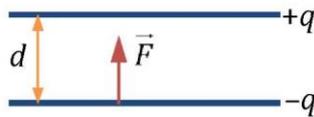


Рис. 3.1

Модуль напряжённости электростатического поля E , создаваемого верхней пластиной, в приближении бесконечно большой плоскости, определяется по формуле

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}, \quad (2)$$

где $\sigma = \frac{q}{S}$ — поверхностная плотность заряда на верхней пластине, S — площадь верхней пластины, ε_0 — электрическая постоянная (см. [Приложение 5](#)).

Заряд пластины q определяется электрической ёмкостью конденсатора C и разностью потенциалов U между пластинами:

$$q = CU, \quad (3)$$

где $C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$ — электрическая ёмкость плоского конденсатора.

С учётом [\(2\)](#) и [\(3\)](#) модуль силы притяжения пластин

$$F = \frac{q^2}{2\varepsilon_0 S} = \frac{\varepsilon_0 S}{2d^2} U^2. \quad (4)$$

Из [\(4\)](#) находим разность потенциалов:

$$U = d \sqrt{\frac{2F}{\varepsilon_0 S}}. \quad (5)$$

Если пластины круглые ($S = \frac{\pi D^2}{4}$, где D — диаметр пластин), то формула (5) примет вид

$$U = \frac{2d}{D} \sqrt{\frac{2F}{\pi \epsilon_0}}. \quad (6)$$

1. Описание установки и метода измерений

Для определения разности потенциалов, приложенной к двум параллельно расположенным пластинам, служит прибор, называемый *весами напряжения* (рис. 3.2). Медная круглая пластина M укреплена неподвижно на изолированной подставке; сверху на пластине M расположены эбонитовые изоляторы. Над пластиной помещён диск A из алюминиевой фольги того же диаметра, что и пластина M . Эти пластины образуют плоский конденсатор. Для получения однородного поля между пластинами они располагаются на расстоянии d , малом по сравнению с диаметром D пластин. Диск A подвешен на металлических нитях H и на металлической пружине Π , по удлинению которой можно определить силу взаимодействия пластин. При подаче напряжения (через повышающий трансформатор) диск A под действием электрического поля притягивается к диску M . Если, не выключая напряжения, вращением блока B медленно растянуть пружину до отрыва диска A от пластины M , то модуль силы упругости пружины станет равным модулю силы притяжения заряженных пластин: $F_{\text{упр}} = F$.

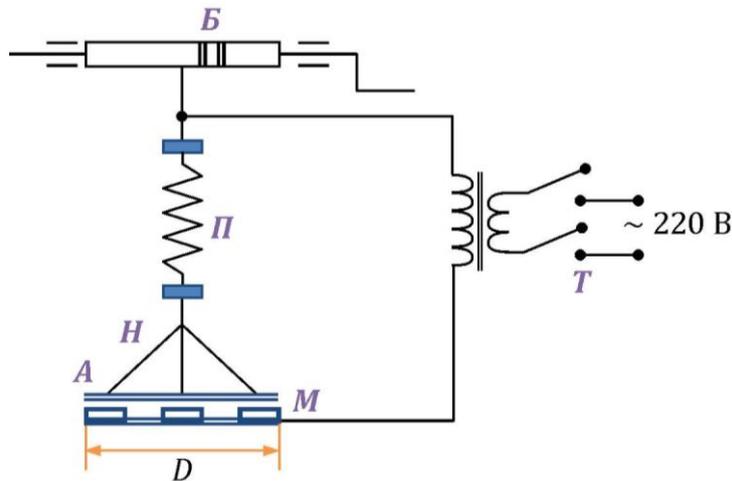


Рис. 3.2

Модуль силы упругости пружины

$$F_{\text{упр}} = k\Delta l, \quad (7)$$

где k — коэффициент жёсткости пружины (значение k дано на установке). Изменение длины пружины Δl определяют с помощью катетометра, показанного на рис. 3.3. Перемещением рейки P добиваются совмещения визирной нити B и нижней метки на пружине Π . Отсчёт проводят по шкале, нанесённой на стойке, с помощью нониуса K , цена деления которого равна 0,1 мм. Измеряемая разность потенциалов подаётся на пластины A и M от вторичной обмотки повышающего трансформатора. В работе измеряется амплитудное значение переменного напряжения.

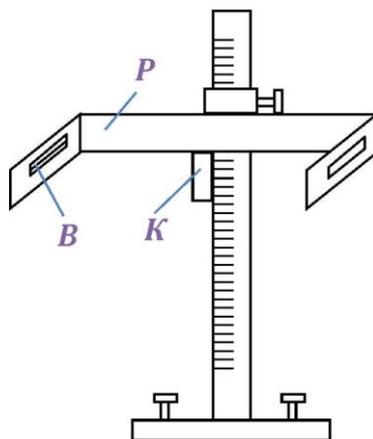


Рис. 3.3

2. Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 3](#)) и запишите данные установки.
2. С помощью блока *Б* опустите диск *А* на расстояние 0,5–1 мм от эбонитовых изоляторов.
3. Включите тумблер *Т* на корпусе прибора. Под действием электрического поля диск *А* притянется к диску *М* и опустится на изоляторы.
4. С помощью катетометра измерьте положение h_1 нижней метки на пружине *П*.
5. Не выключая напряжения, медленно поверните блок *Б* до отрыва диска *А* от изоляторов.
6. После затухания колебаний диска *А* определите новое положение h_2 нижней метки на пружине *П*.
7. Выключите напряжение тумблером *Т*.
8. Повторите пп. 2–7 ещё два раза. Результаты запишите в [ТАБЛИЦУ 3.1](#).

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $d = \dots$; $D = \dots$; $k = \dots$

Таблица 3.1

Измерение разности потенциалов

№ п/п	h_1 , мм	h_2 , мм	Δl , мм	F , Н	U , В
1					
2					
3					
Среднее					

1. Вычислите удлинение (деформацию) пружины $\Delta l = \bar{h}_2 - \bar{h}_1$.
2. Рассчитайте силу взаимодействия пластин по формуле (7).
3. Найдите амплитудное значение переменной разности потенциалов U по формуле (6).
4. Обработайте результаты прямых измерений:

$$\Delta h_{1\text{сл}} = 4,30 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (\bar{h}_1 - h_{1i})^2}{6}},$$

$$\Delta h_1 = \sqrt{\Delta h_{1\text{сл}}^2 + \Delta h_{1\text{инс}}^2},$$

здесь 4,30 — коэффициент Стьюдента для серии из 3 измерений с надёжностью 0,95. Представьте окончательный результат измерения h_1 в виде

$$h_1 = \bar{h}_1 \pm \Delta h_1$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)). Аналогично получите окончательный результат для h_2 .

5. Рассчитайте погрешность ΔU :

$$\frac{\Delta F}{F} = \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \frac{\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2}{(h_2 - h_1)^2}},$$

$$\Delta U = U \sqrt{\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2}.$$

(Относительные погрешности $\frac{\Delta \pi}{\pi}$ и $\frac{\Delta \varepsilon_0}{\varepsilon_0}$ малы, ими можно пренебречь). Запишите окончательные результаты в виде

$$F = \bar{F} \pm \Delta F, \quad U = \bar{U} \pm \Delta U$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

6. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. В чём заключается метод определения разности потенциалов U в данной работе?
2. Какие предположения были сделаны при выводе расчётной формулы (4)?
3. Выведите формулу напряжённости электрического поля бесконечно большой, равномерно заряженной пластины, используя теорему Остроградского-Гаусса.
4. Выведите формулу для расчёта силы взаимодействия двух параллельных пластин бесконечных размеров, имеющих одинаковые по модулю, но разные по знаку заряды.
5. Как изменится сила взаимодействия пластин плоского конденсатора, если его опустить в жидкий диэлектрик?
6. Как изменится сила взаимодействия пластин после отключения напряжения?
7. От чего зависит разность потенциалов между двумя заряженными пластинами?
8. Выведите формулу (6) для расчёта разности потенциалов между заряженными пластинами.
9. Для чего в работе используется катетометр?
10. С какой силой две большие пластины с зарядами $q_1 = -Q$ и $q_2 = 2Q$ действуют на пластину с зарядом $q_3 = -Q$? Все пластины параллельны друг другу.

Лабораторная работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЁМКОСТИ КООКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ И ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА

Цель работы: экспериментальное определение и теоретический расчёт электрической ёмкости плоского конденсатора и коаксиального кабеля; расчёт диэлектрической проницаемости твёрдого диэлектрика, помещённого между обкладками плоского конденсатора.

Введение

Электрическая ёмкость конденсатора определяется отношением заряда одной из обкладок конденсатора к разности потенциалов между его обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}.$$

Электрическая ёмкость зависит от геометрии конденсаторов (формы, размеров обкладок, расстояния между ними), а также от диэлектрических свойств среды, заполняющей пространство между обкладками.

Ёмкость *коаксиального кабеля* рассчитывается по формуле ёмкости цилиндрического конденсатора ([рис. 4.1](#))

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon h}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (1)$$

где h — длина кабеля; R_2 и R_1 — соответственно радиусы внешнего и внутреннего проводников; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость материала, находящегося между обкладками; ϵ_0 — электрическая постоянная (см. [Приложение 5](#)). Ёмкость плоского конденсатора рассчитывается по формуле

$$C = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{d},$$

где S — площадь пластин, d — расстояние между пластинами.

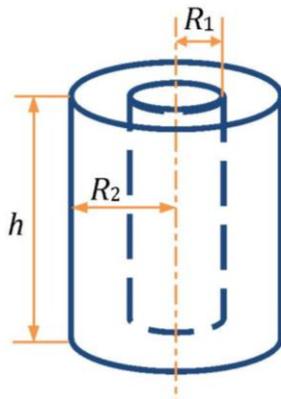


Рис. 4.1

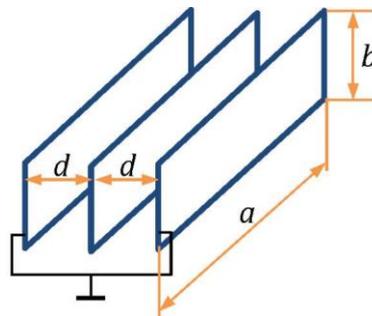


Рис. 4.2

В лабораторной установке плоский конденсатор выполнен в виде трёх металлических пластин, соединённых, как показано на [рис. 4.2](#). Ёмкость такой системы равна ёмкости двух одинаковых конденсаторов, соединённых параллельно:

$$C_2 = 2 \frac{\varepsilon_0 ab}{d}, \quad (2)$$

где a — длина пластин, b — высота пластин, d — расстояние между двумя соседними пластинами.

Подобная конструкция благодаря заземлению двух внешних пластин позволяет избежать влияния окружающих тел на электроёмкость системы. Рассчитанные по формулам (1) и (2) электроёмкости сравнивают с их экспериментальными значениями.

Для определения относительной диэлектрической проницаемости ε диэлектрика между пластинами плоского конденсатора вставляют пластины диэлектрика длиной a и высотой b . Для того чтобы диэлектрик был плотно прижат к металлическим обкладкам конденсатора, диэлектрические пластины с обеих сторон покрыты слоем металла. Тогда получится конденсатор без воздушного зазора, но с чуть меньшим, чем на рис. 4.2, расстоянием d_1 между обкладками. Электроёмкость такой системы конденсаторов, заполненных диэлектриком,

$$C' = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon ab}{d_1}. \quad (3)$$

Определив экспериментально значение ёмкости C' , а также зная a, b, d_1 , можно рассчитать из (3) относительную диэлектрическую проницаемость диэлектрика

$$\varepsilon = \frac{C' d_1}{2\varepsilon_0 ab}. \quad (4)$$

1. Описание установки и метода измерений

Исследуемый конденсатор C_x через сопротивление R подключён к источнику переменного напряжения — низкочастотному генератору сигналов Γ (рис. 4.3).

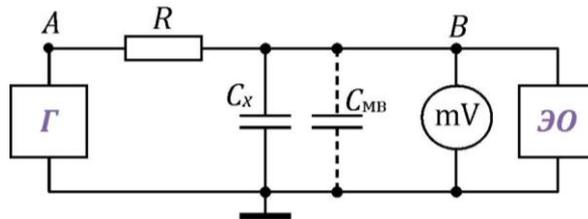


Рис. 4.3

Выходное напряжение генератора изменяется по закону $U = U_0 \cos \omega t$. Полная ёмкость цепи, схема которой показана на рис. 4.3, будет включать в себя исследуемую ёмкость C_x и ёмкость $C_{мв}$, вносимую в цепь соединительным кабелем и входной цепью милливольтметра. Так как эта ёмкость включена параллельно конденсатору C_x , то $C = C_x + C_{мв}$. Кроме того, кабель и измерительные приборы вносят в цепь и некоторую индуктивность L . В результате образуется RLC -цепочка, полное сопротивление которой в цепи переменного тока определяется по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Таким образом, сила тока в цепи, равная $\frac{U}{Z}$, в общем случае определяется активным сопротивлением R , индуктивным сопротивлением $X_L = \omega L$ и ёмкостным сопротивлением $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Если подобрать величину сопротивления R так, чтобы выполнялось условие $R \gg \left| \omega L - \frac{1}{\omega C} \right|$, то с достаточной точностью можно считать силу тока в цепи равной

$$I = \frac{U}{Z} \approx \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \cos \omega t.$$

В данной работе $R = 30$ кОм.

По закону Ома разность потенциалов на обкладках конденсатора равна произведению

$$U_c = I \cdot X_C = \frac{1}{\omega C} \cdot \frac{U_0}{R} \cos \omega t.$$

Выражение $U_0 / \omega RC = U_{0c}$ является амплитудным значением напряжения на конденсаторе и может быть измерено милливольтметром mV (рис. 4.3); U_0 — показание милливольтметра, присоединённого непосредственно к клеммам генератора; $\omega = 2\pi\nu$, где ν — частота сигнала генератора.

Тогда электрическая ёмкость цепи

$$C = \frac{U_0}{2\pi\nu R U_{0c}}. \quad (5)$$

Так как в эту формулу входит отношение напряжений, то оказывается несущественным, как именно проградуирован милливольтметр (по эффективным значениям или по амплитудным).

Так как электроёмкость C из формулы (5) представляет собой сумму ёмкостей исследуемого конденсатора C_x и милливольтметра $C_{мв}$ (на рис. 4.3 изображена пунктиром), электрическая ёмкость C_x определяется по формуле

$$C_x = \frac{U_0}{2\pi\nu R U_{0c}} - C_{мв}. \quad (6)$$

Следовательно, предварительно необходимо найти ёмкость, вносимую кабелем милливольтметра — $C_{мв}$. Для этого подключают к генератору через сопротивление R только милливольтметр (без C_x). Величину $C_{мв}$ рассчитывают по формуле (5), заменив U_{0c} на $U_{0мв}$:

$$C_{мв} = \frac{U_0}{2\pi\nu R U_{0мв}}, \quad (7)$$

где $U_{0мв}$ — показание милливольтметра в цепи с отключённой ёмкостью C_x . При проведении всех измерений необходимо отсоединять осциллограф, так как он обладает ёмкостью. В данной работе осциллограф предназначен для наблюдения качественной картины изменения напряжения при внесении диэлектрика между пластинами конденсатора.

2. Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 3](#)). Для милливольтметра укажите используемые пределы измерения и соответствующие им цену деления и класс точности.
2. Для определения ёмкости милливольтметра $C_{мв}$ соберите цепь по схеме [РИС. 4.3](#) без конденсатора C_x и осциллографа. Для удобства подключения кабелей приборов на стенде вмонтирована панель с двумя рядами клемм. В верхнем ряду между второй и третьей клеммами включено сопротивление $R = 30$ кОм. При подключении приборов следите за тем, чтобы концы кабелей генератора, милливольтметра, осциллографа с обозначением «земля» (\perp) были вставлены в нижний ряд клемм.
3. Включите генератор и милливольтметр тумблером «Сеть».
4. Установите на шкале частот одно из значений ν , указанное на стенде установки (100–200 кГц).
5. С помощью ручек «Регулировка выхода» установите на вольтметре генератора рекомендуемое значение напряжения 8–10 В.
6. Точное значение U_0 на заданной частоте ν установите по милливольтметру, перебросив один конец его кабеля с клеммы B на клемму A ([РИС. 4.3](#)). При этом предел измерения на ламповом вольтметре должен быть не менее 10 В.
7. Верните конец кабеля милливольтметра на клемму B и измерьте милливольтметром значение $U_{0мв}$. Предел измерения милливольтметра — 3–10 В. Необходимо помнить, что предел измерения милливольтметра всегда выбирают таким образом, чтобы стрелка прибора отклонялась не меньше, чем на половину шкалы. Значения ν , U_0 , $U_{0мв}$ запишите в [ТАБЛ. 4.3](#).
8. Повторите пп. 4–7 для другой частоты сигнала генератора.
9. Включите в цепь по схеме [РИС. 4.3](#) плоский конденсатор (без диэлектрика). Установите те же частоты сигнала генератора, что и в пп. 4–8. Запишите показания милливольтметра $U_{0с}$ (предел измерений 1–3 В) в [ТАБЛ. 4.4](#).
10. Присоедините осциллограф параллельно конденсатору. С помощью ручек «Стабильность» и «Уровень» добейтесь устойчивого изображения сигнала на экране. Вставьте в зазор между пластинами конденсатора пластины диэлектрика и наблюдайте на экране качественную картину изменения разности потенциалов на конденсаторе. Положения всех ручек осциллографа и генератора приведены на стенде установки.
11. Отсоедините осциллограф. Для тех же частот запишите показания милливольтметра $U'_{0с}$ для случая, когда между пластинами конденсатора находится диэлектрик (предел измерения 1 В или 300 мВ) в [ТАБЛ. 4.5](#).
12. Вместо плоского конденсатора в цепь по схеме [РИС. 4.3](#) включите коаксиальный кабель и проведите для него измерения $U''_{0с}$ (пределы измерений 1 В, 3 В) так же, как в пп. 10, 11. Показания милливольтметра запишите в [ТАБЛ. 4.6](#).

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $\varepsilon = 2,5$; $R = 30$ кОм; $a = \dots$; $b = \dots$; $d = \dots$, $d_1 = \dots$

Таблица 4.1

*Теоретический расчёт ёмкости
кабеля*

h , м	R_1 , м	R_2 , м	C_1 , пФ

Таблица 4.2

*Теоретический расчёт ёмкости
плоского конденсатора*

a , м	b , м	d , м	C_2 , пФ

Таблица 4.3

*Определение ёмкости
милливольтметра*

ν , кГц	U_0 , В	U_{0MB} , В	C_{MB} , пФ

Таблица 4.4

*Определение ёмкости системы
плоских конденсаторов
без диэлектрика*

ν , кГц	U_0 , В	U_{0C} , В	C_x , пФ

Таблица 4.5

*Определение относительной ди-
электрической
проницаемости
твёрдого диэлектрика*

ν , кГц	U_0 , В	U'_{0C} , В	C'_x , пФ	ε
				$\bar{\varepsilon}$

Таблица 4.6

*Определение ёмкости
коаксиального кабеля*

ν , кГц	U_0 , В	U''_{0C} , В	C''_x , пФ

1. По данным, приведённым на стенде установки, рассчитайте по формуле (1) ёмкость коаксиального кабеля C_1 , а по формуле (2) — ёмкость системы плоских конденсаторов C_2 .
2. Рассчитайте ёмкость милливольтметра C_{MB} по формуле (7), а ёмкость системы плоских конденсаторов C_x — по формуле (6).
3. Вычислите по формуле (6) значение ёмкости системы плоских конденсаторов с диэлектриком C'_x .
4. Рассчитайте значение диэлектрической проницаемости диэлектрика ε по формуле (4), подставив экспериментальное значение ёмкости C'_x и значение d_1 (см. данные на стенде установки).
5. Рассчитайте ёмкость коаксиального кабеля по формуле (6).
6. Определите погрешности расчёта ёмкостей C_x и C''_x системы плоских конденсаторов и коаксиального кабеля для одной частоты сигнала генератора по формуле

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \left\{ \left(\frac{\Delta U_0}{U_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{v} \right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2 + \frac{1}{(U_{0MB} - U_{0C})^2} \left[\left(\frac{U_{0MB}}{U_{0C}} \right)^2 (\Delta U_{0C})^2 + \left(\frac{U_{0C}}{U_{0MB}} \right)^2 (\Delta U_{0MB})^2 \right] \right\}^{1/2},$$

где $\frac{\Delta v}{v} = 0,02$; $\frac{\Delta R}{R} = 0,05$. Запишите окончательные результаты в виде

$$C_x = \bar{C}_x \pm \Delta C_x$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

7. Сравните экспериментальное значение C_x с теоретическим значением ёмкости C_2 , проверив выполнение неравенства

$$|C_x - C_2| \leq \sqrt{(\Delta C_x)^2 + (\Delta C_2)^2},$$

учитывая, что $\frac{\Delta C_2}{C_2} = 0,05$. Сделайте выводы. (Расхождения между этими величинами могут достигать 15–20%. Это связано с наличием краевых эффектов, влияние которых сказывается на увеличении ёмкости за счёт выхода электрического поля за пределы пластин.)

8. Аналогично п. 7 сравните экспериментальное значение C_x'' кабеля с теоретическим значением его ёмкости C_1 , учитывая, что $\frac{\Delta C_2}{C_2} = 0,05$. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение конденсатора. В чём назначение конденсаторов?
2. Дайте определение электрической ёмкости: ёмкости уединённого проводника, взаимной ёмкости двух проводников, ёмкости конденсатора. От чего зависит электрическая ёмкость?
3. Дайте определение относительной диэлектрической проницаемости вещества. В чём состоит её физический смысл?
4. Получите теоретические формулы [\(1\)](#) и [\(2\)](#).
5. В чём состоит метод определения ёмкости конденсатора в данной работе? Каково назначение каждого прибора в схеме [рис. 4.3](#)?
6. Зависит ли ёмкость конденсатора от частоты подаваемого напряжения? Подтвердите ответ результатами измерений.
7. Выведите формулу для расчёта C_x . В каком приближении она получена?
8. С какой целью и как измеряют ёмкость, вносимую кабелем милливольтметра?
9. Как изменится ёмкость плоского конденсатора, исследуемого в данной работе, если в него вставить только одну диэлектрическую пластину?
10. Как изменится ёмкость плоского конденсатора в данной работе, если в него вставить металлическую пластину толщиной $d/4$?

Лабораторная работа № 5 ИЗУЧЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ

Цель работы: определение относительной диэлектрической проницаемости жидкости и изучение её зависимости от частоты.

Введение

Диэлектрические свойства жидкостей обусловлены структурой молекул, из которых состоят эти жидкости. С этой точки зрения все молекулы можно разбить на две группы, отличающиеся своим поведением во внешнем электрическом поле. Первая группа характеризуется симметричным расположением электрических зарядов. В этих молекулах (H_2 , N_2) центры тяжести зарядов разных знаков совмещены и дипольный момент \vec{p}_e молекул в отсутствие внешнего поля равен нулю. Поэтому такие молекулы называют **неполярными**. Ко второй группе относятся молекулы, которые обладают несимметричным распределением заряда (например, H_2O) и, как следствие этого, отличным от нуля собственным дипольным моментом, модуль которого $p_e = ql$, где q — **заряд диполя**, равный по модулю заряду каждого из полюсов диполя, l — расстояние между центрами тяжести этих зарядов. Такие молекулы называются **полярными**.

Процесс поляризации неполярной молекулы сводится к смещению центров тяжести зарядов друг относительно друга: положительных — по направлению поля, отрицательных — против. В результате молекула приобретает дипольный момент $p_e = ql$. Тепловое движение почти не влияет на процесс поляризации неполярных молекул.

Действие внешнего поля на полярную молекулу заключается в ориентации вдоль поля уже имеющихся в диэлектрике диполей. Эта ориентация будет тем полнее, чем сильнее электрическое поле и чем слабее тепловое движение, т. е. ниже температура. Следовательно, для диэлектриков с полярными молекулами относительная диэлектрическая проницаемость ϵ уменьшается с ростом температуры.

Диэлектрическую проницаемость ϵ легко найти из отношения $\epsilon = C_d/C_b$, где C_d — ёмкость конденсатора, между обкладками которого находится диэлектрик; C_b — ёмкость того же конденсатора без диэлектрика, т. е. воздушного конденсатора.

1. Описание установки и метода измерений

Для того чтобы определить диэлектрическую проницаемость вещества, нужно знать ёмкость конденсатора с диэлектриком и без него. Для этого можно воспользоваться цепью, состоящей из низкочастотного генератора G , напряжения которого изменяется по закону $U = U_0 \cos \omega t$, сопротивления R , конденсатора C_x , милливольтметра mV и осциллографа \mathcal{EO} (см. схему [рис. 5.1](#)).

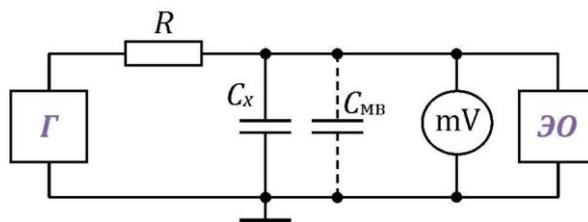


Рис. 5.1

Показанная на схеме [рис. 5.1](#) пунктиром ёмкость $C_{\text{МВ}}$ вносится в цепь соединительным кабелем и входной цепью милливольтметра. Так как эта ёмкость включена параллельно конденсатору C_x , то в общем случае $C = C_x + C_{\text{МВ}}$. Кроме того, кабель и измерительные приборы вносят в цепь и некоторую индуктивность L . В результате образуется RLC -цепочка, полное сопротивление которой в цепи переменного тока определяется по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Сила тока в цепи, равная $I = \frac{U}{Z}$, в общем случае определяется активным сопротивлением R , индуктивным сопротивлением $X_L = \omega L$ и ёмкостным сопротивлением $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Если подобрать величину сопротивления R так, чтобы выполнялось условие $R \gg \left|\omega L - \frac{1}{\omega C}\right|$, то влияние других параметров на силу тока в цепи будет малым. В этом приближении с достаточно высокой точностью можно считать силу тока в цепи равной $I = \frac{U}{Z} \approx \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \cos \omega t$.

Зная силу тока в цепи и ёмкостное сопротивление $X_C = \frac{1}{\omega C}$, по закону Ома находим разность потенциалов на пластинах конденсатора

$$U = I \cdot X_C = \frac{1}{\omega C} \frac{U_0}{R} \cos \omega t.$$

Выражение $\frac{U_0}{\omega CR} = U_{0C}$ является амплитудным значением разности потенциалов на обкладках конденсатора и может быть измерено милливольтметром. Сохраняя постоянными напряжение генератора U_0 , циклическую частоту сигнала ω и сопротивление R и зная амплитудное значение напряжения на конденсаторе U_{0C} , можно найти ёмкость конденсатора C :

$$C = \frac{U_0}{\omega R U_{0C}}. \quad (1)$$

Так как ёмкость C (см. схему на [рис. 5.1](#)) включает в себя как ёмкость исследуемого конденсатора C_x , так и включённую параллельно ему ёмкость входной цепи милливольтметра $C_{\text{МВ}}$ ($C = C_x + C_{\text{МВ}}$), то необходимо провести серию из трёх измерений для определения ёмкостей $C_{\text{МВ}}$, C_d и C_B .

Для определения ёмкости входной цепи милливольтметра $C_{\text{МВ}}$ отключим исследуемый конденсатор C_x от цепи. Тогда $C = C_{\text{МВ}}$. Измерив амплитудное значение напряжения на входе милливольтметра $U_{0C} = U_{\text{МВ}}$, по формуле [\(1\)](#) найдём

$$C_{\text{МВ}} = \frac{U_0}{\omega R U_{\text{МВ}}}. \quad (2)$$

Подсоединим ёмкость C_B без диэлектрика к цепи. Тогда $C = C_B + C_{\text{МВ}}$. Измерив милливольтметром напряжение на конденсаторе ($U_{0C} = U_B$), по формуле [\(1\)](#) найдём

$$C_{\text{мв}} + C_{\text{в}} = \frac{U_0}{\omega R U_{\text{в}}}. \quad (3)$$

Повторив опыт с конденсатором, полностью погружённым в диэлектрик, получим

$$C_{\text{мв}} + C_{\text{д}} = \frac{U_0}{\omega R U_{\text{д}}}, \quad (4)$$

где $U_{\text{д}}$ — напряжение на конденсаторе с диэлектриком.

Из формул (2), (3) и (4):

$$C_{\text{д}} = \frac{U_0}{\omega R} \left(\frac{1}{U_{\text{д}}} - \frac{1}{U_{\text{мв}}} \right),$$

$$C_{\text{в}} = \frac{U_0}{\omega R} \left(\frac{1}{U_{\text{в}}} - \frac{1}{U_{\text{мв}}} \right).$$

Так как диэлектрическая проницаемость жидкости $\varepsilon = \frac{C_{\text{д}}}{C_{\text{в}}}$, расчётная формула:

$$\varepsilon = \frac{U_{\text{в}} (U_{\text{мв}} - U_{\text{д}})}{U_{\text{д}} (U_{\text{мв}} - U_{\text{в}})}. \quad (5)$$

Так как в расчётную формулу входит отношение напряжений, то оказывается несущественным, как именно проградуирован милливольтметр (по эффективным значениям или по амплитудным). Измерения ε проводят при двух разных значениях напряжения на выходе генератора U_0 и при разных частотах ν ($\omega = 2\pi\nu$).

Конденсатор укреплён на крышке бачка, внутри которого находится исследуемая жидкость (трансформаторное масло). С помощью винта можно поднимать или опускать крышку вместе с конденсатором по вертикальным направляющим стойкам, между которыми установлен бачок. Качественную картину изменения напряжения на конденсаторе при погружении его в жидкость (или при изменении частоты ν) можно наблюдать на экране осциллографа 30 (см. схему на рис. 5.1).

2. Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. Приложение 3). Для милливольтметра внесите в неё те пределы измерения (с соответствующими ценами деления и классами точности), которые были использованы при измерениях.
2. Соберите цепь по схеме рис. 5.1. Для удобства соединения проводов на установке имеется панель с двумя рядами клемм. На этой панели смонтировано сопротивление $R = 30$ кОм. Концы кабелей от приборов с обозначением «Земля» (\perp) должны быть вставлены в клеммы одного ряда (где отсутствует R).
3. Включите генератор тумблером «Сеть».
4. Установите на вольтметре генератора с помощью ручки «Регулировка выхода» значение U_0 в пределах 5-10 В и по шкале частот значение $\nu_1 = 50$ кГц. (Положения всех ручек генератора и осциллографа подробно указаны в таблице к установке.)
5. Измерьте по милливольтметру значение $U_{\text{мв}}$, установив предел измерения милливольтметра на 10 В. При всех измерениях обязательно отсоединяйте осциллограф.

6. Повторите измерение U_{MB} при других значениях частот, например: $\nu_2 = 75$ кГц; $\nu_3 = 100$ кГц; $\nu_4 = 125$ кГц и т. д. до 200 кГц. При этом непрерывно следите за постоянством U_0 . Если отклонения стрелки милливольтметра при этом будут меньше, чем на половину шкалы, то следует изменить предел измерения (3 В или 1 В). Результаты измерений занесите в [ТАБЛИЦУ 5.1](#).

7. Поднимите конденсатор так, чтобы он полностью находился в воздухе, и подключите его к цепи. Проведите измерения U_B при тех же частотах $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4, \dots$ аналогично пп. 4, 5, 6.

8. Погрузите конденсатор в диэлектрик (масло) и проведите измерения U_B'' при тех же частотах $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4, \dots$ аналогично пп. 4, 5, 6.

9. По указанию преподавателя повторите измерения при другом значении U_0 .

10. Подключив к цепи осциллограф (см. схему на [рис. 5.1](#)), наблюдайте качественную картину изменения напряжения на экране осциллографа при изменении частоты ν генератора и при погружении конденсатора в диэлектрик (при неизменной частоте). Устойчивость изображения достигается с помощью ручек осциллографа «Стабильность» и «Уровень».

3. Обработка результатов измерений

Таблица 5.1

ν , кГц	U_{MB} , В	U_B , В	U_D , В	ε

1. По формуле [\(5\)](#) рассчитайте диэлектрическую проницаемость ε для разных частот. Результаты занесите в [ТАБЛ. 5.1](#).

2. Постройте график зависимости $\varepsilon(\nu)$.

3. Рассчитайте относительную погрешность ε по формуле

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \left[\left(\frac{U_{MB}}{U_B} \right)^2 \left(\frac{\Delta U_B}{U_{MB} - U_B} \right)^2 + \left(\frac{U_{MB}}{U_D} \right)^2 \left(\frac{\Delta U_D}{U_{MB} - U_D} \right)^2 + \left(\frac{(U_B - U_D) \Delta U_{MB}}{(U_{MB} - U_B)(U_{MB} - U_D)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

(для $\nu = 50$ кГц). Найдите абсолютную погрешность $\Delta\varepsilon$. Запишите с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)) окончательный результат в виде

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} \pm \Delta\varepsilon.$$

4. Для одной из частот по формулам [\(2\)](#), [\(3\)](#) и [\(4\)](#) найдите C_{MB} , C_B и C_D (при $R = 30$ кОм). Сравните их. Сделайте выводы.

5. По характеру графика зависимости $\varepsilon(\nu)$ определите, зависит ли диэлектрическая проницаемость ε от ν в данном диапазоне частот. Для этого на графике пунктирной горизонтальной линией отметьте среднее значение диэлектрической проницаемости $\bar{\varepsilon}$. Затем выше или ниже этой линии на расстоянии $\Delta\varepsilon$ проведите ещё две пунктирные горизонтальные линии. Если все значения ε , полученные в ходе данного эксперимента, лежат внутри отмеченного коридора $(\bar{\varepsilon} \pm \Delta\varepsilon)$, то диэлектрическая проницаемость не зависит от частоты подаваемого напряжения; если же нет, то имеет место явление дисперсии. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют типы диэлектриков? Каков механизм их поляризации?
2. Диэлектрик какого типа — полярный или неполярный — исследовался в данной работе?
3. Дайте определение ёмкости конденсатора.
4. Дайте определение диэлектрической восприимчивости и относительной диэлектрической проницаемости вещества.
5. Почему сила тока в цепи зависит только от активного сопротивления R ?
6. Как получена расчётная формула для измерения ёмкости C ?
7. Почему в работе необходимо провести серию из трёх измерений напряжений $U_{мв}$, $U_{в}$, $U_{д}$?
8. Выведите расчётную формулу (5).
9. Наблюдается ли в данном диапазоне частот явление дисперсии?
10. Каково назначение осциллографа в данной работе?

Лабораторная работа № 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Цель работы: определение диэлектрической проницаемости с помощью явления втягивания жидкого диэлектрика внутрь плоского конденсатора.

Введение

Незаряженный диэлектрик, помещённый в электрическое поле, поляризуется. Процесс поляризации неполярного диэлектрика состоит в смещении «центров тяжести» положительных и отрицательных зарядов молекулы друг относительно друга, т. е. в образовании диполей. Поляризация полярного диэлектрика заключается в преимущественной ориентации вдоль поля уже имеющихся в диэлектрике диполей (см. [ВВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 5](#)).

Рассмотрим качественно поведение такого диполя в неоднородном электрическом поле. Пусть в направлении оси x напряжённость поля E возрастает. Графически это изображается сгущением силовых линий ([рис. 6.1](#)). Силы, с которыми поле действует на полюса диполя, по модулю неодинаковы, $F_1 > F_2$, так как модуль напряжённости электрического поля E_1 в той точке, где находится положительный заряд больше, чем модуль напряжённости электрического поля E_2 в точке, где расположен отрицательный заряд. Следовательно, диполь в неоднородном поле под действием результирующей силы $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ ($F = F_1 - F_2$) перемещается в область более сильного поля. Этим явлением, в частности, объясняется втягивание диэлектрика внутрь плоского конденсатора.

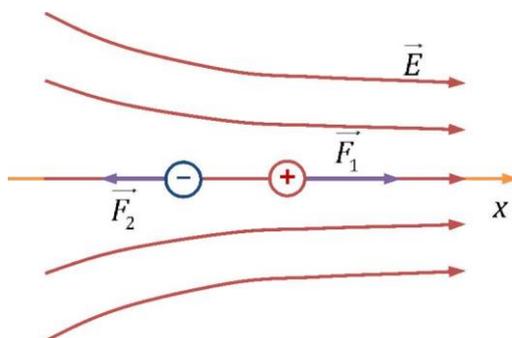


Рис. 6.1

1. Описание установки и метода измерений

1.1. Принцип действия экспериментальной установки

Рассмотрим плоский конденсатор, частично погружённый в жидкий диэлектрик ([рис. 6.2](#)). Поскольку вблизи краёв обкладок конденсатора имеется неоднородное поле, то оно действует на диполи с силами \vec{F} , вертикальные составляющие которых F_y направлены вверх. В результате диэлектрик втягивается в зазор между обкладками конденсатора. Для нахождения результирующей вертикальной силы \vec{f} , с которой электрическое поле действует на жидкость в области неоднородного поля конденсатора, воспользуемся законом сохранения и превращения энергии. Для простоты расчёта будем предполагать, что поверхность жидкости горизонтальна (в этом случае отсутствуют капиллярные явления), поле внутри конденсатора однородно и не влияет на изменение поверхностного натяжения жидкости.

Так как конденсатор подключён к источнику питания, разность потенциалов U между его обкладками остаётся постоянной.

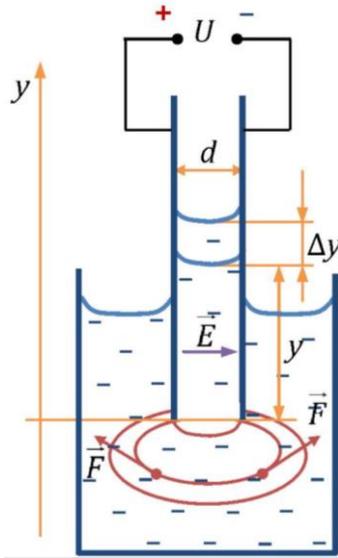


Рис. 6.2

Пусть в процессе втягивания диэлектрика высота столба жидкости (y) между пластинами увеличивается на малую величину Δy (рис. 6.2). Тогда работа A , совершаемая электрическим полем,

$$A = f\Delta y. \quad (1)$$

Кроме того, происходит изменение энергии электрического поля конденсатора на величину

$$\Delta W = \frac{C_2 U^2}{2} - \frac{C_1 U^2}{2} = \frac{U^2}{2} (C_2 - C_1), \quad (2)$$

где C_1 и C_2 — ёмкости конденсатора до и после подъёма жидкости на высоту Δy . Ёмкость конденсатора, частично заполненного диэлектриком, можно найти как ёмкость двух параллельно включённых конденсаторов, один из которых — с диэлектриком, другой — без него. Ёмкость такой системы равна

$$C = C_{\text{диэл}} + C_{\text{возд}} = \frac{\epsilon_0 a y}{d} + \frac{\epsilon_0 (S - a y)}{d} = \frac{\epsilon_0 S}{d} + \frac{\epsilon_0 a y}{d} (\epsilon - 1),$$

где a — ширина пластины, S — её площадь, $a y$ — площадь погружённой части пластины, d — расстояние между пластинами, ϵ — диэлектрическая проницаемость жидкости. Отсюда, зная, что $C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$, легко найти изменение ёмкости

$$C_2 - C_1 = \frac{\epsilon_0 a \Delta y}{d} (\epsilon - 1). \quad (3)$$

Втягивание жидкости в конденсатор и изменение энергии его поля происходит за счёт работы источника тока. Если предположить, что процесс втягивания идёт достаточно медленно, то сила тока в цепи столь мала, что можно пренебречь тепловыми потерями, а также считать разность потенциалов обкладок конденсатора равной ЭДС источника. Тогда на основании закона сохранения энергии запишем

$$A_{\text{ист}} = \Delta W + A_{\text{поля}}. \quad (4)$$

Работу, совершённую источником тока, найдём по формуле

$$A_{\text{ист}} = U\Delta q = U^2(C_2 - C_1), \quad (5)$$

где $\Delta q = U(C_2 - C_1)$ — дополнительный заряд, перетекающий на пластины конденсатора по мере его заполнения диэлектриком (в данном случае на высоту Δy).

Из уравнений (2), (4) и (5) найдём работу поля

$$A = A_{\text{ист}} - \Delta W = \frac{U^2}{2}(C_2 - C_1) \quad (6)$$

или, учитывая формулу (3), получим

$$A = \frac{U^2 \varepsilon_0 a \Delta y}{2d} (\varepsilon - 1). \quad (7)$$

С другой стороны, по формуле (1) $A = f\Delta y$. Отсюда модуль искомой силы равен

$$f = \frac{\varepsilon_0 a U^2}{2d} (\varepsilon - 1). \quad (8)$$

Состояние равновесия жидкости наступит, когда будет выполнено условие $f = mg$. Если выразить массу m втянутого столба жидкости через её плотность ρ и объём $V = a \cdot d \cdot h$, то получим $f = \rho a \cdot d \cdot h \cdot g$. В этом выражении h — окончательная высота, на которую поднялась жидкость под действием поля при данном U (при выводе расчётной формулы под Δy подразумевалось малое приращение высоты)².

Подставив данное значение силы в формулу (8), найдём окончательное выражение для расчёта диэлектрической проницаемости жидкости

$$\varepsilon = 1 + \frac{2d^2 \rho g}{\varepsilon_0} \frac{h}{U^2}. \quad (9)$$

1.2. Метод измерений

В стеклянную кювету **К**, заполненную жидким диэлектриком, опущены две параллельные пластины, к которым подводится напряжение от повышающего трансформатора (рис. 6.3). (Переменное напряжение, которое используют в работе, не влияет на справедливость расчётной формулы (7), так как при низкой частоте поляризация диэлектрика успевает следовать за полем.)

² Из формул (1) и (7), учитывая, что $f = \Delta mg = \rho a d g y$, можно получить соотношение

$$\rho g d y \cdot \Delta y = \frac{\varepsilon_0 a U^2}{2d} (\varepsilon - 1) \Delta y.$$

Проинтегрировав правую и левую часть этого выражения по y в пределах от 0 до h_0 , получим высоту подъёма жидкости h_0 в два раза большую, чем высота h , полученная из формулы (8). Разница в ответах объясняется просто: h_0 — это амплитудный подъём уровня идеальной жидкости, колеблющейся около положения равновесия с координатой $y = h$. Колебания же реальной вязкой жидкости практически отсутствуют, она сразу стремится к положению равновесия при изменении напряжения на обкладках конденсатора.

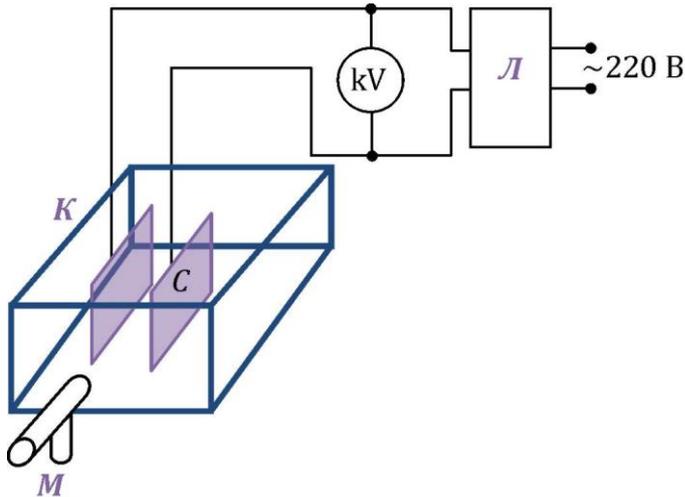


Рис. 6.3

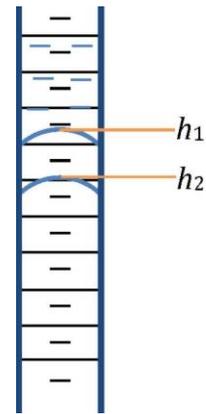


Рис. 6.4

Изменяют напряжение с помощью ЛАТР (*Л*) (автотрансформатора), который вместе с трансформатором находится внутри кожуха установки. Регулировку напряжения проводят поворотом ручки, выведенной на переднюю панель корпуса. Измеряют напряжение на пластинах конденсатора *С* киловольтметром *kV*. Изменение уровня жидкости и расстояние между пластинами определяется измерительным микроскопом *М*. В поле зрения измерительного микроскопа помещена шкала, ориентацию которой можно изменять. Для измерения расстояния между пластинами шкалу располагают горизонтально; для определения изменения уровня жидкости при включении напряжения шкалу располагают вертикально. При измерениях следует иметь в виду, что изображение, даваемое окуляром, перевернутое (рис. 6.4).

2. Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. Приложение 3).
2. Измерьте расстояние d между пластинами. Для этого шкалу микроскопа расположите горизонтально. (Обратите внимание на цену деления шкалы микроскопа.)
3. Установите шкалу микроскопа вертикально и отметьте уровень жидкости h_1 между пластинами в отсутствие напряжения (ручка ЛАТР в положении «0»).
4. Поворотом ручки установите требуемое напряжение (600–700 В). Измерьте уровень жидкости h_2 при этом напряжении.
5. Повторите измерения h_2 при других значениях напряжения. Проведите всего 5–7 измерений в интервале от 600 до 1500 В.

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $\rho = 820 \text{ кг/м}^3$; $d = \dots$; $h_1 = \dots$

Таблица 6.1

№ изм.	$U, \text{ В}$	$h_2, \text{ мм}$	$h, \text{ мм}$	ε
				– ε

1. Рассчитайте $h = h_2 - h_1$ для каждого значения U . Результаты занесите в табл. 6.1.
2. Рассчитайте ε для каждого значения U по формуле

$$\varepsilon = 1 + K \frac{h}{U^2},$$

где $K = \frac{2d^2 \rho g}{\varepsilon_0}$. Результаты занесите в [ТАБЛ. 6.1](#).

3. Найдите погрешность ε для наибольшего значения U по формуле

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon - 1} = \sqrt{\left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2},$$

где

$$\Delta h = \sqrt{\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2},$$

$$\frac{\Delta K}{K} = \sqrt{4\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon_0}{\varepsilon_0}\right)^2}.$$

Погрешности Δh_1 , Δh_2 , Δd равны приборным погрешностям. Погрешность ΔU рассчитывается по общим правилам (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

4. Запишите окончательные результаты в виде

$$h = \bar{h} \pm \Delta h, \quad K = \bar{K} \pm \Delta K, \quad \varepsilon = \bar{\varepsilon} \pm \Delta\varepsilon$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

5. Убедитесь, что ε не зависит от U . Для этого постройте график зависимости $\varepsilon(U)$. На нём пунктирной горизонтальной линией отметьте среднее значение диэлектрической проницаемости $\bar{\varepsilon}$. Затем выше и ниже этой линии на расстоянии $\Delta\varepsilon$ проведите ещё две пунктирные горизонтальные линии. Если все значения ε , полученные в ходе этого эксперимента, лежат внутри отмеченного коридора ($\bar{\varepsilon} \pm \Delta\varepsilon$), то ε не зависит от U ; если же нет, то зависит. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют типы диэлектриков? Каков механизм их поляризации?
2. Объясните причину втягивания диэлектрика внутрь конденсатора.
3. Чему равно изменение энергии поля конденсатора при изменении высоты столба жидкости на малую величину Δu ?
4. Как найти работу, совершаемую источником тока в процессе втягивания диэлектрика?
5. При выполнении каких условий можно записать уравнение энергетического баланса в виде [\(4\)](#)?
6. Когда наступает состояние равновесия жидкости? Как вела бы себя после включения напряжения U идеальная жидкость, у которой отсутствует вязкость?
7. Выведите расчётную формулу для диэлектрической проницаемости.
8. Как найти амплитудное значение подъёма уровня идеальной жидкости в зазоре между обкладками конденсатора?
9. Какие величины непосредственно измеряются в работе, какими приборами?
10. Как находят погрешности Δh_1 , Δh_2 , Δd и ΔU ?

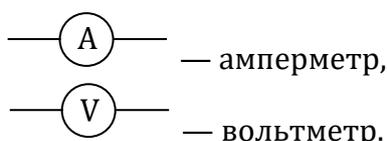
Лабораторная работа № 7 (вводная)

ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

Цель работы: научиться работать с электроизмерительными приборами, рассчитывать погрешности измеряемых величин и составлять спецификацию измерительных приборов.

Введение

Электроизмерительные приборы — амперметры и вольтметры — включаются в электрическую цепь для измерения силы тока и разности потенциалов на отдельных её участках. В зависимости от градуировки шкалы электроизмерительный прибор может выполнять функции амперметра или вольтметра. Для обозначения функциональных особенностей прибора на его панели указаны стандартные символы



Обозначения на панели электроизмерительных приборов

1. Тип тока

Таблица 7.1

Обозначение	Ток
—	Постоянный ток
~	Переменный ток (синусоидальный)
⏏	Постоянный и переменный ток

2. Система

Система — принцип работы электроизмерительного прибора. Обозначения систем приведены в [ТАБЛ. 7.2](#).

Таблица 7.2

Обозначение	Система
	Магнитоэлектрическая ³
	Электромагнитная
	Электродинамическая
	Тепловая

³ Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы подробно описан в [ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 2](#).

3. Класс точности

Классом точности средства измерения называется его характеристика, которая служит показателем установления для него государственным стандартом пределов погрешностей и других параметров, влияющих на точность.

Многие электроизмерительные приборы (амперметры, вольтметры, ваттметры и др.) нормируются по приведённой погрешности, т. е. погрешности, выраженной в процентах от верхнего предела измерений (у многопредельных приборов — от верхнего предела на соответствующем диапазоне) или от длины шкалы.

Применяются следующие классы точности таких приборов: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Обозначение класса точности прибора записывается на его шкале в виде соответствующих цифр (не заключённых в кружок).

Общая формула для расчёта максимальной абсолютной погрешности такого прибора имеет вид

$$\Delta A = \frac{K \cdot A_{\max}}{100}, \quad (1)$$

где K — класс точности прибора, A_{\max} — верхний предел измерений прибора (либо данного его диапазона).

Относительная погрешность измеряемой величины равна

$$\delta A = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где ΔA — *абсолютная погрешность* прибора, A — среднее значение измеряемой величины.

ПРИМЕР

Вольтметр имеет класс точности 1,0, предельное значение $U = 3$ В. Тогда его абсолютная погрешность

$$\Delta U = \frac{1,0 \cdot 3}{100} = 0,03(\text{В}).$$

Если этим вольтметром измерить два значения разности потенциалов: $U_1 = 0,5$ В и $U_2 = 2,5$ В, то относительные погрешности соответственно будут равны

$$\delta U_1 = \frac{\Delta U_1}{U_1} = \frac{0,03}{0,5} = 0,06 = 6\%; \quad \delta U_2 = \frac{\Delta U_2}{U_2} = \frac{0,03}{2,5} = 0,012 = 1,2\%.$$

Если прибор многопредельный, то абсолютную погрешность необходимо определять для каждого предела измерений. Абсолютная погрешность одинакова по всей шкале данного прибора (или его диапазона), а относительная погрешность зависит от значения измеряемой величины и будет тем больше, чем эта величина меньше. Поэтому при работе с многопредельным прибором следует выбирать предел измерения так, чтобы относительная погрешность была минимальной (т. е. показание прибора должно быть в конце шкалы).

Спецификация измерительных приборов

В лабораторном практикуме кафедры используется следующая форма спецификации электроизмерительных приборов ([ТАБЛИЦА 7.3](#)).

Таблица 7.3

№ n/n	Наименование прибора	Система	Пределы измерений		Цена деления	Класс точности
			в деле- ниях	в единицах измерения		
1	Вольтметр	Магни- тоэлек- триче- ская	75	3 В 7,5 В 15 В	0,04 В/дел 0,10 В/дел 0,20 В/дел	1,0

При использовании многопредельных приборов необходимо указывать в таблице значения всех пределов, а также цену деления шкалы для каждого предела. Цена деления прибора равна значению измеряемой величины, соответствующей одному минимальному делению шкалы. Пределы измерения прибора должны быть указаны в делениях и в единицах измеряемой величины.

ПРИМЕР

Многопредельный амперметр имеет пределы измерения силы тока 1 А и 2 А и число делений шкалы 100. Цена деления соответственно равна

$$\frac{1 \text{ А}}{100} = 0,01 \frac{\text{А}}{\text{дел}} \text{ и } \frac{2 \text{ А}}{100} = 0,02 \frac{\text{А}}{\text{дел}}.$$

1. Описание установки и метода измерений

Экспериментальная установка содержит *потенциометр* для плавного регулирования разности потенциалов на внешнем участке цепи (см. схему электрической цепи на [рис. 7.1](#)). Потенциометром служит реостат r со скользящим контактом, позволяющим изменять вводимое в электрическую цепь сопротивление. Реостат подключён параллельно источнику постоянного тока (*УБП*), поэтому является делителем напряжения. Внешним участком цепи является резистор R . Напряжение на резисторе измеряется вольтметром.

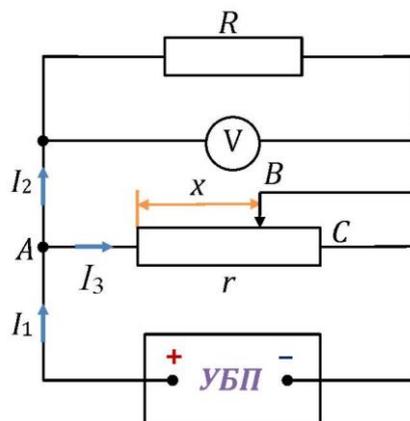


Рис. 7.1

Перемещая ползун потенциометра (точка B) на расстояние x от одного из контактов на концах потенциометра (точка A), изменяют напряжение на участке цепи AB , измеряемое вольтметром. При таком включении разность потенциалов может изменяться от нуля до максимального значения, задаваемого ЭДС источника питания (*УБП*).

В данной работе исследуется зависимость разности потенциалов на участке AB от длины x этого участка при различных сопротивлениях R внешней цепи.

Применим обобщённый закон Ома для различных участков цепи. На схеме и в приведённых ниже формулах введены следующие обозначения: **УБП** — источник питания; \mathcal{E} — ЭДС источника; r — полное сопротивление потенциометра; R — сопротивление внешней цепи; x — длина участка AB (введённой части потенциометра); l — полная длина потенциометра. Обозначения токов показаны на схеме [рис. 7.1](#).

Для участков цепи AxB , $A \mathcal{E}CB$ и ARB по закону Ома получим соответствующие выражения:

$$\varphi_A - \varphi_B = I_3 r \frac{x}{l}, \quad \varphi_A - \varphi_B - \mathcal{E} = -I_1 r \frac{l-x}{l}, \quad \varphi_A - \varphi_B = I_2 R, \quad (3)$$

где $\varphi_A - \varphi_B$ — регулируемая разность потенциалов; x/l — сопротивление участка потенциометра единичной длины.

На основании I закона Кирхгофа для узла A имеем

$$I_1 = I_2 + I_3. \quad (4)$$

Решая систему четырёх уравнений относительно $\varphi_A - \varphi_B$, найдём

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{\mathcal{E} R x l}{x r l + R l^2 - r x^2}.$$

Для случая $R \gg r$ будет верно соотношение

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{\mathcal{E}}{l} x, \quad (5)$$

т. е. если сопротивление внешней цепи много больше полного сопротивления потенциометра, то разность потенциалов на участке AxB зависит от длины введённой части потенциометра линейно. Если $r \ll R$, то эта зависимость нелинейная.

2. Порядок выполнения работы

1. Соберите цепь по схеме [рис. 7.1](#). **Без проверки правильности сборки цепи преподавателем источник питания (УБП) не включать!** Ползун потенциометра должен быть в таком положении, чтобы напряжение, снимаемое с потенциометра, равнялось нулю.
2. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов ([ТАБЛ. 7.3](#)).
3. Установите на УБП напряжение 3 В.
4. Изменяя положение ползуна потенциометра (точка B на схеме [рис. 7.1](#)), измерьте по 10–12 значений разности потенциалов при разных значениях x (по линейке) для случаев $R_1 \gg r$ и $R_2 \ll r$. Результаты занесите в [ТАБЛИЦУ 7.4](#).

Таблица 7.4

№ измерения		1	2	3		11	12
$R_1 \gg r$	x , см						
	$(\varphi_A - \varphi_B)$, В						
$R_2 \ll r$	x , см						
	$(\varphi_A - \varphi_B)$, В						

3. Обработка результатов измерений

1. Постройте в одной координатной сетке графики зависимости $\varphi_A - \varphi_B = f(x)$ для двух значений R .

2. Рассчитайте относительную погрешность для двух значений разности потенциалов в каждой серии (по указанию преподавателя).

Относительная погрешность вычисляется по формуле (2)

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\%,$$

где $U = \varphi_A - \varphi_B$, ΔU — абсолютная погрешность измерений разности потенциалов, рассчитанная по формуле (1).

3. Для четырёх выбранных значений разности потенциалов, относительная погрешность которых рассчитывалась в п. 2, запишите окончательный результат измерений с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#))

$$U = \bar{U} \pm \Delta U.$$

4. По результатам вычисления абсолютной и относительной погрешностей измерений сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Как вычисляется цена деления и абсолютная погрешность электроизмерительных приборов?
2. Объясните принцип действия потенциометра.
3. Сформулируйте закон Ома для однородного и неоднородного участка цепи.
4. Запишите уравнения, необходимые для вывода расчётной формулы $\varphi_A - \varphi_B = f(x)$.
5. Объясните ход полученных на графике зависимостей $\varphi_A - \varphi_B = f(x)$.
6. Как рассчитывается абсолютная погрешность электроизмерительного прибора? Рассчитайте абсолютную погрешность вольтметра, используемого в работе, на пределах измерения 7,5 и 15 В.
7. Объясните смысл обозначений на панели вольтметра, используемого в данной работе.

Лабораторная работа № 8 ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНоиДА С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ХОЛЛА

Цель работы: экспериментальное определение значений магнитной индукции на оси соленоида.

Введение

Во всех точках пространства, окружающего произвольный проводник с током, всегда существует обусловленное этим током поле. Это поле называется **магнитным полем** тока.

Основной характеристикой магнитного поля является вектор **магнитной индукции** \vec{B} .

Закон Био-Савара-Лапласа позволяет определить вектор индукции магнитного поля, созданного элементом dl проводника с током I , в произвольной точке:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (1)$$

где I — сила тока в проводнике; $d\vec{l}$ — вектор, равный по модулю длине элемента проводника и совпадающий по направлению с направлением тока; \vec{r} — радиус-вектор, проведённый от середины элемента проводника к точке, в которой определяется магнитная индукция; μ_0 — магнитная постоянная (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 5](#)).

Направление вектора $d\vec{B}$ определяется правилом векторного произведения. Векторы $d\vec{l}$, \vec{r} , $d\vec{B}$ образуют *правовинтовую систему* ([рис. 8.1](#)).

Модуль вектора магнитной индукции $d\vec{B}$ равен

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

где α — угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{r} .

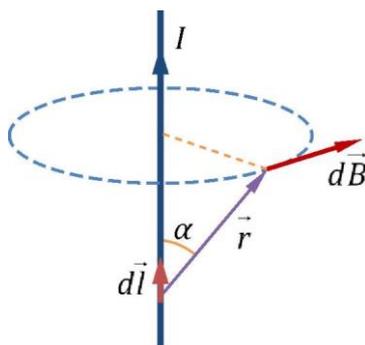


Рис. 8.1

Рассмотрим проводник в виде кругового витка с током ([рис. 8.2](#)). Найдём модуль и направление вектора магнитной индукции \vec{B} в какой-либо точке, лежащей на перпендикуляре, проведённом через центр этого витка ([рис. 8.2](#)).

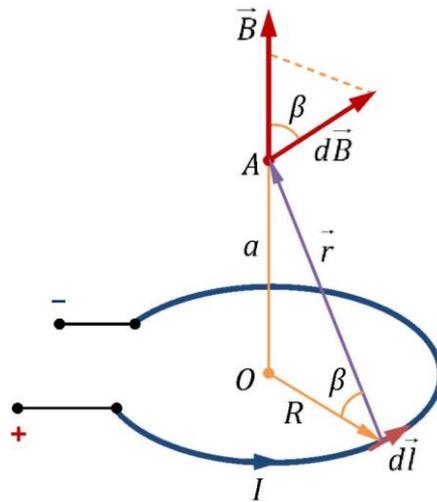


Рис. 8.2

Выделим на круговом проводнике радиуса R с током I элемент $d\vec{l}$. От этого элемента проведём радиус-вектор \vec{r} в точку A , лежащую на оси OA . Направление вектора $d\vec{B}$ в точке A определяется векторным произведением (1).

Согласно принципу суперпозиции, результирующий вектор индукции магнитного поля \vec{B} в точке A является векторной суммой векторов $d\vec{B}$, созданных всеми элементами кругового проводника. Результирующей вектор \vec{B} будет направлен вдоль оси OA , а его модуль вычислим интегрированием:

$$B = \int_L dB \cos \beta = \frac{\mu_0}{4\pi} I \cos \beta \frac{\sin \alpha}{r^2} \int_0^{2\pi R} dl, \quad (3)$$

где α — угол между \vec{r} и $d\vec{l}$ ($\alpha = 90^\circ$); β — угол между \vec{r} и радиусом кругового проводника R , проведённым к элементу $d\vec{l}$; $2\pi R$ — длина кругового проводника. Проведя интегрирование, получим

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \cos \beta \frac{2\pi R}{r^2} = \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(a^2 + R^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

где a — расстояние от центра кругового витка до точки A .

Магнитное поле соленоида

Соленоидом называется цилиндрическая катушка, состоящая из большого числа витков изолированной проволоки, по которой течёт ток I (рис. 8.3). Если шаг винтовой линии достаточно мал, то каждый виток соленоида можно приближённо заменить замкнутым витком.

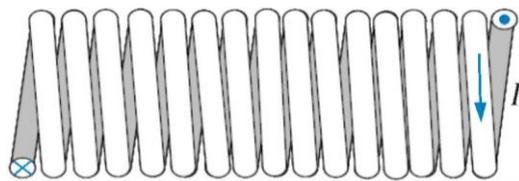


Рис. 8.3

Из соображений симметрии ясно, что линии вектора магнитной индукции внутри соленоида направлены вдоль его оси, причём \vec{B} составляет с направлением тока в

соленоиде правовинтовую систему. Магнитное поле на оси соленоида можно рассчитать следующим образом. Выделим малый участок dl длины соленоида, на него придёт ndl витков ($n = N/L$ — число витков на единицу длины, N — общее число витков, L — длина соленоида). Обозначим силу тока в каждом витке через I , тогда участок dl соленоида можно рассматривать как круговой ток $Indl$. Индукция магнитного поля, создаваемая этим участком на оси соленоида, согласно (4), равна

$$dB_x = \frac{\mu_0 R^2 Indl}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (5)$$

где x — расстояние по горизонтальной оси от участка dl до точки A , R — радиус витка (рис. 8.4).

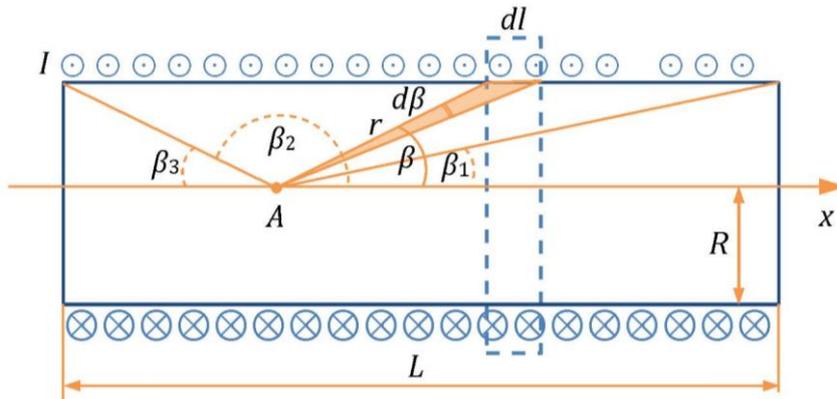


Рис. 8.4

Введём угол β между положительным направлением оси соленоида (положительное направление оси соленоида связано с направлением тока в соленоиде правилом буравчика) и радиусом-вектором, проведённым из рассматриваемой точки к участку dl , тогда $l = x = R \operatorname{ctg} \beta$, $r^2 = R^2 + x^2 = R^2 / \sin^2 \beta$, откуда

$$dl = -\frac{Rd\beta}{\sin^2 \beta}.$$

Для dB_x имеем

$$dB_x = -\frac{\mu_0 n I \sin \beta d\beta}{2}. \quad (6)$$

Для получения результирующего значения индукции магнитного поля в точке A нужно просуммировать dB_x , создаваемые всеми участками dl , то есть проинтегрировать выражение (5) по углу β :

$$B_x = -\frac{\mu_0 n I}{2} \int_{\beta_2}^{\beta_1} \sin \beta d\beta = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \beta_1 + \cos \beta_3), \quad (7)$$

где $\cos \beta_1 = \frac{L-a}{\sqrt{R^2 + (L-a)^2}}$, $\cos \beta_3 = \frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}}$.

Для точки, находящейся у левого края соленоида, $\beta_3 = \frac{\pi}{2}$, поэтому индукция вычисляется по формуле $B = \frac{\mu_0 n I}{2} \cos \beta_1$. Для бесконечно длинного соленоида $\beta_1 = 0$ и $\beta_2 = \pi$, откуда индукция магнитного поля внутри такого соленоида равна $B = \mu_0 n I$.

Эффект Холла

Эффект Холла заключается в возникновении электростатического поля при пропускании постоянного электрического тока через проводящую пластинку, помещённую в постоянное магнитное поле, перпендикулярное плоскости пластинки и направлению тока. Теория эффекта Холла объясняет возникновение электростатического поля, характеризуемого ЭДС Холла, взаимодействием носителей тока с магнитным полем. В отсутствие внешнего магнитного поля в проводнике под действием постоянного электрического поля имеет место направленное движение зарядов q со скоростью \vec{v} (рис. 8.5).

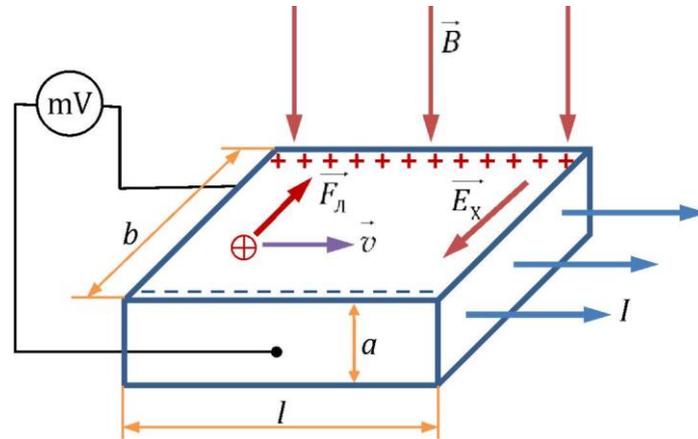


Рис. 8.5

Взаимодействие зарядов с магнитным полем \vec{B} характеризуется силой Лоренца. В результате этого взаимодействия частицы отклоняются в направлении, перпендикулярном \vec{v} и \vec{B} . В результате пространственного разделения носителей заряда в проводнике возникает перпендикулярное направлению тока электрическое поле с напряжённостью \vec{E}_x . В свою очередь, это поле действует на заряды и уравнивает силу Лоренца. В условиях равновесия

$$qE_x = qvB. \quad (8)$$

Принимая во внимание связь плотности тока \vec{j} со скоростью направленного движения \vec{v} и концентрацией n носителей заряда, получаем выражение для разности потенциалов Холла:

$$U_x = E_x b = vBb = \frac{j}{qn} Bb = \frac{I}{qnS} Bb = \frac{I}{qnab} Bb = \frac{1}{qn} \cdot \frac{IB}{a},$$

$$U_x = R_x \frac{IB}{a}. \quad (9)$$

В этом выражении $R_x = \frac{1}{qn}$ — *постоянная Холла*, a и b — поперечные размеры пластины. Из выражения (9) видно, что U_x пропорционально модулю индукции магнитного поля B (в нашем случае — магнитного поля соленоида).

1. Описание установки и метода измерений

Для экспериментального определения модуля индукции магнитного поля на оси соленоида в данной работе используются датчики Холла, расположенные внутри катушки через каждый сантиметр.

Датчик Холла представляет собой тонкую прямоугольную пластину площадью несколько квадратных миллиметров и имеет 4 электрода для подвода тока и измерения разности потенциалов U_x , которая пропорциональна B . Модуль индукции магнитного поля внутри соленоида появляется на цифровом индикаторе.

Соленоид, магнитное поле которого надо определить, представляет собой совокупность большого количества витков медного провода, близко расположенных на непроводящем каркасе.

Вдоль оси катушки, перпендикулярно её плоскости, расположена пластина с укрепленными через каждый сантиметр датчиками Холла. Координаты положения текущего включённого датчика a относительно левого края соленоида выводятся на жидкокристаллический дисплей. Переключение датчиков осуществляется нажатием кнопок «ДАТЧИКИ».

Для плавного изменения тока катушки служит ручка «ТОК КАТУШКИ». Текущее значение установленного тока выводится на дисплей в амперах.

Тесламетр, собранный на основе высокочувствительного датчика Холла, применяемый в этой работе, позволяет определить магнитное поле с точностью $\pm 0,03$ мТл. При этом показания датчика колеблются возле некоторого среднего значения в пределах приборной погрешности.

2. Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 3](#)) и запишите данные установки.
2. Перед включением проверьте целостность всех соединительных и сетевых проводов устройств.
3. Включите установку в сеть напряжением ~ 220 В. Перевести переключатель «СЕТЬ» на панели в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный светодиод.
4. Установите ручкой «ТОК КАТУШКИ» одно из значений тока, протекающего по обмотке соленоида, в диапазоне от 2 до 3 А.
5. Переключая нажатием кнопок «ДАТЧИКИ» датчики Холла, расположенные на оси соленоида через 1 см, снимите зависимость индукции магнитного поля соленоида от координаты a , отсчитываемой от левого края катушки. Данные занесите в [ТАБЛИЦУ 8.1](#).
6. Величина индукции магнитного поля выводится на жидкокристаллический индикатор в миллитеслах, показания прибора могут изменяться в пределах ошибки определения поля $\pm 0,03$ мТл относительно среднего значения. Запишите в [ТАБЛ. 8.1](#) среднее значение показаний, определённое за некоторый промежуток времени.

7. Повторите действия пп. 4–6 для двух других токов соленоида.
8. Для точки, расположенной в середине длины соленоида, снимите значения магнитной индукции для двух дополнительных значений токов соленоида (по указанию преподавателя).
9. По окончании работы переведите переключатель «СЕТЬ» в положение «ВЫКЛ» и выключите установку из сети.

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $L = 0,18$ м; $N = 550$; $R = 0,025$ м

Таблица 8.1

a, м	$\cos \beta_1$	$\cos \beta_3$	$\cos \beta_1 + \cos \beta_3$	Магнитная индукция					
				при $I_1 =$		при $I_2 =$		при $I_3 =$	
				$B_{\text{изм}}$	$B_{\text{расч}}$	$B_{\text{изм}}$	$B_{\text{расч}}$	$B_{\text{изм}}$	$B_{\text{расч}}$

1. Проведите теоретический расчёт магнитного поля по формуле (7) для каждого положения датчика a , занесите эти значения в [ТАБЛИЦУ 8.1](#) и постройте теоретический график $B(a)$ с нанесёнными на него экспериментальными точками.
2. Постройте график зависимости магнитной индукции в центре длины соленоида от тока соленоида.

3. По формулам $L = \mu_0 n^2 V$ и $W = \frac{LI^2}{2}$ рассчитайте индуктивность соленоида, а также энергию поля внутри соленоида для трёх значений токов соленоида ($n = N/l$, $V = Sl$, где l — длина соленоида).

4. Рассчитайте абсолютные погрешности ΔL и ΔW по формулам

$$\Delta L = L \sqrt{4 \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S} \right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2},$$

$$\Delta W = W \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2 + 4 \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2}.$$

Запишите результаты в виде

$$L = \bar{L} \pm \Delta L, \quad W = \bar{W} \pm \Delta W$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

5. Сделайте вывод о соответствии теоретического расчёта магнитной индукции соленоида результатам эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение вектора магнитной индукции.
2. Изобразите магнитные силовые линии для прямого бесконечного проводника с током и для соленоида.
3. Запишите закон Био-Савара-Лапласа. Объясните, как, пользуясь этим законом, можно определить направление и величину магнитной индукции в любой точке пространства.

4. Как определяется магнитная индукция в центре кругового проводника с током? Выведите соответствующую формулу.
5. Объясните эффект Холла.
6. Получите расчётную формулу (7).
7. Какой вид должна иметь зависимость модуля магнитной индукции B от расстояния a вдоль оси от центра катушки?
8. Как изменяется магнитное поле вдоль перпендикуляра, проведённого через центр катушки?
9. В чем заключается метод измерения магнитного поля катушки?
10. Что является источником магнитного поля в данной установке?

Лабораторная работа № 9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРОМАГНЕТИКА

Цель работы: исследование температурной зависимости индукции магнитного поля в ферромагнетике, определение точки Кюри и вычисление магнитного момента молекулы ферромагнетика.

Введение

Магнитное поле в веществе создаётся не только макротоками (свободными зарядами, движущимися упорядоченно в проводнике под действием электрического поля), но и микротоками, обусловленными внутриатомным движением электронов. Внутриатомные движения сложны, подчиняются квантовым законам. По современным представлениям магнетизм вещества объясняется как **орбитальным** движением электронов вокруг ядер атомов, так и собственным, или **спиновым**, моментом электронов. В ферромагнитных телах определяющее значение имеет спиновый магнитный момент электронов.

И то, и другое движение электрона характеризуется магнитным моментом \vec{p}_m . Полный магнитный момент атома равен векторной сумме орбитальных и спиновых магнитных моментов всех электронов, входящих в его состав.

Влияние микротоков на магнитное поле зависит от ориентации магнитных моментов атомов. Если все магнитные моменты атомов вещества (магнетика) расположены хаотично, то оно не создаёт магнитного поля. Если имеется хотя бы частично упорядоченная ориентация атомных магнитных моментов, то магнетик создаёт своё магнитное поле. Такой магнетик называется **намагниченным**.

Для характеристики магнитного состояния магнетика вводится вектор \vec{J} , равный отношению векторной суммы магнитных моментов атомов в малом объёме ΔV к величине этого объёма:

$$\vec{J} = \frac{\sum (\vec{p}_m)_{\text{атомов}}}{\Delta V}. \quad (1)$$

Вектор \vec{J} называется **намагниченностью**. При наличии в магнитном поле магнетиков вектор индукции \vec{B} будет равен векторной сумме магнитных индукций внешнего поля \vec{B}_0 и внутреннего поля \vec{B}' , создаваемого микротоками: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$.

Вектор \vec{B} зависит от физических свойств, размеров, формы и расположения магнетиков. Это обстоятельство сильно затрудняет непосредственный расчёт \vec{B} . Во многих случаях расчёты упрощаются введением ещё одной характеристики магнитного поля — **напряжённости магнитного поля** \vec{H} :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}. \quad (2)$$

Вектор \vec{H} удобен тем, что его циркуляция по произвольному замкнутому контуру (т. е. $\oint_L \vec{H} d\vec{l}$) в произвольном магнитном поле при наличии любых магнитных сред

равна алгебраической сумме макротоков, сцепленных с контуром L , а от микротоков не зависит:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum I_{\text{макро}}. \quad (3)$$

Соотношение (3) называется *обобщённым законом полного тока*.

Для изотропных магнетиков векторы \vec{B} и \vec{H} параллельны, и связь между ними может быть записана в форме

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad \mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (4)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость вещества; μ_0 — магнитная постоянная (см. Приложение 5).

Характерной особенностью ферромагнетиков является сложная нелинейная зависимость \vec{B} от \vec{H} . Это означает, что магнитная проницаемость μ ферромагнетиков зависит от напряжённости поля H . Максимальные значения μ в ферромагнетиках очень велики (до 10^5 – 10^6), т. е. внутреннее поле в них во много раз превышает вызвавшее его внешнее магнитное поле (см. [рис. 9.1](#)).

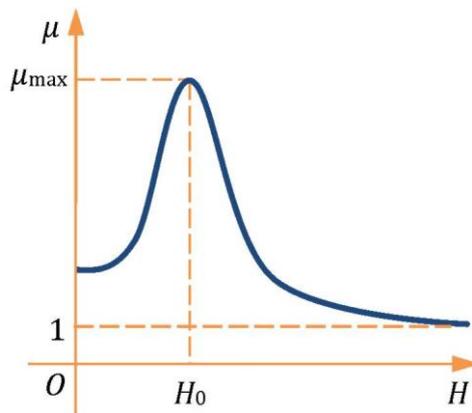


Рис. 9.1

Таким образом, небольшое внешнее магнитное поле вызывает высокую намагниченность, обусловленную упорядочением магнитных моментов атомов, которая может сохраняться и в отсутствие внешнего магнитного поля. Это объясняется тем, что магнитные моменты атомов в таких веществах испытывают сильное воздействие со стороны соседних атомов. Магнитоупорядоченное состояние вещества, в котором большинство атомных магнитных моментов параллельны друг другу, т. е. самопроизвольная (спонтанная) намагниченность, может сохраняться в отсутствие внешнего поля при температурах ниже точки Кюри T_K достаточно долго. Данное явление не объясняется в рамках классической физики, а в квантовой механике объясняется так называемым *обменным взаимодействием* между атомами, которое стремится установить спины (а, следовательно, и магнитные моменты) соседних атомов или ионов параллельно друг другу. Под спином электрона в квантовой механике понимается собственный момент импульса электрона. Ярко выраженными ферромагнитными свойствами обладают переходные элементы, у которых происходит заполнение d - и f -слоёв. Электроны проводимости благодаря обменному взаимодействию с этими слоями, участвуют в спонтанной намагниченности ферромагнетика. К таким веществам относятся железо, кобальт, никель, редкоземельные элементы, а также их соединения или сплавы (например, очень сильными ферромагнитными свойствами обладает сплав кобальта с самарием).

В отсутствие внешнего магнитного поля в ферромагнетиках существуют макрообласти спонтанного намагничивания, называемые **доменами**, в которых магнитные моменты отдельных атомов ориентированы в одном направлении. Причиной этого является взаимодействие спиновых магнитных моментов соседних атомов и их взаимным влиянием.

Магнитные моменты различных доменов ориентированы хаотично, поэтому в исходном состоянии намагниченность ферромагнетика равна нулю. При помещении ферромагнетика в магнитное поле происходит нарушение его первичной доменной структуры. Это связано с тем, что различные домены обладают различной энергией в магнитном поле, причём эта энергия зависит от направления магнитного момента домена. При увеличении напряжённости \vec{H} внешнего магнитного поля сначала происходит рост размеров доменов, намагниченность которых близка по направлению к вектору \vec{H} . При больших значениях \vec{H} происходит второй процесс — разворот магнитных моментов доменов по направлению \vec{H} . Когда все магнитные моменты доменов ферромагнетика будут ориентированы по направлению \vec{H} , будет достигнуто состояние магнитного насыщения.

Магнитная индукция \vec{B} в ферромагнетиках сложным образом зависит от напряжённости внешнего поля \vec{H} . Эта зависимость, когда исходным является полностью размагниченное состояние, называется **основной кривой намагничивания**. Она изображена на [рис. 9.2](#) сплошной линией **0-1**. Видно, что зависимость $B(H)$ нелинейная. Для ферромагнетиков характерно также наличие гистерезиса. При действии на ферромагнетик переменного магнитного поля величина магнитной индукции B изменяется по замкнутой петле **1-2-3-4-5-6-1** ([рис. 9.2](#)), которая называется **петлёй гистерезиса**. Если постепенно увеличивать амплитуду переменного тока, определяющего напряжённость магнитного поля H , то можно наблюдать постепенное увеличение площади петли (см. штриховые кривые на [рис. 9.2](#)). При достаточно большой напряжённости петля перестаёт изменяться (максимальная петля **1-2-3-4-5-6-1**).

Гистерезис проявляется в том, что намагничивание ферромагнетика не является однозначной функцией H , а зависит от предыстории образца — от того, в каких полях он был прежде. Например, в поле напряжённости H_1 (см. [рис. 9.2](#)) модуль B может принимать значения от B'_1 до B''_1 .

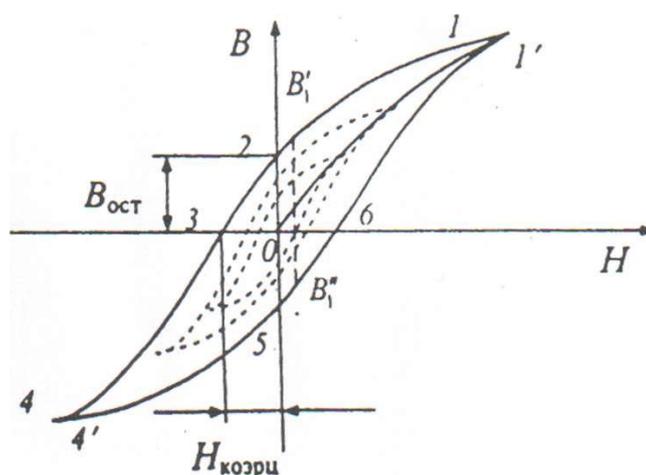


Рис. 9.2

Максимальная петля гистерезиса является характеристикой магнитных свойств материала. В частности, её пересечение с осью ординат определяет *остаточную индукцию* $B_{ост}$, а пересечение с осью абсцисс — напряжённость поля, необходимую для размагничивания образца и называемую *коэрцитивной силой* $H_{коэрц}$.

Для каждого ферромагнетика имеется определённая температура T_K , при которой области спонтанного намагничивания (домены) распадаются и вещество утрачивает ферромагнитные свойства (становится парамагнетиком). Эта температура называется *точкой Кюри*.

Точка Кюри — это температура, выше которой намагниченность каждого домена ферромагнетика равна нулю. Причина этого — дезориентирующее тепловое движение молекул, в результате которого ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние.

Значения температуры Кюри для чистых ферромагнетиков приведены в [ТАБЛИЦЕ 9.1](#).

Таблица 9.1

Металлы	T_K , К
Fe	1044
Co	1360-1388
Ni	627
Gd	293
Tb	219

По мере уменьшения температуры ферромагнетика от точки Кюри T_K его намагниченность возрастает, так как магнитные моменты его молекул в пределах каждого домена стремятся выстроиться параллельно друг другу. При достаточно низких температурах магнитные моменты всех доменов устанавливаются вдоль внешнего магнитного поля: наступает магнитное насыщение, при котором намагниченность вещества J_s максимальна. Её величина равна сумме магнитных моментов молекул в этом объёме:

$$J_s = np_m, \quad (5)$$

где n — концентрация молекул ферромагнетика, p_m — модуль магнитного момента одной молекулы.

Строго говоря, полное насыщение, для которого справедлива формула (5), возможно только при термодинамической температуре $T = 0$ К.

Согласно (2) намагниченность насыщения

$$J_s = \frac{B_s}{\mu_0} - H_s. \quad (6)$$

Так как $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$, а при насыщении $\mu = 1 + \chi \sim 10^2 - 10^5$, то $\frac{B}{\mu_0} \gg H$ и H_s можно пренебречь:

$$J_s \approx \frac{B_s}{\mu_0}. \quad (7)$$

Индекс s означает, что величины относятся к состоянию насыщения ферромагнетика. Магнитную индукцию насыщения B_s можно найти экстраполяцией графика её температурной зависимости $B_s = f(T)$ в область низких температур.

1. Описание установки и метода измерений

В данной работе изучается материал сердечника трансформатора, который при протекании тока в первичной (намагничивающей) обмотке намагничивается. Линии магнитной индукции проходят целиком в сердечнике (рис. 9.3).

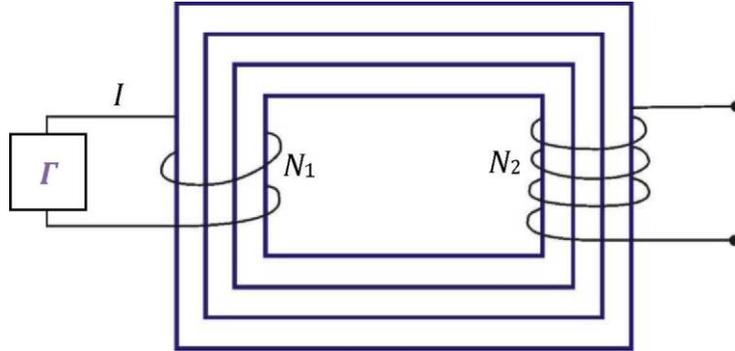


Рис. 9.3

В таком случае напряжённость магнитного поля в ферромагнетике равна напряжённости поля намагничивающих токов. Для определения напряжённости поля используется формула для поля соленоида:

$$H = \frac{N_1 I}{l} = n_1 I, \quad (8)$$

где I — сила тока, N_1 — число витков в первичной обмотке, l — длина первичной обмотки, $n_1 = \frac{N_1}{l}$ — число витков, приходящееся на единичный участок длины первичной обмотки.

При протекании в намагничивающей обмотке переменного тока

$$I = I_{\max} \sin \omega t, \quad \omega = 2\pi\nu, \quad \nu = 50 \text{ Гц.}$$

Магнитный поток Φ сквозь поперечное сечение сердечника, должен изменяться по тому же закону:

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t, \quad (9)$$

где Φ_{\max} — максимальный поток, который можно выразить через максимальное значение магнитной индукции B_{\max} и площадь S поперечного сечения сердечника:

$$\Phi_{\max} = B_{\max} S. \quad (10)$$

При этом в разомкнутой измерительной обмотке трансформатора с числом витков N_2 ЭДС индукции

$$\mathcal{E} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \Phi_{\max} \omega \cos \omega t; \quad (11)$$

амплитудное значение ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_{\max} = N_2 \omega B_{\max} S. \quad (12)$$

Отсюда

$$B_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{N_2 \omega S}. \quad (13)$$

Вольтметр, подключённый к измерительной обмотке, показывает не амплитудное, а эффективное значение напряжения. Показание вольтметра

$$U_2 = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{\sqrt{2}}. \quad (14)$$

Таким образом, зная ток в намагничивающей обмотке N_1 и ЭДС индукции в измерительной обмотке N_2 трансформатора, можно найти максимальную напряжённость магнитного поля H_{\max} и соответствующую ей магнитную индукцию B_{\max} в сердечнике.

Если измерение тока в первичной цепи заменить измерением напряжения, то можно экспериментально определить число витков в первичной обмотке. Так как обе обмотки пронизывает один и тот же магнитный поток, ЭДС в каждом витке равны и для напряжений справедливо соотношение:

$$\frac{U}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}. \quad (15)$$

Для нахождения точки Кюри в данной работе применяется установка, упрощённая принципиальная блок-схема которой приведена на [рис. 9.4](#).

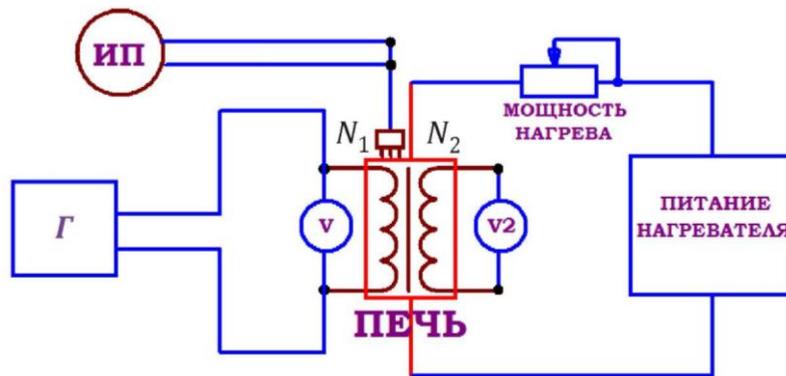


Рис. 9.4

Исследуемый образец — сердечник трансформатора, изготовленный из марганец-цинкового феррита. Материал сердечника, в отличие от железа, имеет низкую температуру Кюри, что позволяет использовать его для измерения точки Кюри в условиях учебной лаборатории.

Конструктивно установка состоит из электропечи с резистивным нагревательным элементом, мощность которого регулируется. В печь помещается исследуемый трансформатор с ферромагнитным сердечником и двумя обмотками — намагничивающей N_1 и измерительной N_2 . Напряжение на первичную обмотку подаётся от генератора G и измеряется вольтметром V (оно остаётся постоянным в течение опыта). Напряжение на вторичной обмотке регистрируется вольтметром V_2 .

Температура t в электропечи определяется высокоточным цифровым термодатчиком, также введённым внутрь электропечи. Сигнал с термодатчика подаётся на аналого-цифровой преобразователь измерительного прибора $ИП$ и регистрируется в градусах Цельсия. Точность измерения температуры термодатчика составляет $\pm 1^\circ\text{C}$. Все измеренные и контролируемые параметры (мощность нагрева P ,

температура t , а также напряжение на первичной обмотке U и на вторичной U_2) выводятся на жидкокристаллический дисплей.

Скорость нагрева регулируется с помощью кнопок «МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ». Удержание кнопок приводит к плавному возрастанию мощности печи. Для охлаждения предусмотрена возможность включения кулера нажатием кнопки «ОХЛАЖДЕНИЕ». Отключение кулера осуществляется нажатием той же кнопки. При перегреве электропечи свыше 100°C срабатывает автоматическое включение охлаждения, а электропечь отключается.

При достижении температуры Кюри магнитные свойства образца изменяются, вследствие чего ЭДС индукции во вторичной обмотке резко падает, что видно по показаниям вольтметра V_2 .

2. Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы ознакомьтесь с принципиальной схемой экспериментальной установки (рис. 9.4), назначением ручек, кнопок и измерительного прибора. Проверьте целостность сетевого провода.
2. Включите установку в сеть ~ 220 В. Поставьте переключатель «СЕТЬ» на панели учебного модуля в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный индикатор. Дайте установке прогреться в течение трёх минут.
3. Запишите данные установки и заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. Приложение 3).
4. Измерьте напряжение U на первичной обмотке.
5. Установите мощность нагрева печи, равную 45–55% от максимальной, с помощью кнопок «МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ».
6. Исследуйте зависимость U_2 от температуры t , записывая измерения через каждые 2°C в таблицу 9.2. Измерения рекомендуется начинать при достижении в электропечи температуры $t \approx 28\text{--}30^\circ\text{C}$ и проводить до температуры $t \approx 75^\circ\text{C}$. При достижении температуры $45\text{--}50^\circ\text{C}$ мощность нагрева рекомендуется повысить до 70–90%.
7. Нагрев проводите до температуры $t \approx 75^\circ\text{C}$, после чего включите систему охлаждения нажатием кнопки «ОХЛАЖДЕНИЕ». Охлаждать нагреватель следует в течение получаса до достижения практически комнатной температуры около $25\text{--}30^\circ\text{C}$.
8. По окончании работы поставьте переключатель «СЕТЬ» в положение «ВЫКЛ», при этом должен погаснуть сигнальный индикатор, и выньте вилку из розетки.

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $N_2 = 500$; $\nu = 50$ Гц; $S = 4 \cdot 10^{-4}$ м²; $l = 1,0$ см; сопротивление первичной обмотки $R = 1000$ Ом, $n = 1,4 \cdot 10^{28}$ м⁻³; $U = \dots$

Таблица 9.2

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	U_2, B	$B_{\text{max}}, \text{Tл}$
30			
32			
...			

1. Запишите в табл. 9.2 температуру по шкале Кельвина:

$$T[\text{K}] = t[^\circ\text{C}] + 273.$$

2. Рассчитайте значения магнитной индукции B_{\max} по формуле (13) с учётом формулы (14) для каждой температуры. Рассчитанные значения занесите в ТАБЛИЦУ 9.2.
3. Постройте график зависимости $B_{\max} = f(T)$ и найдите из него магнитную индукцию насыщения B_s .
4. Используя формулу (7), оцените намагниченность насыщения J_s .
5. Рассчитайте с помощью соотношения (15) величину магнитного момента p_m молекулы ферромагнетика. Сравните магнитный момент молекулы исследуемого ферромагнетика p_m с величиной спинового магнитного момента электрона, равной магнетону Бора (см. ПРИЛОЖЕНИЕ 5).
6. Экстраполируйте график $B_{\max} = f(T)$ до пересечения с осью температур и найдите точку Кюри T_k .
7. Используя формулу (10), найдите число витков N_1 в первичной обмотке.
8. По закону Ома рассчитайте ток в первичной обмотке и по формуле (8) найдите напряжённость H_{\max} магнитного поля в сердечнике при начальной температуре.
9. Найдите магнитную проницаемость исследуемого ферромагнетика при начальной температуре, используя связь (4).

Контрольные вопросы

1. Что называется магнитным моментом контура с током?
2. Что такое орбитальный магнитный момент электрона в атоме? Как он связан с зарядом электрона и радиусом орбитали?
3. Дайте определение намагниченности вещества. Как она связана с характеристиками магнитного поля? Объясните причину намагничивания на примере парамагнетика.
4. Выведите формулу для расчёта напряжённости магнитного поля внутри длинного соленоида.
5. Чем отличаются друг от друга ферромагнетики, парамагнетики и диамагнетики?
6. Чем объясняется высокая магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость у ферромагнетика?
7. Что такое домен? Каковы причины образования доменов? Какие вещества имеют доменную структуру?
8. Как зависят свойства ферромагнетиков от температуры? Что такое точка Кюри?
9. Объясните принцип действия трансформатора.
10. Объясните метод расчёта магнитной индукции в данной работе.
11. В чём заключается метод оценки магнитного момента атомов вещества в работе?

Лабораторная работа № 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Цель работы: нахождение отношения заряда электрона к его массе (*удельного заряда электрона*) методом отклонения в магнитном поле.

Введение

На электрон, движущийся со скоростью \vec{v} в электрическом и магнитном полях, электрическое поле действует с силой

$$\vec{F} = -e\vec{E} - e[\vec{v}\vec{B}], \quad (1)$$

где $-e$ — заряд электрона, \vec{E} — напряжённость электрического поля, \vec{B} — индукция магнитного поля. При определённом выборе полей траектория движущегося электрона будет плоской и замкнутой. Такие условия движения можно создать, если электронную лампу, катод и анод которой изготовлены в виде двух соосных цилиндрических поверхностей, расположить внутри достаточно длинного соленоида параллельно его оси. Электроны в этом случае будут двигаться в пространстве, заключённом между катодом K и анодом A (рис. 10.1). Так как магнитное поле \vec{B} направлено вдоль оси электродов лампы, а электрическое поле \vec{E} радиально, то оба поля взаимно перпендикулярны. Двухэлектродную электронную лампу, в которой электроны, летящие от катода к аноду, наряду с электрическим полем подвергаются воздействию внешнего магнитного поля, называют *магнетроном*.

1. Описание установки и метода измерений

Рассмотрим движение электрона в магнетроне. Точный расчёт траектории в таком устройстве (рис. 10.1) не прост, потому что электрон движется в неоднородном радиальном электрическом поле $E = \tau/2\pi\epsilon_0 r$, где τ — линейная плотность заряда электродов, r — расстояние от рассматриваемой точки до оси электродов лампы. Однако, если радиус катода мал по сравнению с радиусом анода, вид этой траектории близок к окружности.

Действительно, в этом случае максимальная напряжённость электрического поля, а следовательно, основное изменение скорости движущегося электрона будет в области, весьма близкой к катоду. Подавляющую же часть своего дальнейшего пути электрон пройдёт с почти постоянной по модулю скоростью. Вид его траектории, следовательно, будет определяться почти целиком магнитным полем.

Так как векторы \vec{B} и \vec{v} взаимно перпендикулярны, а $|\vec{v}| = \text{const}$, то электрон описывает в однородном магнитном поле магнетрона близкую к окружности траекторию, плоскость которой перпендикулярна вектору \vec{B} , т. е. оси лампы (рис. 10.2). Модуль силы Лоренца, с которой магнитное поле действует на электрон, равен $F_2 = evB$. Применяя второй закон Ньютона, найдём радиус окружности из уравнения $m_e v^2 / R = evB$

$$R = \frac{m_e v}{eB}, \quad (2)$$

здесь m_e — масса электрона.

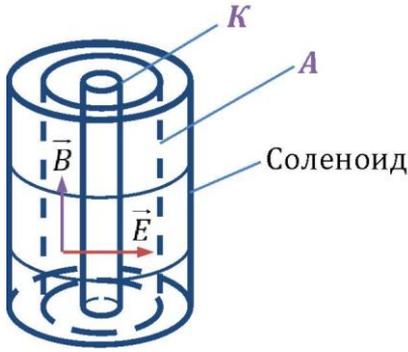


Рис. 10.1

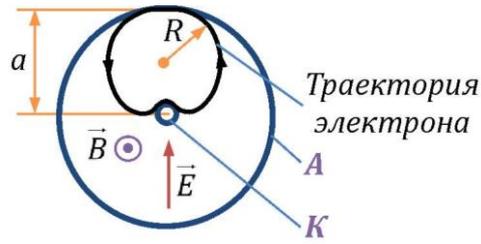


Рис. 10.2

Пренебрегая распределением вылетающих из катода электронов по скоростям и считая их скорость сразу после вылета из катода равной нулю, для определения значения v воспользуемся законом сохранения энергии

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU_A, \quad (3)$$

где U_A — анодное напряжение лампы. Действительно, численное значение скорости, т. е. кинетическую энергию электрона, изменяет электрическое поле. Магнитное поле меняет лишь направление скорости электрона и не совершает работы, так как $\vec{F}_2 \perp \vec{v}$.

Из соотношений (2) и (3) получим

$$R^2 = \frac{2m_e U_A}{eB^2}.$$

Следовательно, при заданном значении U_A радиус траектории R уменьшается с увеличением магнитной индукции B .

Если магнитное поле мало, то практически все электроны, вылетающие из катода, достигают анода. С ростом магнитной индукции кривизна траектории электронов увеличивается, при некотором значении $B = B_0$ электроны совсем не попадают на анод и по замкнутой траектории возвращаются к катоду (рис. 10.2). Таким образом, при $B = B_0$ анодный ток резко падает до нуля. Радиус кривизны траектории электрона, соответствующий $B = B_0$, можно определить по формуле $R = (a - b)/2$, где a и b — соответственно радиусы анода и катода лампы. Учитывая, что в магнетроне $a \gg b$, с достаточной степенью точности получим, что R будет равен половине радиуса анода, т. е. $R = a/2$. В этом случае

$$a^2 = \frac{8m_e U_A}{eB_0^2}.$$

Отсюда

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8U_A}{a^2 B_0^2}. \quad (4)$$

Для измерения e/m_e используется двухэлектродная лампа, включённая по схеме, данной на рис. 10.3А. Здесь ВС-24 — источник питания цепи соленоида, А — анод и К — катод электронной лампы; БП — блок питания цепи катода (напряжение накала U_H) и цепи анода (анодное напряжение U_A). Напряжение накала и напряжение в анодной цепи регулируют ручками, расположенными на панели БП. Лампа

помещена в центральную часть соленоида L , схема включения которого показана на [рис. 10.3Б](#). Ток в соленоиде изменяют с помощью ручки источника ВС-24.

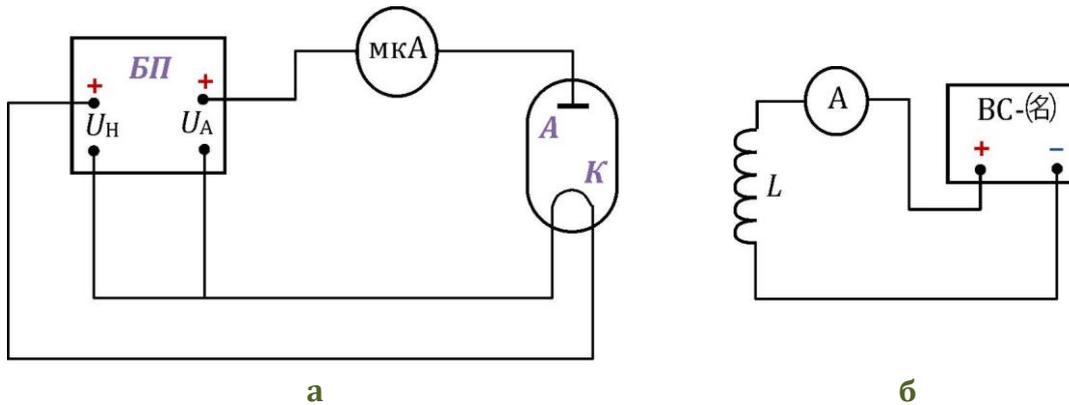


Рис. 10.3

Для измерения B_0 снимают график зависимости анодного тока I_A от тока в соленоиде I_c при фиксированных значениях U_H и U_A . График имеет резко спадающий прямолинейный участок ([рис. 10.4](#)), продолжая который до пересечения с осью абсцисс, получают значение тока I_0 в соленоиде, при котором анодный ток практически равен нулю, т. е. большинство электронов на анод не попадает. Определив из графика I_0 , находят соответствующую этому току индукцию B_0 . Магнитное поле в достаточно длинном соленоиде можно считать однородным и определять по формуле

$$B_0 = \frac{\mu_0 I_0 N}{l}, \quad (5)$$

где l — длина соленоида, N — число витков, μ_0 — магнитная постоянная.

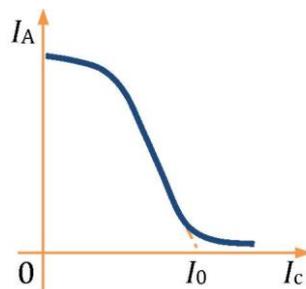


Рис. 10.4

Зная B_0 , по формуле (4) рассчитывают отношение $\frac{e}{m_e}$.

Значения постоянных a , l , N указаны на установке, там же даны рекомендуемые значения U_H и U_A .

2. Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь по схеме [рис. 10.3А, Б](#).
2. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 3](#)) и запишите данные установки.
3. Тумблером «Сеть» включите источник питания **БП** и с помощью соответствующих ручек на его панели установите значения U_H и U_A , указанные на установке. Величины U_H и U_A измеряют вольтметрами, находящимися также на панели **БП**.

4. Включите источник питания цепи соленоида. С помощью ручки на панели ВС-24 изменяйте ток в соленоиде I_c , начиная с нуля, и снимите зависимость анодного тока I_A от тока в соленоиде I_c . В области значений I_c , соответствующих наиболее быстрому спаду I_A , замеры I_c и I_A нужно проводить особенно тщательно и при возможно большем числе различных значений I_c , поддерживая постоянными U_H и U_A . Занесите результаты измерений I_A и I_c в [ТАБЛИЦУ 10.1](#).

5. Повторите действия пп. 3–4 при другом значении анодного напряжения U_A .

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $a = \dots$; $N = \dots$; $l = \dots$; $U_H = \dots$; $U'_A = \dots$; $U''_A = \dots$

Таблица 10.1

I_c, A	$I_A, \text{мкА}$	$\left(\frac{e}{m_e}\right)'$, Кл/кг	I_c, A	$I_A, \text{мкА}$	$\left(\frac{e}{m_e}\right)''$, Кл/кг

1. По результатам измерений постройте графики зависимости $I_A = f(I_c)$ (см. [рис. 10.4](#)) для двух значений U_A .

2. Найдите по графикам значения I'_0 , I''_0 и подставьте их в формулу (5) для вычисления индукции B'_0 и B''_0 .

3. Вычислите дважды отношение $\left(\frac{e}{m_e}\right)'$ и $\left(\frac{e}{m_e}\right)''$ по формуле (4).

4. Для одного из значений удельного заряда найдите погрешность ΔI_0 по графику. Запишите результат измерений

$$I_0 = \bar{I}_0 \pm \Delta I_0$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

5. Найдите абсолютную погрешность критического значения магнитной индукции B_0

$$\Delta B_0 = B_0 \sqrt{\left(\frac{\Delta I_0}{I_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2}$$

и запишите окончательный результат для B_0

$$B_0 = \bar{B}_0 \pm \Delta B_0$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

6. Найдите абсолютную погрешность удельного заряда электрона по формуле

$$\Delta \left(\frac{e}{m_e}\right) = \left(\frac{e}{m_e}\right) \sqrt{\left(\frac{\Delta U_A}{U_A}\right)^2 + 4 \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + 4 \left(\frac{\Delta B_0}{B_0}\right)^2}$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)) и запишите окончательный результат в виде

$$\frac{e}{m_e} = \overline{\left(\frac{e}{m_e}\right)} \pm \Delta\left(\frac{e}{m_e}\right).$$

7. Проверьте выполнение неравенства

$$\left| \left(\frac{e}{m_e}\right)' - \left(\frac{e}{m_e}\right)'' \right| \leq \Delta\left(\frac{e}{m_e}\right),$$

а также неравенства

$$\left| \overline{\left(\frac{e}{m_e}\right)} - \left(\frac{e}{m_e}\right)^* \right| \leq \Delta\left(\frac{e}{m_e}\right),$$

где $\left(\frac{e}{m_e}\right)^*$ — табличное значение удельного заряда электрона (см. [Приложение 5](#)).

Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные силовые характеристики электромагнитного поля и их единицы измерения.
2. Дайте определение вектора магнитной индукции.
3. Какие методы расчёта магнитной индукции вам известны?
4. Выведите формулу для расчёта магнитной индукции длинного соленоида.
5. Какие поля действуют в данной установке на движущийся электрон? Как они направлены?
6. Как найти результирующую силу, с которой скрещенные поля действуют на электрон?
7. Какую траекторию описывает электрон в данной установке? Как меняется форма траектории при изменении модуля магнитной индукции?
8. Почему при выводе окончательной формулы для нахождения e/m_e пренебрегают действием электрического поля?
9. Постройте график зависимости модуля напряжённости электрического поля от расстояния от оси электронной лампы.
10. Для чего строят график зависимости анодного тока от тока в соленоиде?
11. Как найти индукцию магнитного поля B_0 , при которой исчезает анодный ток в лампе?
12. Электрон влетает в однородные магнитное и электрическое поля, направленные так, что $\vec{B} \perp \vec{E}$. Как должна быть направлена скорость электрона, чтобы его движение было прямолинейно и равномерно?

Лабораторная работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КАТУШКАХ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Цель работы: экспериментальное изучение магнитного поля и определение величины и направления вектора магнитной индукции в области, ограниченной двумя коаксиальными круговыми катушками, по которым протекают токи одинаковой величины, находящимися на расстоянии друг от друга, близком к их радиусу (*катушками Гельмгольца*).

Введение

Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции \vec{B} . Одним из методов теоретического расчёта магнитных полей токов различной формы является метод суперпозиций. Примеры расчёта полей кругового тока и соленоида методом суперпозиций рассмотрены во [ВВЕДЕНИИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 8](#).

Соленоид (цилиндрическая катушка с обмоткой) позволяет получить однородное магнитное поле как в продольном, так и в радиальном направлениях. В центре длинного соленоида индукция магнитного поля близка к предельному значению

$$B = \mu_0 n I, \quad (1)$$

где n — количество витков на единицу длины (*плотность намотки*) соленоида, I — сила тока в обмотке. Поле внутри длинного соленоида однородно, т. е. вектор магнитной индукции одинаков по модулю и направлен одинаково во всех точках внутри соленоида.

1. Описание установки и метода измерений

В данной лабораторной установке используется система катушек Гельмгольца ([рис. 11.1](#)). Через каждую катушку пропускают в одном направлении электрический ток одинаковой величины.

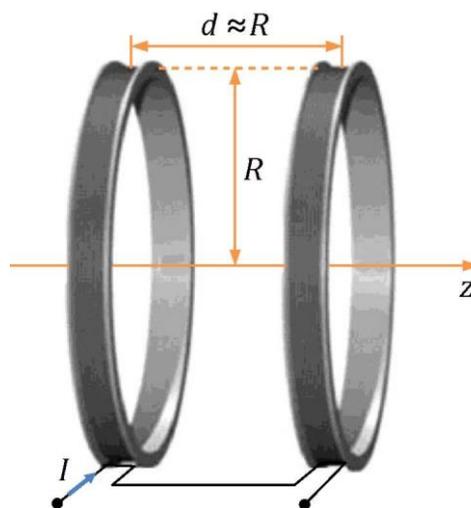


Рис. 11.1

Для системы из двух одинаковых одиночных витков радиуса R , соосно расположенных на оси z на расстоянии d друг от друга ([рис. 11.2](#)), поле в точке A на расстоянии z от плоскости левого витка равно

$$B(z) = B_1(z) + B_1(z - d), \quad (2)$$

где $B_1(z)$ — величина индукции магнитного поля на оси z от одного витка. Направление вектора магнитной индукции \vec{B} определяется по правилу правого винта (векторы магнитной индукции полей, создаваемых первым и вторым витком, направлены одинаково, так как направления токов одинаковы).

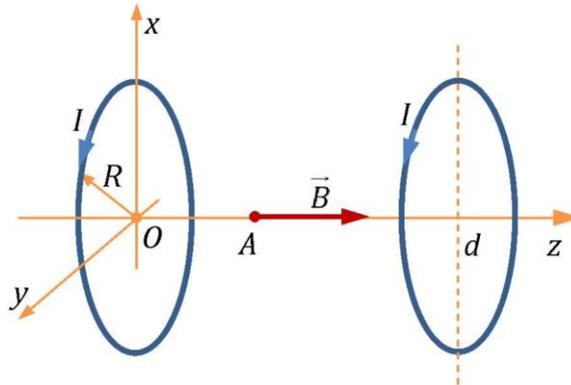


Рис. 11.2

Данная система колец обладает осевой симметрией, поэтому в дальнейшем будем использовать продольную (осевую) координату z и поперечную (радиальную) координату r .

Формула (2) следует из принципа суперпозиции полей. Начало координат выбрано в центре первого витка, поэтому во втором слагаемом центр второго витка сдвинут на величину d относительно начала координат.

Известно, что величина магнитной индукции $B_1(z)$ от одного витка радиусом R , сила тока в котором I , определяется выражением

$$B_1(z) = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (3)$$

а если катушка содержит N витков, то получим выражение

$$B_1(z) = \frac{\mu_0 I N R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (4)$$

Для того чтобы выяснить, насколько однородно магнитное поле вдоль оси z в системе двух катушек, рассмотрим, чему равны последовательные производные от выражения (2) по z . Чем выше порядок первой не равной нулю производной в данной точке, тем однороднее поле в её окрестности.

Функция (3) является чётной, а её производные по z нечётного порядка являются нечётными функциями, т. е. значения производных нечётного порядка функций $B_1(z)$ и $B_1(z - d)$ отдельно будут равны нулю в центре витков. Можно показать, что производные нечётного порядка от выражения (2) по z будут равны нулю в точке $z_0 = d/2$. Вторая производная функции (3) имеет вид

$$\frac{d^2 B_1(z)}{dz^2} = \frac{3\mu_0 I R^2 (4z^2 - R^2)}{(R^2 + z^2)^{7/2}} \quad (5)$$

и обращается в нуль при $z = R/2$.

Рассмотрев совместно полученные условия, получаем, что при $z = R$ характеристики магнитного поля между катушками будут в наибольшей степени приближены к однородному, так как производные первого, второго и третьего порядка будут равны нулю в точке на оси z , расположенной между катушками.

В точке, находящейся на оси посередине между двумя катушками Гельмгольца ($z = R/2$) с учётом совместного действия обеих катушек, величина магнитной индукции будет равна

$$B_0 = \frac{2\mu_0 INR^2}{2\left(R^2 + \left(\frac{R}{2}\right)^2\right)^{3/2}} = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 IN}{2R}. \quad (6)$$

На [рис. 11.3](#) показан график зависимости модуля магнитной индукции от координаты z для случая $d = R$: отдельно для каждой катушки $B_1(z)$ и $B_1(z - d)$ и результат сложения полей $B(z)$ на оси колец Гельмгольца.

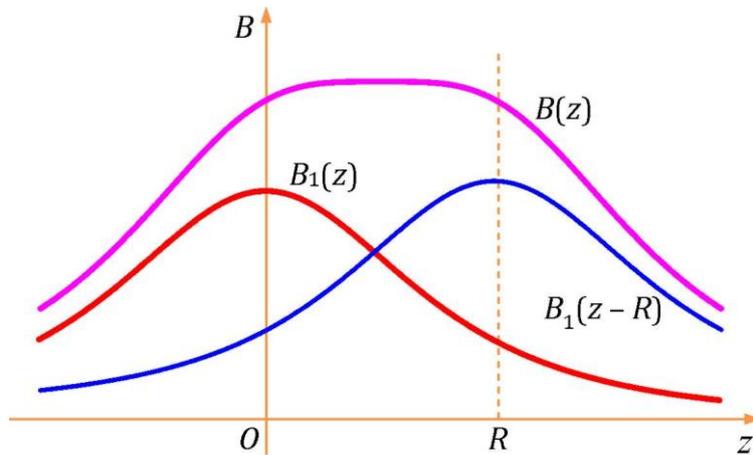


Рис. 11.3

Изменение поля ΔB при отклонении от z_0 на Δz , как показывает расчёт, будет иметь четвёртый порядок малости по относительному смещению от центра системы:

$\frac{\Delta B}{B} \approx \left(\frac{\Delta z}{d}\right)^4$. Расчёт показывает, что различие в величинах магнитной индукции в

центре колец и в точке посередине между кольцами при $I = 1$ А, $N = 1$, $R = 0,1$ м составляет 5,7%. Таким образом, магнитное поле на оси системы в области между двумя катушками Гельмгольца действительно обладает высокой степенью однородности вдоль оси z .

Можно также убедиться, что высокая однородность магнитного поля будет и в поперечном направлении, т. е. поле однородно в значительной части всего пространства между катушками.

Приведённые результаты получены для двух бесконечно тонких витков. Реально применяются катушки с большим числом витков. Поэтому катушки делают такими, чтобы размер сечения обмотки был намного меньше среднего радиуса катушек R_0 , и устанавливают их на расстоянии между центрами $d \approx R_0$. В формулах (3)–(6), следовательно, нужно полагать $R = R_0$.

Для измерения магнитной индукции используется один из методов, основанный на [эффекте Холла](#) (см. [ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ В ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 8](#)).

Лабораторный стенд (рис. 11.4) включает в себя: **1** — катушки Гельмгольца; **2** — блок питания колец; **3** — измеритель магнитного поля (датчик Холла), установленный на электромеханическом сканирующем устройстве; **4** — электромеханическое сканирующее устройство датчика Холла; **5** — датчик положения измерителя магнитного поля, встроенный в привод сканирующего устройства с блоком питания сканирующего устройства. К приборам и принадлежностям относятся: компьютер с необходимым программным обеспечением и соединительные кабели для подключения датчиков к компьютеру.

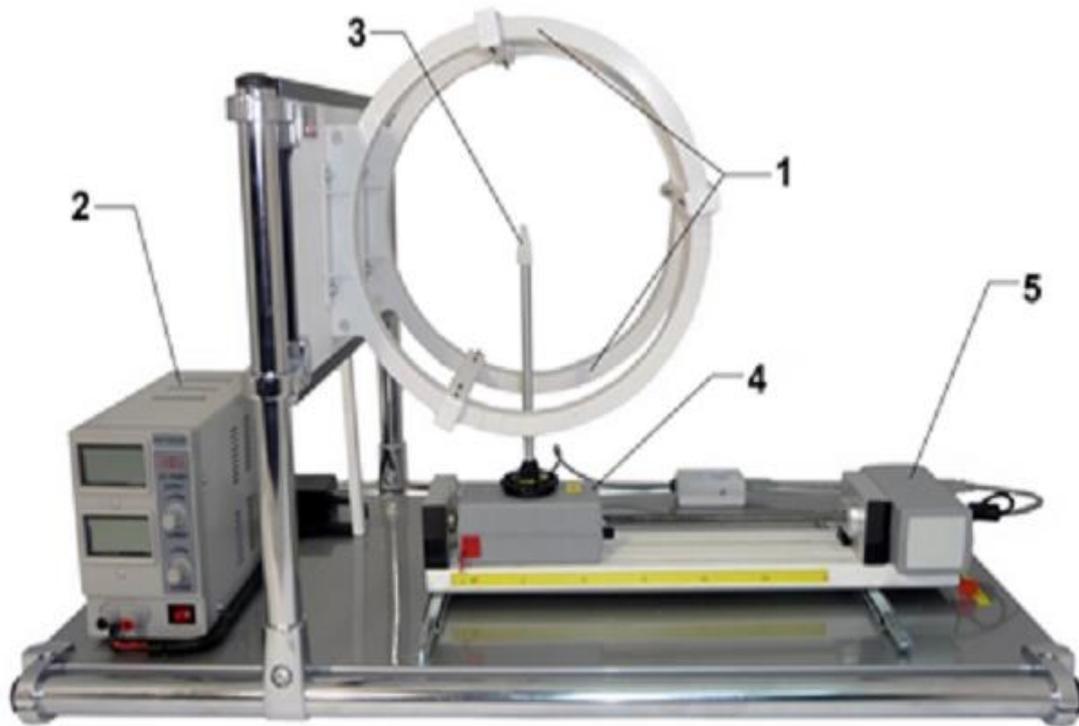


Рис. 11.4

Катушки Гельмгольца (рис. 11.5) закрепляются на вертикальных стойках лабораторной установки. Датчик Холла **3**, находящийся на каретке электромеханического сканирующего устройства на конце вертикального стержня **6**, располагается на высоте оси катушек. Вертикальный стержень может поворачиваться вокруг своей оси на 90° , обеспечивая необходимую ориентацию датчика Холла по отношению к оси катушек. Рабочими являются два положения датчика Холла — для измерения продольной составляющей B_z вектора магнитной индукции и радиальной составляющей B_r . При измерении продольной составляющей магнитной индукции верхнее ребро белого корпуса датчика поля должно быть ориентировано перпендикулярно оси катушек.

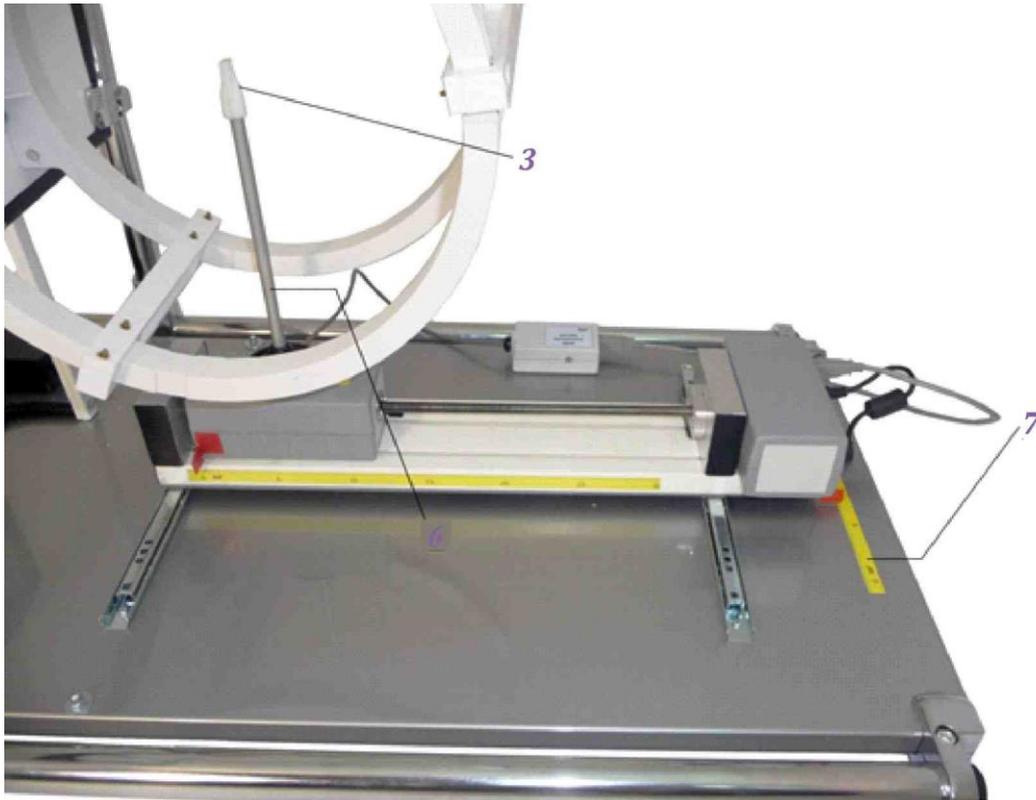


Рис. 11.5

Перемещение датчика магнитного поля в поперечном направлении (изменяется координата r) осуществляется сканирующим устройством с одновременным вводом координаты r в компьютер. Положение каретки (и датчика магнитного поля), соответствующее осевой линии катушек Гельмгольца (точка $r = 0$) является одной из крайних точек устройства перемещения каретки. Для визуализации радиальной координаты положения датчика Холла на стенде имеется поперечно расположенная линейка 7.

Перемещение всего сканирующего устройства вдоль оси z осуществляется вручную с контролем положения по линейке 7 и вводом установленной координаты z в компьютер с клавиатуры. Ноль на линейке соответствует расположению плоскости сканирования вблизи одной из катушек Гельмгольца.

2. Порядок выполнения работы

1. Включите в сеть источники питания катушек и устройства перемещения датчика. При этом клавиша включения источника питания катушек должна остаться в выключенном состоянии. Проверьте, что разъем питания устройства перемещения датчика вставлен в гнездо корпуса.
2. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. [Приложение 3](#)) и запишите данные установки.
3. Запустите программу «Практикум по физике» и выберите сценарий «Исследование магнитного поля в катушках Гельмгольца» (кнопка ). Если устройство перемещения датчика оказалось в какой-либо точке своей направляющей (например, осталось с предыдущего опыта), то при этом оно начнёт движение в крайнее (исходное) положение, ближайшее к центральной оси катушек.

4. Установите направляющую в крайнее положение, соответствующее началу шкалы по оси z .
5. Поворачивая основание стойки, на которой находится датчик магнитного поля, установите его в положение, обеспечивающее регистрацию z -компоненты магнитного поля (ребро корпуса датчика повернуто параллельно плоскости катушек).
6. В верхней части окна регистрации индукции магнитного поля нажмите кнопку  для установки нуля в калибровке датчика. Аналогичная кнопка в окне устройства перемещения M201 возвращает каретку в исходное положение.
7. Включите блок питания катушек Гельмгольца и установите рекомендованное значение силы тока I . Рукоятку регулятора напряжения при этом следует установить на максимальное значение. Это позволит блоку питания поддерживать стабильный ток в условиях небольшого роста сопротивления катушек из-за их нагрева в процессе работы.
8. Нажмите кнопку запуска измерений (). Введите в программу значение z -координаты датчика. Каретка при этом начнёт движение из осевого центра катушек ($r = 0$) в сторону увеличения радиальной координаты. На экране будет строиться кривая, показывающая изменение выбранной для регистрации составляющей магнитного поля.
9. После достижения датчиком крайнего положения за пределами колец движение останавливается. Следует прекратить измерения, нажав на кнопку . Каретка сама вернётся в начальное положение.
10. Передвиньте направляющую рейку и установите следующее рекомендованное значение z -координаты датчика измерения магнитной индукции, изменив тем самым плоскость сканирования магнитного поля, и введите в программу новое значение z -координаты.
11. Нажмите кнопку запуска измерений, введите новую координату, и каретка с датчиком начнёт движение. В окне программы «Индукция магнитного поля» на экране компьютера будет формироваться следующий график зависимости индукции магнитного поля от расстояния от оси системы.
12. Перемещая направляющую и вводя новую z -координату после каждого прохода каретки с датчиком, осуществите регистрацию z -компоненты индукции магнитного поля в области между катушками.
13. После получения данных для выбранной компоненты магнитного поля отключите питание катушек и проанализируйте полученные результаты, как указано ниже в [РАЗДЕЛЕ 3](#). Сохраните полученные данные в файле.
14. Проведите аналогичные измерения для радиальной составляющей магнитного поля. Для этого датчик индукции магнитного поля поверните на 90° в соответствии с указаниями на установке.

3. Обработка результатов измерений

Таблица 11.1.

Осевая составляющая магнитной индукции

B_0 , мТл	Предельное отклонение δ	Предельное отклонение ΔB , мТл	Предельное значение		Предельный радиус r , мм				
			B_{\min} , мТл	B_{\max} , мТл	Плоскость сканирования				
					z_1	z_2	z_3	z_4	z_5
	5%								
	10%								
	20%								

Таблица 11.2.

Радиальная составляющая магнитной индукции

B_0 , мТл	Предельное отклонение δ	Предельное отклонение ΔB , мТл	Предельное значение		Предельный радиус r , мм				
			B_{\min} , мТл	B_{\max} , мТл	Плоскость сканирования				
					z_1	z_2	z_3	z_4	z_5
	5%								
	10%								
	20%								

1. На основании полученных данных (окно программы «Индукция магнитного поля») определите величину осевой составляющей магнитной индукции B_{z0} на оси в центральной области между катушками. Для получения значений индукции магнитного поля в требуемых точках используйте маркер в виде перекрестия. Занесите найденное значение в [ТАБЛИЦУ 11.1](#).

2. Рассчитайте по формуле (6) теоретическое значение B_{z0} в центре катушек Гельмгольца при $d = R_0$. Сравните полученное значение с результатами эксперимента.

3. Рассчитайте по формуле (4) и сравните с результатами эксперимента индукцию магнитного поля в нескольких точках оси катушек Гельмгольца (значение тока в катушках отображается на индикаторе тока источника питания).

4. Вычислите величины предельных отклонений и предельные значения магнитных индукций по формулам

$$\Delta B = \delta \cdot B_{z0}, \quad B_{\min} = B_{z0} - \Delta B, \quad B_{\max} = B_{z0} + \Delta B.$$

Запишите полученные значения в [ТАБЛИЦУ 11.1](#).

5. Установив максимальное отклонение от величины B_0 в 5%, 10%, 20%, найдите геометрические размеры областей пространства между катушками Гельмгольца, где отклонения магнитной индукции не превышают установленные пределы. Результаты внесите в [ТАБЛИЦУ 11.1](#).

6. Данные для радиальной составляющей B_r , аналогичные данным по пп. 1, 4, 5 для B_z , занесите в [ТАБЛИЦУ 11.2](#).

7. По результатам экспериментов сделайте выводы об однородности магнитного поля для осевой составляющей B_z и для радиальной составляющей B_r .

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа.
2. Выведите формулу для вектора магнитной индукции на оси тонкого витка с током.
3. С помощью закона полного тока найдите вектор индукции магнитного поля, создаваемого бесконечно длинным проводником с током и внутри бесконечно длинного соленоида.
4. Назовите единицы измерения магнитной индукции и напряжённости магнитного поля.
5. Как определяется область с однородным полем в катушках Гельмгольца?
6. В чём состоит основное отличие магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца, от магнитного поля соленоида?
7. Какая сила действует на электрический заряд в магнитном поле?
8. В чём состоит эффект Холла и как он используется для измерения индукции магнитного поля?

Лабораторная работа № 12

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ПО МЕТОДУ СТОЛЕТОВА

Цель работы: изучение зависимости магнитной индукции и магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля для ферромагнитного материала.

Введение

Теория ферромагнетизма изложена во [ВВЕДЕНИИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 9](#).

1. Описание установки и метода измерений

Для экспериментального исследования зависимостей магнитной индукции и относительной магнитной проницаемости ферромагнетика от напряжённости магнитного поля в данной работе используется *метод Столетова*.

Исследуемый образец представляет собой тонкое железное кольцо — тороид, на который равномерно по всему кольцу намотана первичная обмотка **I** ([рис. 12.1](#)) с числом витков N_1 . Эта обмотка соединена с источником. Текущий по обмотке **I** ток I создаёт внутри тороида магнитное поле, напряжённость которого можно найти по закону полного тока. Получается следующее выражение для расчёта напряжённости магнитного поля:

$$H = \frac{N_1 I}{l}, \quad (1)$$

где l — длина кольца (штриховая линия на [рис. 12.1](#)). Так как кольцо тонкое, магнитное поле по сечению кольца можно считать однородным.

Каждому значению тока I соответствует определённое значение не только напряжённости магнитного поля H , но и индукции B . Для экспериментального определения значения B в работе используется явление электромагнитной индукции. Для этого на кольцо навивается вторичная обмотка **II** с небольшим числом витков N_2 ([рис. 12.1](#)). Концы обмотки **II** подключают к баллистическому гальванометру⁴.

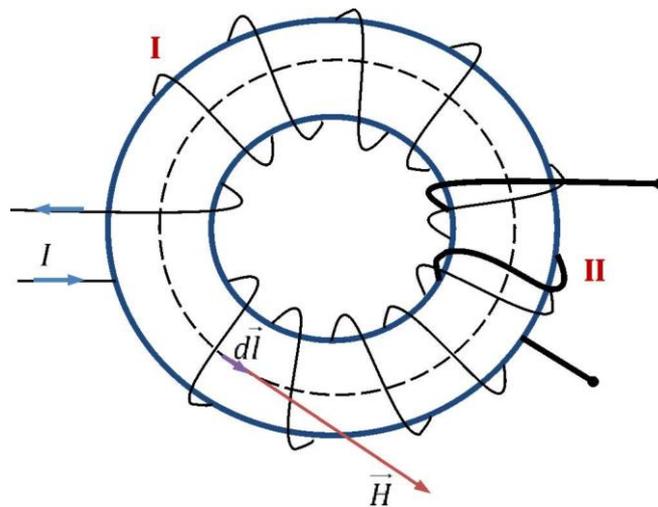


Рис. 12.1

Схема установки представлена на [рис. 12.2](#). Обмотка **I** подключена к блоку питания **БП**. С помощью переключателя **П** изменяют направление тока в катушке **I** на противоположное (при неизменной величине тока). При этом происходит изменение

⁴ Описание баллистического гальванометра дано в [ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 2](#).

направления \vec{B} , а следовательно, изменение полного магнитного потока Ψ (*потокосцепления*), пронизывающего витки вторичной обмотки. По закону Фарадея в обмотке **II** возникает вихревое электрическое поле, характеризуемое ЭДС индукции $\mathcal{E} = -\frac{d\Psi}{dt}$, и в цепи баллистического гальванометра **G** появляется индукционный ток

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Psi}{dt}.$$

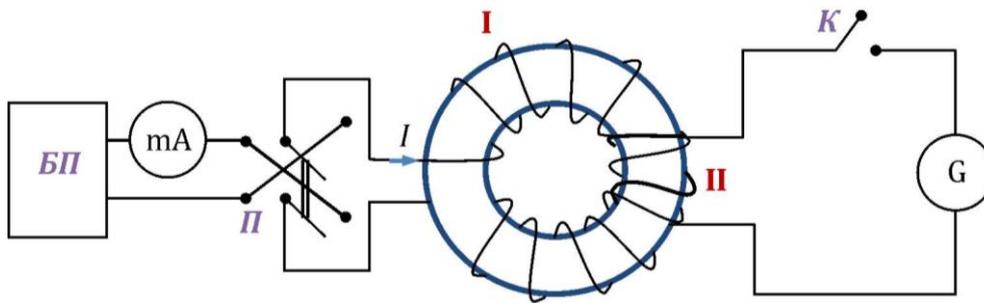


Рис. 12.2

Так как максимальный отброс «зайчика» баллистического гальванометра пропорционален не силе тока, а заряду, проходящему по нему, то для заряда имеем $dq = idt = -d\Psi/R$. Проинтегрировав это выражение, найдём полный индукционный заряд, прошедший через гальванометр при изменении направления тока в катушке **I**:

$$q = \int dq = -\frac{1}{R} \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} d\Psi = \frac{1}{R} (\Psi_1 - \Psi_2) = \frac{N_2}{R} (\Phi_1 - \Phi_2),$$

где Φ_1 и Φ_2 — начальный и конечный магнитные потоки сквозь поверхность одного витка катушки **II**. Так как $\Phi_1 = BS \cos 0^\circ$, $\Phi_2 = BS \cos 180^\circ$, то $\Delta\Phi = 2BS$, где S — площадь сечения тороида. Следовательно,

$$q = \frac{2BSN_2}{R}. \quad (2)$$

Заряд q определяют по отбросу «зайчика» баллистического гальванометра $q = A \cdot n$, где A — баллистическая постоянная гальванометра. Подставив $q = A \cdot n$ в формулу (2), получим окончательное выражение для расчёта B :

$$B = \frac{AnR}{2SN_2} = C \cdot n, \quad (3)$$

где

$$C = \frac{AR}{2SN_2}. \quad (4)$$

Таким образом, работа сводится к расчёту напряжённости магнитного поля по формуле (1) и магнитной индукции по формуле (3) при 15 различных токах I в первичной цепи. Значения постоянных A , B , S , l , N_1 , N_2 заданы на установке. Магнитную проницаемость рассчитывают по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (5)$$

2. Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 3](#)) и запишите данные установки.
2. Соберите цепь по схеме [рис. 12.2](#). Включите блок питания **БП**.
3. Замкните переключатель **П** при разомкнутом ключе **К**. С помощью ручки, находящейся на панели **БП**, установите максимальное значение силы тока в первичной обмотке (указано на установке).
4. Замкните вторичную цепь ключом **К** и заметьте нулевое положение «зайчика» на шкале баллистического гальванометра.
5. Измените переключателем **П** направление тока в первичной цепи на противоположное и измерьте крайнее деление n , до которого отклонился «зайчик».
6. Разомкните ключом **К** вторичную цепь, верните переключатель **П** в исходное положение.
7. Ручкой источника **БП** уменьшите ток I в обмотке **I**. При новом значении тока проделайте пп. 4–6. При каждом значении тока (от максимального до 0,005 А) измерьте отброс «зайчика» n (всего 15 значений). (Каждый раз, устанавливая новое значение тока, необходимо размыкать ключом **К** вторичную цепь).

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $N_1 = \dots; N_2 = \dots; S = \dots; A = \dots; R = \dots; l = \dots$

Таблица 12.1

№ п/п	I, A	$H, A/m$	$n, \text{дел}$	$B, \text{Тл}$	μ

1. Рассчитайте напряжённость магнитного поля для всех токов по формуле [\(1\)](#). Результаты занесите в [ТАБЛ. 12.1](#).
2. Найдите постоянный коэффициент C по формуле [\(4\)](#).
3. Рассчитайте магнитную индукцию для всех токов по формуле [\(3\)](#). Результаты занесите в [ТАБЛ. 12.1](#).
4. По результатам вычислений B и H найдите μ при каждом токе по формуле [\(5\)](#). Результаты занесите в [ТАБЛ. 12.1](#).
5. Рассчитайте погрешности $\Delta H, \Delta B, \Delta \mu$ для максимального тока по формулам

$$\Delta H = H \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_1}{N_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2},$$

$$\Delta B = B \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_2}{N_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2},$$

$$\Delta \mu = \mu \sqrt{\left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2},$$

где погрешность баллистической постоянной $\frac{\Delta A}{A} = 0,02$.

6. Запишите окончательный результат для H, B и μ в виде

$$B = \bar{B} \pm \Delta B, \quad H = \bar{H} \pm \Delta H, \quad \mu = \bar{\mu} \pm \Delta \mu$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

7. Постройте графики $B = f(H)$, $\mu = f(H)$. Сделайте выводы.

8. Рассчитайте намагниченность и постройте кривую зависимости $J = f(H)$; при максимальном токе.

Контрольные вопросы

- 1.** Дайте определение векторов магнитной индукции и намагниченности.
- 2.** Какая связь существует между векторами \vec{B} , \vec{H} , \vec{J} ?
- 3.** Объясните суть метода Столетова.
- 4.** Каким образом в работе находят напряжённость магнитного поля?
- 5.** Какое физическое явление используется для определения магнитной индукции? Выведите расчётную формулу для B .
- 6.** Как находят относительную магнитную проницаемость ферромагнетика?
- 7.** Каким образом происходит намагничивание ферромагнетиков?
- 8.** Объясните с помощью теории ферромагнетизма график $B(H)$.
- 9.** Поясните график зависимости $\mu(H)$. Докажите, что $\mu \rightarrow 1$ при $H \rightarrow \infty$.
- 10.** Объясните явление гистерезиса ферромагнетиков.

Лабораторная работа № 13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ КАТУШЕК

Цель работы: определение индуктивности двух разных соленоидов, взаимной индуктивности системы этих соленоидов при различных способах их включения.

Введение

Рассмотрим контур с электрическим током силой I . Ток создаёт магнитное поле. Полный магнитный поток Ψ (потокосцепление) сквозь поверхность, ограниченную контуром, называется **собственным магнитным потоком**. При изменении силы тока в контуре будет изменяться и собственный магнитный поток. Это приводит к тому, что в контуре индуцируется вихревое электрическое поле, энергетической характеристикой которого является ЭДС самоиндукции. Величина Ψ пропорциональна магнитной индукции B , которая, в свою очередь, по закону Био-Савара-Лапласа пропорциональна силе тока, вызвавшего поле. Отсюда вытекает, что ток в контуре I и создаваемый им полный магнитный поток Ψ пропорциональны друг другу: $\Psi = LI$. Коэффициент пропорциональности L называется **индуктивностью** контура. Следовательно, индуктивность — это величина, численно равная собственному магнитному потоку, пронизывающему данный контур при силе тока в нем, равной 1 А. Индуктивность контура в отсутствие ферромагнетиков зависит только от геометрии контура (т. е. его формы, размеров, числа витков). В частности, индуктивность длинного соленоида (если диаметр его витков много меньше его длины) можно рассчитать по формуле

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}, \quad (1)$$

где N — число витков; $S = \frac{\pi D^2}{4}$ — площадь поперечного сечения соленоида; D и l — соответственно его диаметр и длина; μ_0 — магнитная постоянная (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 5](#)).

Теперь рассмотрим два контура, расположенных достаточно близко друг к другу ([рис. 13.1](#)). Если в контуре **I** течёт ток силы I_1 , то он создаёт сквозь поверхность, ограниченную контуром **II**, полный магнитный поток Ψ_{12} , пропорциональный току I_1 : $\Psi_{12} = M_{12} I_1$. Аналогично при протекании тока I_2 по второму контуру возникает магнитный поток, сцепленный с контуром **I**: $\Psi_{21} = M_{21} I_2$. Коэффициенты пропорциональности M_{12} и M_{21} называются **взаимными индуктивностями** контуров. Их величина зависит от геометрии и взаимного расположения контуров и не зависит от силы токов I_1 и I_2 при условии отсутствия ферромагнетиков. В этом случае из закона сохранения энергии следует, что $M_{21} = M_{12}$.

Для двух длинных соленоидов ([рис. 13.2](#)), надетых на один сердечник, коэффициент взаимной индукции

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 S_2}{l_1}, \quad (2)$$

где N_1 и N_2 — число витков внешнего L_1 и внутреннего L_2 соленоидов, S_2 — площадь сечения внутреннего соленоида, l_1 — длина внешнего соленоида.

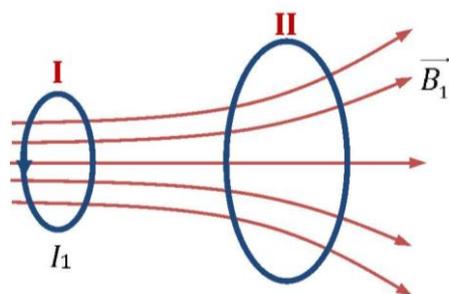


Рис. 13.1

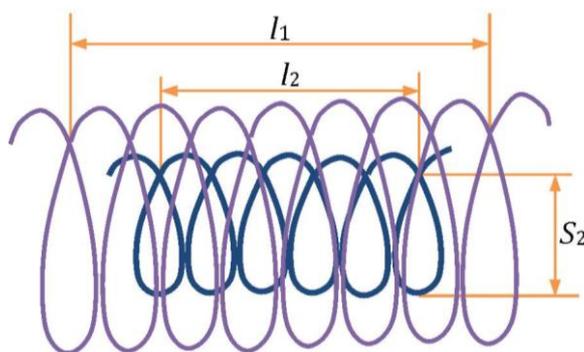


Рис. 13.2

Рассмотрим индуктивность системы двух соленоидов L_1, L_2 для двух различных способов их соединения, изображённых на [рис. 13.3А](#) и [13.3Б](#). Индуктивность этой системы катушек в том случае, когда их магнитные поля направлены в одну сторону ([рис. 13.3А](#)), определяется по формуле

$$L' = L_1 + L_2 + 2M', \quad (3)$$

где L_1 и L_2 — индуктивность каждого соленоида в отдельности, M' — взаимная индуктивность.

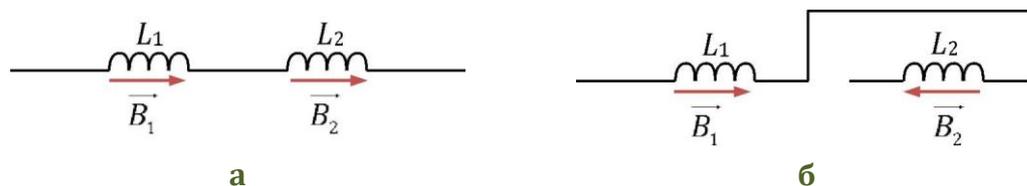


Рис. 13.3

Если соленоиды подключить так, что их магнитные поля направлены навстречу друг другу ([рис. 13.3Б](#)), то индуктивность такой системы равна

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M''. \quad (4)$$

Из формул (3) и (4) выводят выражения для M' и M'' :

$$M'' = \frac{L' - (L_1 + L_2)}{2}, \quad M' = \frac{(L_1 + L_2) - L''}{2}. \quad (5)$$

Величины L_1, L_2, L', L'' находят экспериментально, а M' и M'' вычисляют по формулам (5). При неизменном расположении соленоидов $M' = M'' = M$. Вывод формул (1), (3), (4) предлагается студентам провести **самостоятельно**.

1. Описание установки и метода измерений

Принципиальная схема установки представлена на [рис. 13.4](#). От генератора звуковой частоты Γ переменное напряжение $U = U_0 \cos \omega t$ подаётся на последовательно

соединённые соленоид L и резистор R . Милливольтметр mV служит для определения амплитудных значений напряжения, а осциллограф ЭО — для наблюдения качественной картины изменения этого напряжения. Сопротивление R подбирают таким образом, что напряжение на катушке L много меньше, чем на резисторе R . В этом случае проходящий через соленоид ток можно с достаточной точностью определить по формуле

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_0 \cos \omega t}{R},$$

где U_0 — амплитудное значение напряжения, $\omega = 2\pi\nu$ — круговая частота, ν — частота. Вследствие изменения потокосцепления самоиндукции соленоида ЭДС самоиндукции в нём

$$\mathcal{E}_s = -\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{dI}{dt} = L \frac{U_0}{R} \omega \cdot \sin \omega t = U_L \sin \omega t,$$

где $U_L = \frac{U_0 L \omega}{R}$ — амплитудное значение ЭДС самоиндукции. Отсюда находят индуктивность соленоида

$$L = \frac{U_L R}{U_0 \omega} = \frac{U_L R}{U_0 2\pi\nu}. \quad (6)$$

Значения U_0 и U_L измеряют по милливольтметру mV , частоту ν — по шкале частот генератора, R задано на установке.

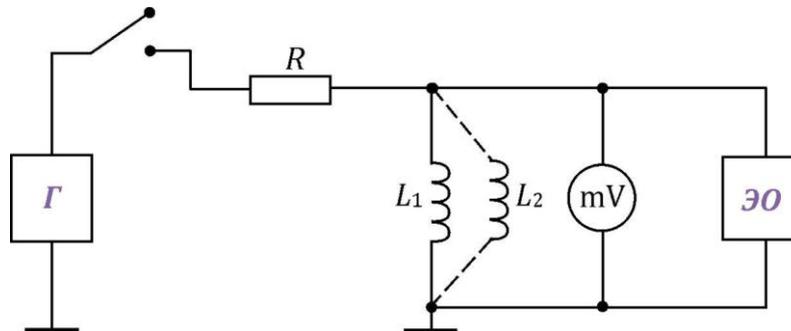


Рис. 13.4

Измерения проводят для двух разных соленоидов L_1 , L_2 , а также для системы этих соленоидов, надетых друг на друга, при двух способах их соединения L' , L'' . По формулам (5) вычисляют M' и M'' и убеждаются в справедливости равенства $M' = M''$. Найденные из опыта значения L_1 , L_2 и M сравнивают с их теоретическими значениями, рассчитанными по формулам (1) и (2).

2. Порядок выполнения работы

Перед началом работы ознакомьтесь с таблицей на стенде.

Часть 1. Определение индуктивности соленоидов L_1 и L_2

1. Для измерения U_0 соберите электрическую цепь по схеме рис. 13.4 без соленоида. Концы кабелей от генератора, осциллографа, милливольтметра с обозначением «Земля» (\perp) подключите к нижнему ряду клемм, расположенных на специальной панели.

2. С помощью ручки генератора «Частота» установите частоту $\nu = 200$ кГц (или 100 кГц).

3. Включите генератор, милливольтметр, осциллограф тумблерами «Сеть». Положения всех ручек этих приборов указаны в таблице к установке.
4. Напряжение U_0 измерьте по милливольтметру. С помощью ручки генератора «Рег. выхода» добейтесь значения U_0 около 2–3 В. Предварительно установите пределы измерений на вольтметре генератора и на милливольтметре — 3 В.
5. В цепь по схеме [рис. 13.4](#) подключите один из соленоидов (например, внешний L_1).
6. Запишите показания милливольтметра U_L , переключив пределы его измерений на 300, 100 или 30 мВ. Предел необходимо выбирать таким, чтобы отклонение стрелки было близким к максимальному.
7. Отключив соленоид L_1 , присоедините внутренний соленоид L_2 . Запишите показания милливольтметра U_L для этого соленоида (не изменяя U_0 и ν).
8. Пронаблюдайте на осциллографе изменение амплитуды напряжения U_L качественно.

Часть 2. Определение индуктивностей L' , L'' и взаимной индуктивности M

1. Для измерения индуктивности L' системы соленоидов ([рис. 13.3А](#)) соедините их, как показано на [рис. 13.5А](#) (на рисунке цифрами отмечены клеммы соленоидов). Соленоиды при этом должны быть вставлены один в другой.
2. Запишите показания милливольтметра U'_L при указанном в п. 1 расположении соленоидов, не меняя значений U_0 и ν , установленных в предыдущих опытах.
3. Соединение соленоидов L'' осуществите вторым способом, изображённым на [рис. 13.5Б](#) (ср. [рис. 13.3Б](#)).
4. Запишите показания милливольтметра U''_L при тех же U_0 и ν . Пронаблюдайте качественную картину изменения напряжения U'_L и U''_L на экране осциллографа.

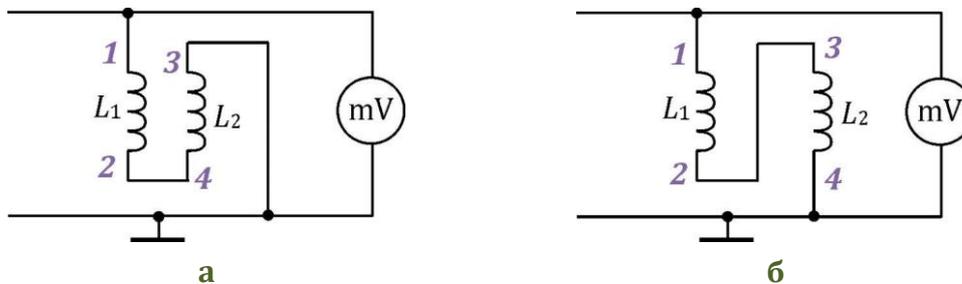


Рис. 13.5

5. Все измерения частей 1 и 2 по указанию преподавателя повторите в той же последовательности при другой частоте (в пределах от 100 до 200 кГц).
6. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. Приложение 3) и запишите данные установки. В таблицу спецификации занесите все пределы, на которых проводились измерения.

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $R = 1,0$ кОм; $D_1 = \dots$; $l_1 = \dots$; $N_1 = \dots$; $D_2 = \dots$; $l_2 = \dots$; $N_2 = \dots$

Таблица 13.1

Определение индуктивностей L_1, L_2

$U_0 = 2 \text{ В}$	ν , кГц	U_L , мВ	L , мкГн	\bar{L} , мкГн
Внешний соленоид, L_1				
Внутренний соленоид, L_2				

Таблица 13.2

Определение индуктивностей L', L'' и взаимной индуктивности M

$U_0 = 2 \text{ В}$	ν , кГц	U_L , мВ	L , мкГн	\bar{L} , мкГн	M , мкГн
I соединение, L', M'					
II соединение, L'', M''					

Таблица 13.3

Теоретический расчёт L_1, L_2 и M

	D , мм	l , мм	N	$L_{\text{теор}}$, мкГн	$M_{\text{теор}}$, мкГн
Внешний соленоид, L_1					
Внутренний соленоид, L_2					

1. По формуле (6) найдите значения L_1, L_2 и L', L'' .

2. Рассчитайте M' и M'' по (5); окончательно

$$M = \frac{M' + M''}{2}.$$

3. Рассчитайте теоретические значения L_1, L_2, M . Более точные расчёты с учётом неоднородности магнитного поля на концах соленоида приводят к необходимости введения в формулы (1) и (2) коэффициента K , который зависит от соотношения между D и l . Для обоих соленоидов можно принять $K \approx 0,9$.

4. Рассчитайте абсолютные погрешности величин L_1, L_2, M по формулам

$$\Delta L = L \sqrt{\left(\frac{\Delta U_L}{U_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_0}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)^2},$$

$$\Delta M = M \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_0}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)^2 + \frac{(\Delta U'_L)^2 + (\Delta U''_L)^2}{(U'_L - U''_L)^2}}$$

(относительной погрешностью π пренебречь). Запишите окончательные результаты для L_1, L_2, M в виде

$$L_1 = \bar{L}_1 \pm \Delta L_1 \text{ и т. п.}$$

с учётом правил округления (см. ПРИЛОЖЕНИЕ 1).

5. Сравните теоретические и экспериментальные значения L_1 , L_2 , M , проверив выполнение неравенств

$$|L_1 - L_{1\text{теор}}| \leq \Delta L_1 \text{ и т. п.}$$

Сделайте вывод.

6. Проверьте выполнение неравенства

$$|M' - M''| \leq \Delta M.$$

Сделайте вывод о равенстве взаимных индуктивностей.

Контрольные вопросы

1. Что называется индуктивностью контура, взаимной индуктивностью контуров? От чего зависят эти величины?
2. В чём заключается явление взаимной индукции? От чего зависит коэффициент взаимной индукции?
3. Выведите формулу для расчёта коэффициента взаимной индукции двух соленоидов, вставленных один в другой. Изменится ли коэффициент взаимной индукции, если изменить взаимное расположение соленоидов?
4. Чему равна индуктивность системы соленоидов, если магнитные поля в них направлены: а) в одну сторону; б) в противоположные стороны?
5. Объясните метод измерения индуктивности в данной работе.
6. Какие величины непосредственно измеряются в эксперименте?
7. Выведите расчётную формулу для определения индуктивности.
8. Как в работе определяют взаимную индуктивность M ?
9. Зависят ли измеренные величины L и M от частоты?
10. Как можно найти число витков соленоида, если сосчитать их непосредственно нельзя?

Лабораторная работа № 14 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы: экспериментальное измерение удельного заряда электрона, расчёт траектории движения заряженной частицы в электрическом и магнитном полях.

Введение

Пусть в пространстве существует электромагнитное поле, характеризующееся напряжённостью электрического поля \vec{E} и индукцией магнитного поля \vec{B} . Это поле действует на частицу, имеющую электрический заряд q и движущуюся со скоростью \vec{v} , с **силой Лоренца**

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}]. \quad (1)$$

Здесь $\vec{F}_1 = q\vec{E}$ — электрическая составляющая силы Лоренца, $\vec{F}_2 = q[\vec{v}\vec{B}]$ — её магнитная составляющая.

В данной лабораторной работе заряженная частица — электрон — сначала разгоняется в постоянном электрическом поле, а затем попадает в постоянное магнитное поле.

Движение заряженной частицы в электростатическом поле

Пусть частица с зарядом $-e$ — электрон, движущийся со скоростью \vec{v}_0 , влетает в постоянное электрическое поле и проходит в этом поле область пространства, разность потенциалов между границами которой равна U . Применим к электрону закон сохранения механической энергии:

$$\Delta W_{\text{к}} + \Delta W_{\text{п}} = 0. \quad (2)$$

Здесь $\Delta W_{\text{к}}$ — изменение кинетической энергии электрона, $\Delta W_{\text{п}}$ — изменение его потенциальной энергии;

$$\Delta W_{\text{к}} = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{m_e v_0^2}{2}, \quad (3)$$

здесь m_e — масса электрона, \vec{v} — его конечная скорость;

$$\Delta W_{\text{п}} = -eU. \quad (4)$$

Подставив (3) и (4) в (2), получим

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU + \frac{m_e v_0^2}{2}. \quad (5)$$

В данном эксперименте свободные электроны испускаются катодом в результате термоэлектронной эмиссии (см. [РАЗДЕЛ «ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ»](#)) со средней кинетической энергией

$$\langle \varepsilon_{\text{к}} \rangle = \frac{m_e v_0^2}{2} \approx \frac{3}{2} kT,$$

где T — температура катода, k — постоянная Больцмана. При напряжении $U = 10^2 - 10^4$ В вторым слагаемым в правой части выражения (5) можно пренебречь,

так как $\frac{m_e v_0^2}{2} \ll eU$. Поэтому

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}. \quad (6)$$

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

Рассмотрим случай, когда электрон влетает со скоростью \vec{v} в область пространства, где имеется однородное магнитное поле с индукцией \vec{B} (рис. 14.1А). Угол между \vec{v} и \vec{B} равен α . Найдём траекторию электрона.

Запишем II закон Ньютона для электрона

$$m_e \vec{a} = \vec{F}_2, \quad (7)$$

$\vec{F}_2 = -e[\vec{v}\vec{B}]$. Сила \vec{F}_2 и ускорение \vec{a} изображены на рис. 14.1А, Б в разных проекциях.

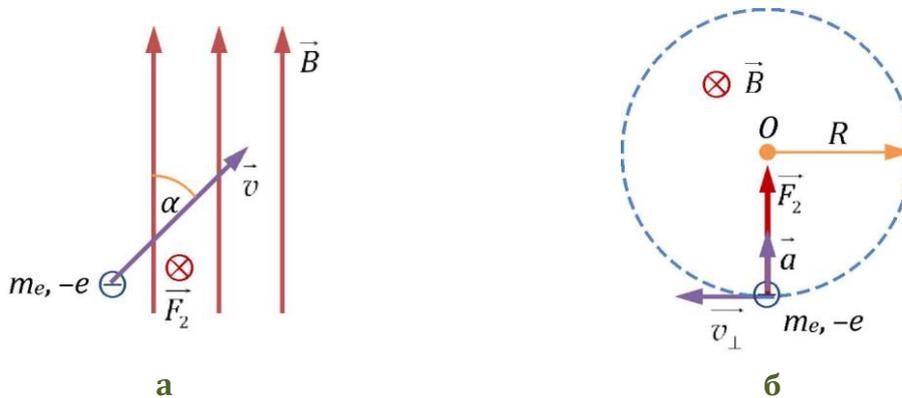


Рис. 14.1

Сила \vec{F}_2 перпендикулярна скорости электрона, так же направлено и ускорение, т. е. $a = a_n$, где a_n — нормальное ускорение. Следовательно, вдоль оси, параллельной линиям магнитной индукции, электрон будет двигаться равномерно, а в проекции на плоскость, перпендикулярную линиям магнитной индукции (плоскость рисунка 14.1Б) — по окружности.

Запишем векторное равенство (7) в проекции на нормаль \vec{n} в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции (рис. 14.1Б):

$$m_e a_n = evB \sin \alpha.$$

По известной формуле кинематики $a_n = \frac{v_{\perp}^2}{R}$, где $v_{\perp} = v \sin \alpha$, R — радиус траектории.

Получим

$$R = \frac{m_e v_{\perp}}{eB}. \quad (8)$$

В направлении линий магнитной индукции электрон движется равномерно со скоростью $v_{\parallel} = v \cos \alpha$. Таким образом, траектория электрона представляет собой спираль. Можно найти период обращения электрона и шаг спирали.

Если электрон влетает в магнитное поле в направлении, перпендикулярном линиям магнитной индукции, то радиус его траектории

$$R = \frac{m_e v}{eB}.$$

С учётом (6) получим

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2m_e U}{e}}. \quad (9)$$

Из формулы (9) получим выражение для *удельного заряда* — отношения заряда частицы к её массе — e/m_e :

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2U}{R^2 B^2}, \quad (10)$$

откуда

$$\frac{1}{R^2} = \frac{e}{m_e} \frac{B^2}{2U}. \quad (11)$$

Как следует из формулы (11), радиус окружности R , по которой изгибается электронный пучок в магнитном поле, зависит от ускоряющего напряжения U , магнитной индукции B поля и удельного заряда электрона e/m_e . Эта зависимость должна быть линейна.

1. Описание установки и метода измерений

1.1. Элементы и принцип действия экспериментальной установки

Экспериментальная установка представляет собой заключённые в непрозрачный кожух **1** систему катушек Гельмгольца **2**, внутри которой установлена электронная лампа **3** с электронной пушкой. В установку входит блок питания **4** электронной пушки и катушек Гельмгольца. Общий вид экспериментальной установки показан на [рис. 14.2](#).

Для получения и обработки результатов измерений служат компьютер с необходимым программным обеспечением, датчик магнитного поля (датчик Холла) **5**, веб-камера **6**, калибровочная линейка **7**, измерительные кабели для подключения датчиков и веб-камеры к компьютеру.

Объектом исследования являются заряженные частицы — электроны. При пропускании электрического тока через катод **8** электронной пушки ([рис. 14.3А](#)), подключённый к источнику питания, накаляется и происходит *термоэлектронная эмиссия* — испускание электронов с поверхности металла при его нагревании.

Анод **9** электронной пушки ([рис. 14.3Б](#)) представляет собой металлический конус с узким отверстием. Электрическое поле, создаваемое между катодом и анодом электронной пушки, является ускоряющим полем, действие которого на заряженную частицу описано во введении. Отверстие анода выделяет тонкий пучок *монохроматических*, т. е. обладающих практически одинаковыми по величине и направлению скоростями, электронов.

Магнитное поле создаётся катушками Гельмгольца, подключёнными к блоку питания. Помещённая в центр системы катушек Гельмгольца лампа с электронной пушкой находится в области с однородным магнитным полем. Вектор магнитной индукции, ориентированный вдоль оси катушек, направлен перпендикулярно электронному пучку, генерируемому пушкой.

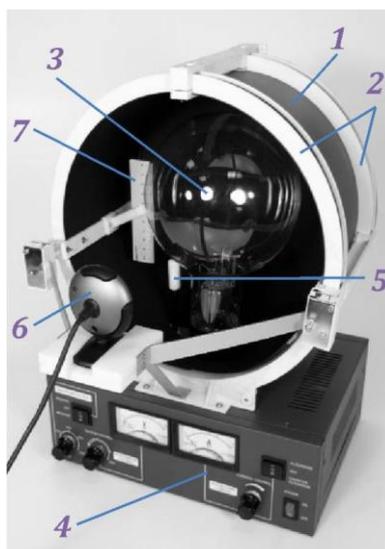


Рис. 14.2



а



б

Рис. 14.3

Траектория электронов становится видимой благодаря газу низкого давления, находящемуся в стеклянной колбе лампы (рис. 14.4), в которой располагается электронная пушка. Газ ионизуется под действием пучка электронов и испускает заметное зеленоватое свечение в месте локализации пучка электронов (рис. 14.5).



Рис. 14.4



Рис. 14.5

Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 14.6. Электронная пушка и катушки Гельмгольца включены в независимые электрические цепи. На схеме U_k — напряжение питания цепи катушек; U_n — напряжение, подаваемое на катод; **10** — отклоняющие пластины.

Установка имеет откидывающийся светозащитный экран, позволяющий улучшить условия фотосъёмки траектории электронного пучка. Также при достаточно высокой освещённости помещения рекомендуется закрывать установку сверху плотной тёмной тканью.

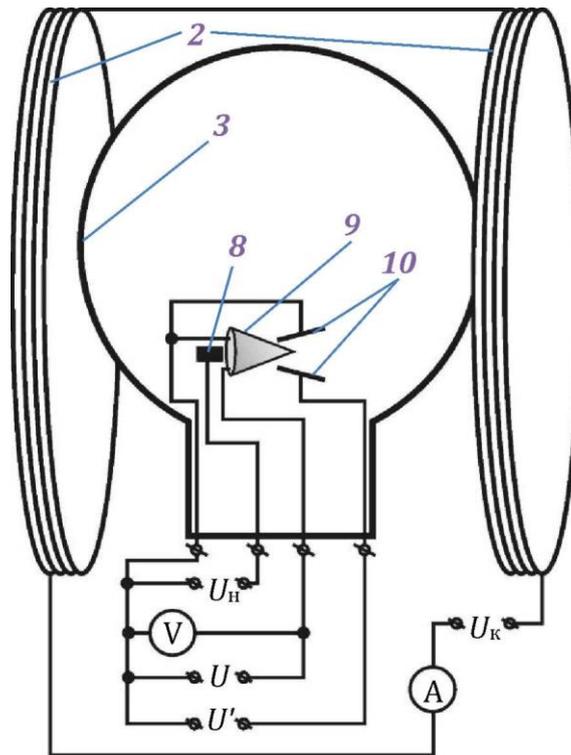


Рис. 14.6

1.2. Метод измерений

1.2.1. Прямые измерения

В данной экспериментальной установке проводятся прямые измерения величин, входящих в формулу (11).

1. Магнитная индукция B изменяется при изменении силы тока в катушках Гельмгольца ручкой “ТОК В КАТУШКАХ” (значение силы тока измеряется по амперметру на блоке питания), и измеряется с помощью датчика Холла **5**.

2. Ускоряющее напряжение U изменяется регулятором “УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ”, а измеряется по вольтметру на блоке питания **4** (рис. 14.2).

Отклоняющее напряжение U' при проведении эксперимента должно быть равно нулю.

3. Радиус окружности R , по которой изгибается электронный пучок в магнитном поле (рис. 14.5), измеряется следующим образом.

Изображение окружности, образованной светящимся газом на пути электронного пучка, передаётся на монитор компьютера с помощью веб-камеры. Диаметр окружности определяется с помощью измерительного отрезка в компьютерной программе.

Масштаб изображения устанавливается по калибровочной линейке **7** с миллиметровой шкалой. Веб-камера должна быть установлена так, чтобы в кадр попадала не только сама окружность — траектория электронов, но и калибровочная линейка.

Изображение траектории электронов аппроксимируется окружностью в компьютерной программе. Радиус этой окружности вычисляется программой автоматически.

1.2.2. Косвенные измерения

Компьютерная программа строит график экспериментальной зависимости величины $\frac{1}{R^2}$ от величины $\frac{B^2}{2U}$ и проводит линейную аппроксимацию

$$\frac{1}{R^2} = k \frac{B^2}{2U}.$$

Коэффициент пропорциональности k оптимальной прямой равен удельному заряду электрона:

$$\frac{e}{m_e} = k. \quad (12)$$

Отношение e/m_e по результатам эксперимента вычисляется компьютерной программой автоматически при построении графика.

2. Порядок выполнения работы

1. Соберите лабораторную установку, подключив датчики и веб-камеру к USB-входам компьютера.
2. Включите прибор (переключатель «СЕТЬ») и дайте ему прогреться в течение 5 минут.
3. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 3](#)).
4. Установите переключатель направления тока в катушках в нейтральное положение.
5. Включите компьютер и запустите программу «Практикум по физике». На панели устройств выберите соответствующий сценарий проведения эксперимента (Alt+C, кнопка ).
6. Переключитесь в окно «Устройство видеозахвата» и выберите пункт меню «USB-камера».
7. Установите нулевое значение тока в катушках Гельмгольца вращением соответствующей рукоятки против часовой стрелки до упора. В верхней части окна регистрации индукции магнитного поля (вид окна показан на [рис. 14.7](#)) нажмите кнопку  для установки нуля в калибровке датчика.
8. Направьте ток в катушках по часовой стрелке (переключатель направления тока — вверх) и установите максимальный ток в катушках, повернув регулятор тока на передней панели корпуса установки до упора вправо.
9. Приложите максимальное ускоряющее напряжение на электронную пушку, повернув соответствующий регулятор на передней панели корпуса установки. При этом положение переключателя «УСКОРЯЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ» — нейтральное.
10. Поворачивая электронную лампу вокруг вертикальной оси, получите траекторию электронов в виде спирали, направленной в сторону наблюдателя и в противоположную сторону. Для проведения измерений установите лампу таким образом, чтобы вектор скорости электронов был направлен перпендикулярно направлению магнитного поля, т. е. траектория электронов должна представлять собой окружность.

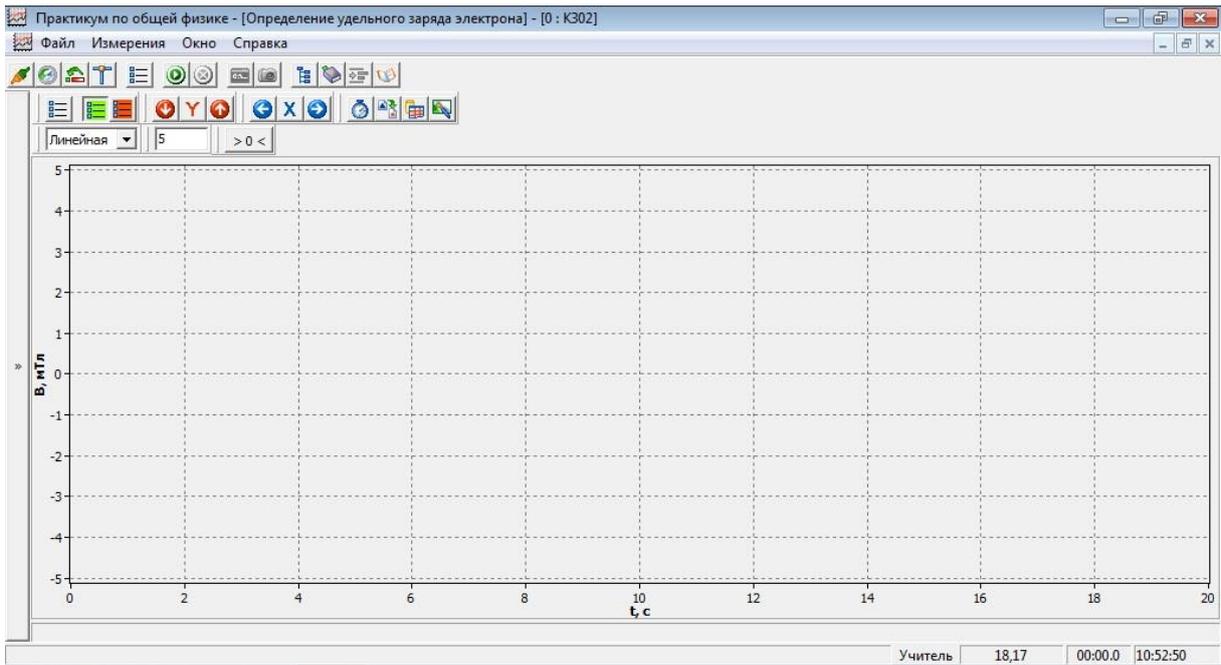


Рис. 14.7

11. Закройте защитный кожух установки. Запустите измерения, выбрав на панели инструментов кнопку  или быстрые клавиши CTRL+S. На экране появится окно «Обработка».

12. Сделайте первую фотографию. При этом линейка должна быть хорошо освещена внешним светом (рис. 14.8).

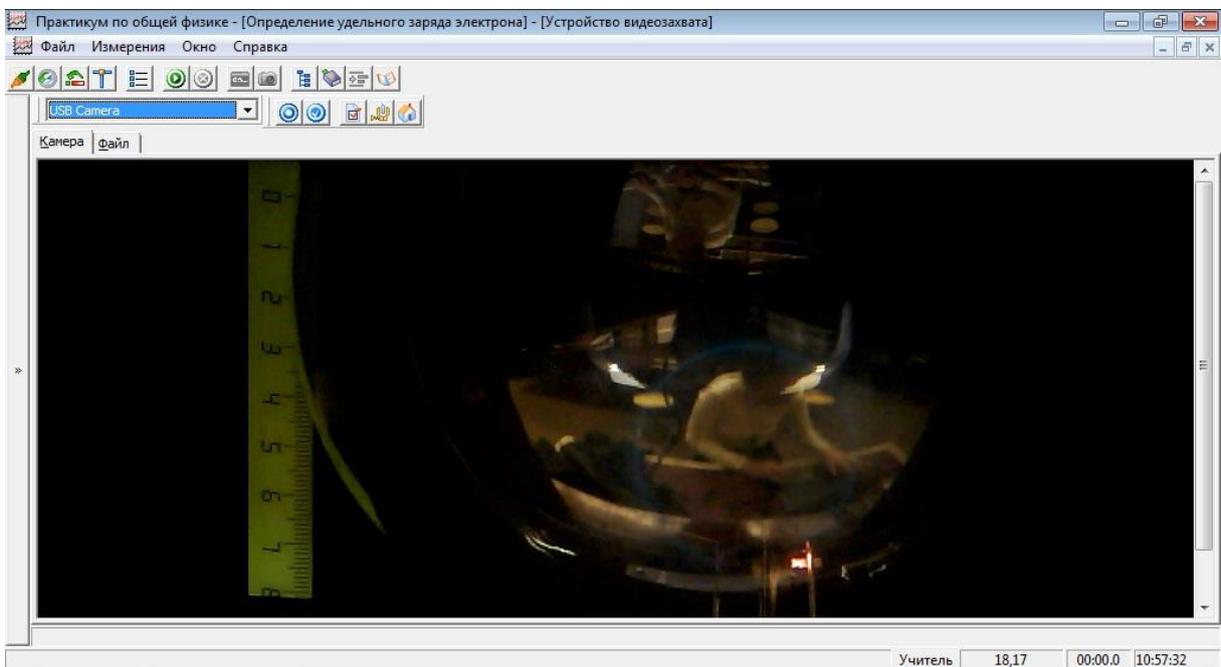


Рис. 14.8

13. Покройте защитный кожух установки тёмной непрозрачной тканью. Проведите серию измерений ускоряющего напряжения и магнитной индукции одновременно с фотографированием траектории электронов и сохранением этих фотографий. Для этого, установив ускоряющее напряжение и ток в катушках, нажимайте на кнопку .

Проведите измерения при трёх значениях ускоряющего напряжения, для каждого из которых регистрируйте радиус траектории движения электронов при 3–4 различных значениях магнитной индукции (силы тока в катушках). Всего должно быть измерено не менее 10–12 экспериментальных точек.

Ускоряющее напряжение следует изменять от максимального значения примерно до 100 В (при более низком напряжении электронная пушка прекращает работать); силу тока в катушках — от максимального значения до 100 делений шкалы амперметра, т. е. так, чтобы вся траектория электронов попадала в объектив камеры.

Все данные будут автоматически записываться в [ТАБЛИЦУ 14.1](#).

Значения магнитной индукции в таблице 14.1 не должны быть отрицательными!

14. По окончании эксперимента остановите измерения, нажав на кнопку «Стоп»  или быстрые клавиши CTRL+T.

3. Обработка результатов измерений

Таблица 14.1

Измерение магнитной индукции

№ измерения	U , В	B , мТл	R , см	Фото

1. Обработайте фотографии, получив значения радиуса траектории движения электронов при различных значениях ускоряющего напряжения и магнитного поля.

Для определения масштаба регистрации траектории электронов войдите в режим работы с фотографией, кликнув **три** раза по ярлыку  в столбце «Фото» таблицы результатов на первой строке таблицы.

Задайте величину масштабного отрезка (отрезок жёлтого цвета), совместив его концы с делениями шкалы на изображении так, чтобы он совпадал с наибольшим расстоянием, которое можно выбрать на линейке (80 мм).

Выберите на панели инструментов окна регистрации данных «Установку длины масштабного отрезка»  и ввести длину масштабного отрезка в сантиметрах (8,0).

2. Перейдите к обработке следующей фотографии и, вызвав её на экран, аппроксимируйте траекторию движения электронов окружностью. Для этого выберите на панели инструментов кнопку , нарисуйте окружность и подбирая её радиус и положение центра, совместите окружность с траекторией электронов. Изменение параметров окружности проводите, удерживая курсор на окружности, в её центре или на конце обозначенного радиуса.

Подобрав наиболее подходящую окружность, перейдите в таблицу результатов. Для этого нажмите ОК в верхнем правом углу окна «Камера».

3. Повторите п. 2 для всех файлов в столбце «Фото» таблицы результатов.

4. Сохраните таблицу результатов как файл JPG под именем *ФамилияСтудента_Таблица.jpg*.

5. Перейдите на вкладку «График» и построить зависимость $\frac{1}{R^2} = F\left(\frac{B^2}{2U}\right)$, нажав кнопку .

6. Выполните аппроксимацию графика *прямой пропорциональной зависимостью*, нажав соответствующую кнопку на панели инструментов в окне «Обработка».

7. На графике появится значение углового коэффициента прямой, автоматически рассчитанное программой. Запишите полученное значение удельного заряда электрона в единицах СИ, умножив рассчитанное программой значение на 10^{10} .

8. Сохраните график как файл JPG под именем *ФамилияСтудента_График.jpg*.

9. Постройте график зависимости $\frac{1}{R^2} = F\left(\frac{B^2}{2U}\right)$ на миллиметровой бумаге. По графику найдите погрешность e/m_e .

10. Запишите окончательный результат измерений в виде

$$\frac{e}{m_e} = \left(\overline{\frac{e}{m_e}}\right) \pm \Delta\left(\frac{e}{m_e}\right).$$

11. Проверьте выполнение неравенства

$$\left|\frac{e}{m_e} - \left(\frac{e}{m_e}\right)'\right| \leq \Delta\left(\frac{e}{m_e}\right),$$

где $\left(\frac{e}{m_e}\right)'$ — табличное значение удельного заряда электрона (см. Приложение 5).

Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Как определить модуль и направление силы Лоренца?
2. Выведите формулу для расчёта радиуса траектории электрона в однородном магнитном поле.
3. Найдите период обращения электрона по траектории, радиус которой определяется формулой (8).
4. Как создаются поля, воздействующие на электрон, в данной работе?
5. Зачем нужна калибровочная линейка?
6. Какие способы получения свободных электронов вам известны?
7. Электрон влетает со скоростью \vec{v} в однородное магнитное поле индукция \vec{B} которого направлена под углом α к вектору \vec{v} . Найти шаг траектории электрона.
8. Электрон, имеющий скорость \vec{v}_0 , влетает в однородное электрическое поле, напряжённость которого \vec{E} параллельна \vec{v}_0 . Какую скорость будет иметь электрон, пройдя расстояние l в электрическом поле?

9. Имеется заряженный воздушный плоский конденсатор. С отрицательно заряженной пластины вырывается электрон и долетает до положительно заряженной пластины. Найти конечную скорость электрона. Заряд конденсатора равен Q , площадь обкладок — S . Начальной скоростью электрона пренебречь.
10. Какой радиус имела бы траектория протона в условиях опыта, когда радиус траектории электрона максимален?
11. В камеру Вильсона попадает заряженная частица так, что траектория этой частицы в камере — окружность. Модуль индукции магнитного поля равен B , радиус траектории — R . Найти отношение заряда частицы к её массе. Как определить знак заряда частицы?

Лабораторная работа № 15 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ

Цель работы: изучение явления взаимной индукции на примере соленоида и короткой катушки и определение основных характеристик взаимной индукции.

Введение

Явление **взаимной индукции** — частный случай явления электромагнитной индукции — возникновение электрического поля в проводнике под действием переменного тока в другом проводнике, близко расположенном к данному проводнику (рис. 13.1).

Если в контуре **I** течёт ток I_1 , то созданное им магнитное поле \vec{B}_1 пронизывает контур **II**. Полный магнитный поток Ψ_{21} , сцепленный с контуром **II**, пропорционален модулю индукции B_1 и, следовательно, току I_1 . Таким образом,

$$\Psi_{12} = M_{12}I_1, \quad (1)$$

где коэффициент пропорциональности M_{21} называется **взаимной индуктивностью** контуров. По закону электромагнитной индукции при изменении тока I_1 в контуре **II** ЭДС взаимной индукции

$$\mathcal{E}_{12} = -M_{12} \frac{dI_1}{dt}. \quad (2)$$

Аналогичные рассуждения можно провести для контура **I**, если пропускать ток I_2 по контуру **II**. Тогда в контуре **I** индуцируется электрическое поле, характеризующееся ЭДС

$$\mathcal{E}_{21} = -M_{21} \frac{dI_2}{dt}. \quad (3)$$

Как показывает теория, взаимные индуктивности в отсутствие ферромагнетиков равны друг другу:

$$M_{21} = M_{12}. \quad (4)$$

В этом случае их величина не зависит от силы тока в первом или втором контуре, а определяется только взаимным расположением, формой и размерами обоих контуров. При наличии сердечника из ферромагнитного материала величины M_{21} и M_{12} не всегда равны друг другу, так как зависят от магнитной проницаемости среды, которая, в свою очередь, является функцией тока, а токи в контурах могут быть разными.

В данной работе изучается взаимная индуктивность соленоида (длинная катушка) и короткой катушки, которая надета на соленоид и может перемещаться вдоль его оси. Вблизи середины соленоида, по которому идёт ток I_1 , модуль индукции магнитного поля равен

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1 N_1}{l_1}, \quad (5)$$

где N_1 — число витков соленоида, l_1 — длина соленоида (рис. 15.1).

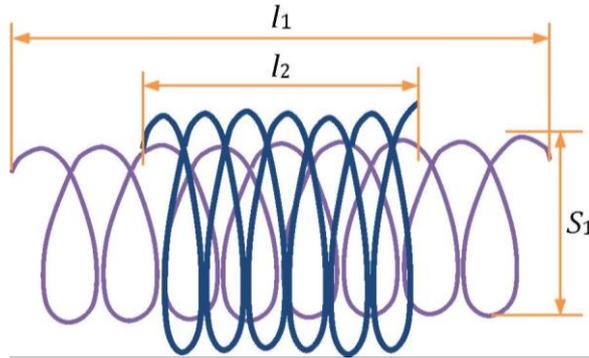


Рис. 15.1

Если короткая катушка расположена в средней части соленоида, то сцепленный с ней полный магнитный поток равен $\Psi_{12} = N_2 S_1 B_1$, где N_2 — число витков короткой катушки, S_1 — площадь сечения соленоида. Подставляя B_1 , получим

$$\Psi_{12} = \mu_0 \frac{N_1 N_2 S_1}{l_1} I_1. \quad (6)$$

Сравнивая формулы (1) и (6), найдём

$$M_{12} = \mu_0 \frac{N_1 N_2 S_1}{l_1}. \quad (7)$$

В настоящей работе экспериментально проверяется справедливость равенства $M_{21} = M_{12}$ в случае отсутствия ферромагнитного сердечника в соленоиде.

1. Описание установки и метода измерений

Измерение взаимной индуктивности выполняют следующим образом. От низкочастотного генератора Γ переменное напряжение $U = U_0 \cos \omega t$ подаётся на последовательно соединённые соленоид (катушка **I**) и резистор R (рис. 15.2). Значение сопротивления R подбирают настолько большим, чтобы оно в несколько раз превышало полное сопротивление соленоида Z (активное R_1 и индуктивное ωL), т. е.

$$Z = \sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}. \quad (8)$$

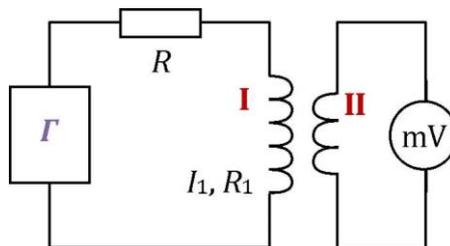


Рис. 15.2

Проходящий через катушку **I** ток I_1 в этом случае можно найти по формуле

$$I_1 = \frac{U}{R} \text{ или } I_1 = \frac{U_0}{R} \cos \omega t. \quad (9)$$

Магнитный поток сквозь контур **II** (маленькую катушку) — переменный во времени и в нём возникает электрическое поле, характеризуемое ЭДС индукции (см. (2), (9)):

$$\mathcal{E}_{12} = M_{12} \frac{U_0}{R} \omega \sin \omega t \text{ или } \mathcal{E}_{12} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t. \quad (10)$$

Величина

$$\mathcal{E}_0 = M_{12} \frac{U_0}{R} \omega \quad (11)$$

является амплитудой ЭДС индукции, характеризующей поле в короткой катушке **II**. Милливольтметр mV измеряет действующее значение переменного напряжения, поэтому, если его подключить к контуру **II**, то он покажет значение $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 / \sqrt{2}$. Подключая вольтметр к генератору, измеряем действующее значение $U = U_0 / \sqrt{2}$. Следовательно, из (10) можно найти величину взаимной индуктивности $M_{12} = \frac{\mathcal{E}R}{\omega U_0} = \frac{\mathcal{E}R}{\omega U}$; так как $\omega = 2\pi\nu$,

$$M_{12} = \frac{\mathcal{E}R}{2\pi\nu U}. \quad (12)$$

Таким образом, зная R (указано на установке), измеряя \mathcal{E} с помощью милливольтметра mV , U — с помощью милливольтметра mV , подключая его к выходу генератора (специальной клемме на стенде), и, определяя частоту сигнала генератора ν по шкале частот, вычисляем M_{12} . Подключив короткую катушку **II** к генератору, а соленоид к вольтметру, аналогично определяем величину M_{21} и убеждаемся в справедливости равенства (4). Небольшие расхождения объясняются тем, что мы не учитываем индуктивного и активного сопротивления катушек. Эти сопротивления при одинаковой частоте у них различны, так как различно количество витков (т. е. у катушек разные индуктивность L и активное сопротивление R_1).

Работа состоит из трёх частей. В первой части изучают зависимость коэффициента взаимной индукции от взаимного расположения катушек. Для этого короткую катушку **II** перемещают вдоль соленоида при неизменных U и ν . На шкале, укрепленной параллельно оси соленоида, точка 0 соответствует середине соленоида. При каждом новом положении контура **II** измеряют \mathcal{E} и по формуле (12) рассчитывают значение M_{12} (M_{21}).

Схема установки для измерения взаимной индуктивности M представлена на рис. 15.3. Клемма **a** служит для присоединения катушек к генератору **G**, клемма **б** — к милливольтметру mV . Если подключить короткую катушку **II** к генератору, а катушку **I** (соленоид) — к милливольтметру (сплошные линии на рис. 15.3), то милливольтметр покажет ЭДС индукции \mathcal{E}_{21} в соленоиде **I**. При переключении катушек (штриховые линии на рис. 15.3) милливольтметр показывает ЭДС индукции \mathcal{E}_{12} в контуре **II** при изменении тока в соленоиде, присоединённом к генератору **G**.

Во второй части работы при фиксированном положении катушек и постоянном U измеряют по милливольтметру mV величину ЭДС взаимной индукции при разных частотах ν сигнала генератора. Устанавливают, что ЭДС индукции \mathcal{E}_{21} (или \mathcal{E}_{12}) в одном контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока в этом же контуре, но создаваемого током другого контура, т. е. зависит от частоты ν колебания тока во втором контуре.

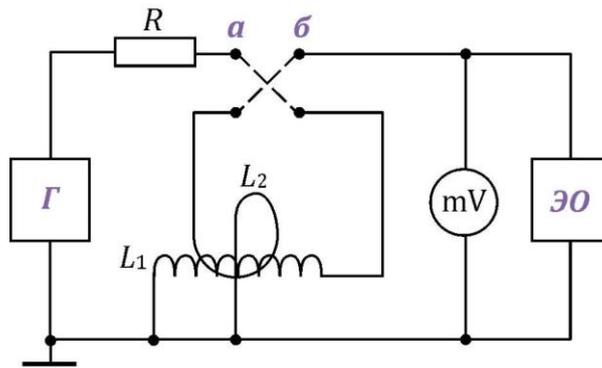


Рис. 15.3

В третьей части проверяют независимость взаимной индуктивности M от частоты ν и напряжения U (и, следовательно, от силы тока). С этой целью рассчитывают взаимную индуктивность для нескольких частот (при постоянном U) и для разных U (при постоянной ν) для фиксированного положения катушек.

В каждой части работы перед началом количественных измерений проводят качественные эксперименты с помощью осциллографа ЭО.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Исследование зависимости взаимной индуктивности от расположения катушек

1. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. Приложение 3) и запишите данные установки. В таблицу спецификации занесите пределы измерений милливольтметра, использовавшиеся на каких-либо этапах работы.
2. Соберите электрическую цепь по схеме рис. 15.3. При этом необходимо проследить, чтобы концы кабелей от приборов (генератора, осциллографа, милливольтметра) с обозначением «Земля» были соединены вместе (к нижнему ряду клемм на панели экспериментальной установки). Катушку II присоединяют к генератору (клемма а), катушку I — к милливольтметру mV (клемма б).
3. Включите тумблер «Сеть» на генераторе, осциллографе, вольтметре.
4. Поместите катушку II на середину соленоида ($r = 0$).
5. Когда приборы прогреются (2–4 мин), установите с помощью соответствующих ручек генератора значения выходного напряжения U на вольтметре генератора и частоты ν , которые указаны в таблице, приложенной к установке.
6. Проведите качественный эксперимент. Передвигая катушку II от середины соленоида к его краю, проследите за изменением амплитуды ЭДС индукции на экране осциллографа и одновременно за показаниями вольтметра. Так как магнитная индукция на краю длинного соленоида должна быть в два раза меньше, чем в его середине, то смещение катушки II на край соленоида вызывает уменьшение ЭДС индукции.
7. Повторите качественный эксперимент, поменяв ролями катушки I и II с помощью клемм а и б.
8. Отключите осциллограф и отсоедините его от электрической цепи.
9. Снова установите короткую катушку II на середину соленоида, катушку II присоедините к генератору, катушку I — к милливольтметру. Запишите в таблицу показания милливольтметра \mathcal{E}_{21} и положение катушки ($r = 0$).

10. Передвигайте катушку **II**, записывая в [ТАБЛИЦУ 15.1](#) её положение r и показания милливольтметра \mathcal{E}_{21} , особенно часто (через 0,5–1 см) там, где происходят сильные изменения ЭДС индукции. Пределы измерений милливольтметра (30 или 100 мВ) выбирайте так, чтобы стрелка вольтметра находилась преимущественно во второй половине шкалы.

11. Переключив катушки (штриховая линия на [РИС. 15.3](#)), повторите все измерения для \mathcal{E}_{12} . Результаты измерений занесите в [ТАБЛ. 15.1](#).

2.2. Изучение зависимости ЭДС взаимной индукции от частоты

1. Установите короткую катушку в определённое положение (например, $r = 0$), и снова включите осциллограф.

2. Варьируйте частоту генератора в пределах от 20 до 70 кГц и наблюдайте на экране осциллографа изменение амплитуды ЭДС индукции.

3. Отсоедините осциллограф от электрической цепи.

4. Изменяйте частоту генератора, начиная от 20 кГц с шагом 10 кГц, и записывайте показания милливольтметра \mathcal{E}_{21} или \mathcal{E}_{12} в [ТАБЛ. 15.2](#). При этом выходное напряжение генератора U необходимо поддерживать постоянным с помощью ручки «Рег. выхода».

2.3. Изучение влияния частоты и напряжения на взаимную индуктивность

1. Используя данные [ТАБЛ. 15.2](#), рассчитайте для любых трёх различных частот ν взаимную индуктивность M по формуле [\(10\)](#). Результаты занесите в [ТАБЛ. 15.3](#).

2. Измерьте \mathcal{E}_{21} или \mathcal{E}_{12} для любых трёх разных значений выходного напряжения генератора U при неизменной частоте ν и фиксированном положении катушек ([ТАБЛ. 15.4](#)).

3. Подключите осциллограф. Пронаблюдайте качественно картину изменения ЭДС взаимной индукции на экране осциллографа при изменении выходного напряжения U . Положения всех ручек на генераторе и осциллографе указаны на табличке к установке.

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $R = 4,7$ кОм; $U = 10$ В; $\nu = 20$ кГц

Таблица 15.1

Зависимость коэффициента взаимной индукции от положения катушек

№ п/п	r , см	\mathcal{E}_{21} , мВ	M_{21} , мкГн	\mathcal{E}_{12} , мВ	M_{12} , мкГн	\bar{M} , мкГн

Таблица 15.2

Зависимость амплитуды ЭДС взаимной индукции от частоты генератора

№ п/п	ν , кГц	\mathcal{E} , мВ

Таблица 15.3

№ п/п	ν , кГц	\mathcal{E} , мВ	M , мкГн

Таблица 15.4

№ п/п	U , В	\mathcal{E} , мВ	M , мкГн

1. По данным [ТАБЛ. 15.1](#) вычислите по формуле (10) взаимную индуктивность для каждого положения катушек M_{12} и M_{21} и найдите среднее значение M

$$\bar{M} = \frac{M_{12} + M_{21}}{2}.$$

2. Постройте графики зависимостей $M = f(r)$ и $\mathcal{E} = f(\nu)$ по данным таблиц [15.1](#) и [15.2](#).

3. Заполните [ТАБЛИЦУ 15.3](#) согласно 2.3, п. 1.

4. По данным [ТАБЛ. 15.4](#) найдите по формуле (10) значения взаимной индуктивности M для разных значений выходного напряжения генератора U и занесите их в таблицу.

5. Найдите абсолютную погрешность взаимной индуктивности по формуле

$$\Delta M = \bar{M} \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mathcal{E}_{12}}{\mathcal{E}_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}$$

для $r = 0$ по данным табл. 15.1; здесь $\frac{\Delta \nu}{\nu} = 0,02$ (относительная погрешность π пренебрежимо мала). Запишите окончательный результат для M в виде

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

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)). Проверьте выполнение неравенства

$$|M_{12} - M_{21}| \leq \Delta M.$$

Сделайте вывод.

6. Убедитесь в независимости величины M от U и ν . Для этого по результатам расчётов [ТАБЛ. 15.3](#) и [15.4](#) найдите максимальный разброс величины M и сравните его с погрешностью ΔM . Сделайте вывод.

Дополнительное задание

Проведите экспериментальную проверку применимости формулы $I = U/R$ (см. описание метода измерения в [РАЗДЕЛЕ 1](#)). Для этого решите, какие измерения и на каких участках цепи необходимо провести.

Контрольные вопросы

1. В чём заключается явление электромагнитной индукции? Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
2. В чём заключается явление взаимной индукции?
3. Что характеризует коэффициент взаимной индукции? От чего он зависит? В каких единицах измеряется?

4. Выведите формулу для взаимной индуктивности двух соленоидов (длинной и короткой катушек), имеющих общую ось. Как изменится коэффициент взаимной индукции, если короткую катушку передвинуть на край соленоида?
5. Объясните принцип работы электрической цепи и метод определения взаимной индуктивности в данной работе. Выведите расчётную формулу для взаимной индуктивности M .
6. Как экспериментально доказать равенство взаимных индуктивностей $M_{21} = M_{12}$?
7. Выведите формулу (12) для расчёта коэффициента взаимной индукции в данной работе.
8. Как по результатам эксперимента обосновать то, что взаимная индуктивность не зависит от входного напряжения и частоты сигнала генератора?
9. Объясните графики зависимостей $M = f(r)$ и $\mathcal{E} = f(v)$.
10. Какую величину измеряет милливольтметр?

Лабораторная работа № 16 ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Цель работы: практическое изучение магнитных характеристик ферромагнетиков в переменных полях и приобретение экспериментальных навыков исследования процесса намагничивания ферромагнетиков с помощью электронного осциллографа и статическим методом (*методом Столетова*).

Введение

Теория ферромагнетизма изложена во [ВВЕДЕНИИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 9](#).

1. Описание установки и метода измерений

Часть 1

В данном эксперименте для получения основной кривой намагничивания используют метод, предложенный А. Г. Столетовым. Он заключается в следующем. На кольцо из ферромагнитного материала ([рис. 16.1](#)) располагают две обмотки: первичная (намагничивающую) с N_1 витков и вторичную (с числом витков N_2), предназначенную для измерения величины магнитной индукции B . Напряжённость магнитного поля, которое создаётся в кольцевом сердечнике при протекании по первичной обмотке тока I_1 , рассчитывается по формуле

$$H = \frac{N_1}{l} I_1 = n_1 I_1, \quad (1)$$

где $n_1 = \frac{N_1}{l}$, $l = 2\pi r$ — длина средней осевой линии сердечника. Магнитный поток в сечении кольца площадью S

$$\Phi_1 = BS \cos 0 = BS.$$

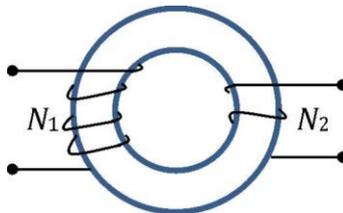


Рис. 16.1

При изменении магнитного потока во вторичной обмотке возникает переменное электромагнитное поле, описываемое ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Изменение магнитного потока в данной установке достигается автоматическим периодическим изменением направления тока I_1 (электронный переключатель). При этом значение напряжённости поля H остаётся прежним, а изменяется лишь направление линий поля.

В результате поток магнитной индукции изменяет своё значение от Φ_1 до Φ_2 ,

$$\Phi_2 = BS \cos \pi = -BS. \quad (2)$$

Если цепь вторичной обмотки замкнуть, то в ней потечёт ток

$$I_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{R} = -\frac{N_2}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (3)$$

где R — сопротивление цепи вторичной обмотки.

При протекании индукционного тока I_2 по этой цепи проходит заряд, равный

$$Q = \int_0^t I_2 dt = \int_0^t \left(-\frac{N_2}{R} \frac{d\Phi}{dt} \right) dt = -\frac{N_2}{R} (\Phi_2 - \Phi_1) = 2 \frac{N_2}{R} BS,$$

где Φ_1 и Φ_2 — соответственно начальный и конечный магнитные потоки сквозь один виток второй катушки.

Выражая из этого равенства индукцию магнитного поля, получаем

$$B = \frac{QR}{2N_2S}, \quad (4)$$

где R , N_2 и S — величины, постоянные для данной установки.

Заряд Q измеряют интегратором тока, подключённым к вторичной обмотке. При этом величина заряда, прошедшего через интегратор, пропорциональна показанию вольтметра $U_{\text{ин}}$:

$$Q = bU_{\text{ин}}, \quad (5)$$

где b — постоянная интегратора, $U_{\text{ин}}$ — отсчёт по вольтметру.

Используя выражения (4) и (5), можно записать расчётную формулу индукции магнитного поля в исследуемом кольцевом сердечнике:

$$B = \frac{bR}{2N_2S} U_{\text{ин}} = kU_{\text{ин}}, \quad (6)$$

где $k = \frac{bR}{2N_2S} = 0,04 \frac{\text{Тл}}{\text{В}}$ — постоянная для данной установки.

Для изотропных ферромагнетиков векторы магнитной индукции \vec{B} и напряжённости магнитного поля \vec{H} параллельны и связь между ними может быть записана в виде

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

где

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (7)$$

— относительная магнитная проницаемость вещества.

Принципиальная электрическая схема эксперимента приведена на [рис. 16.2](#). В цепь первичной обмотки подключают миллиамперметр, а с выхода интегрирующей цепочки подают сигнал на вольтметр постоянного тока.

Первичная N_1 и вторичная N_2 обмотки намотаны на ферритовый кольцевой сердечник. Первичную обмотку используют для намагничивания ферромагнетика и по её параметрам определяют напряжённость H намагничивающего поля. Электронный переключатель служит для автоматического периодического изменения направления тока в первичной обмотке с целью перемагничивания сердечника. Резистор R_0 ограничивает ток в обмотке.

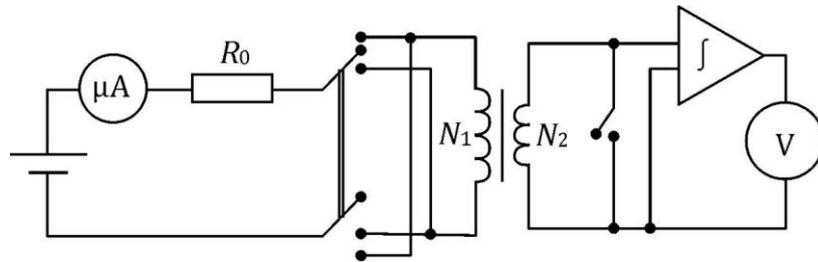


Рис. 16.2

Вторичная обмотка N_2 предназначена для определения индукции магнитного поля B в сердечнике. Интегратор тока служит для измерения заряда Q , фиксируемого вольтметром, пропорционального измеряемой величине B . Так как сердечник изготовлен из магнитомягкого ферромагнетика с малой величиной остаточной индукции, то для снятия основной кривой намагничивания нет необходимости проводить предварительное размагничивание сердечника.

Часть 2

Схема измерительной установки для второй части эксперимента показана на [рис. 16.3](#). Она содержит следующие элементы: цифровой генератор переменного напряжения Γ ; ΦO — ферромагнитный образец (сердечник трансформатора); N_1 — намагничивающая обмотка; N_2 — измерительная обмотка; $R_{и}$ и $C_{и}$ — резистор и конденсатор интегрирующей RC -цепочки; R — резистор для получения напряжения U_x , электронный осциллограф. Частота генератора плавно регулируется с помощью ручки либо кнопки «ЧАСТОТА» — текущее значение частоты генератора выводится на дисплей, амплитуда выходного напряжения устанавливается с помощью ручки «АМПЛИТУДА», измеряется цифровым вольтметром и выводится на LCD-индикатор. Кнопка «ЭКСПЕРИМЕНТ», позволяющая переключаться в режим первого либо второго опыта, должна быть отжата, при этом установка переходит в динамический режим снятия петли гистерезиса образца ферромагнетика согласно [рис. 16.3](#).

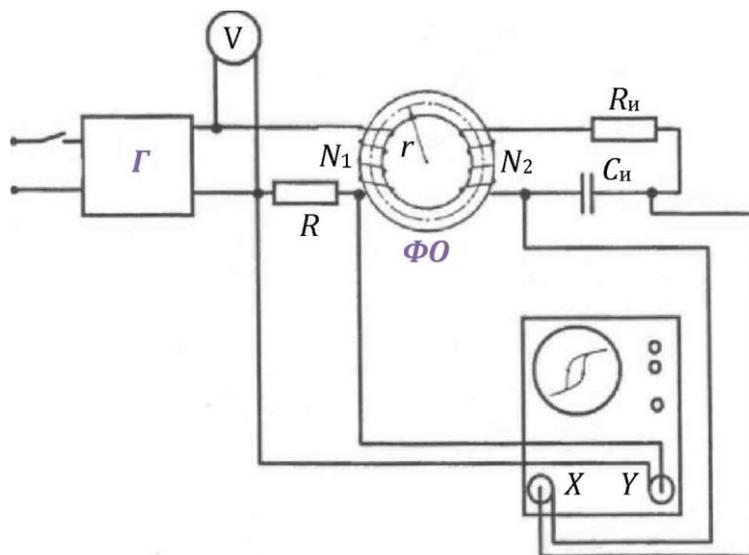


Рис. 16.3

Для получения петли гистерезиса на экране осциллографа необходимо соединить выход синусоидального генератора X_{S1} с первичной обмоткой X_{S3} катушки (переключатель 1), выход X_{S2} соединяется с другим концом первичной обмотки X_{S4} . Корпус

осциллографа и учебной установки — общий. Эти клеммы обозначены на панели лабораторного модуля.

Как показано на схеме [рис. 16.4](#), на вход Y осциллографа подаётся напряжение U_y , пропорциональное магнитной индукции B поля в исследуемом образце, на вход X — напряжение U_x , пропорциональное напряжённости H поля, намагничивающего образец. Внутренний генератор горизонтальной развёртки луча осциллографа при этом выключается, включается режим X - Y осциллографа. За один период T изменения напряжений U_x и U_y , характеризующий полный цикл перемагничивания образца, электронный луч на экране осциллографа описывает петлю гистерезиса, повторяя её в точности за каждый следующий период. Поэтому изображение петли гистерезиса на экране будет неподвижным.

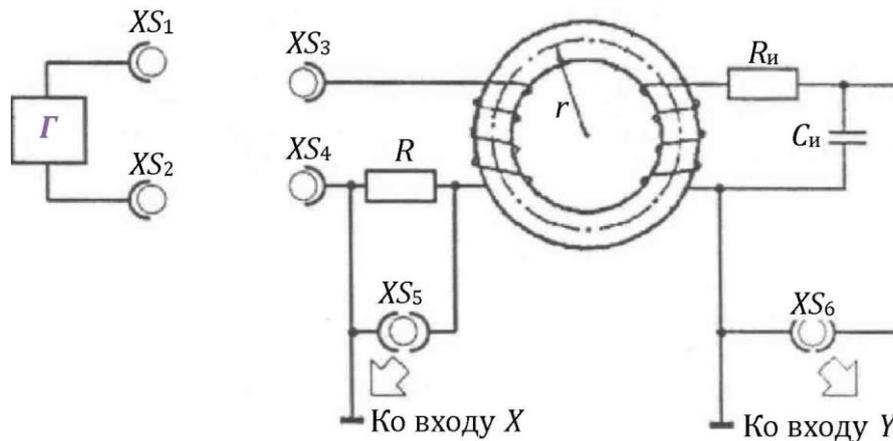


Рис. 16.4

2. Порядок выполнения работы

1. Включите лабораторный модуль в сеть ~ 220 В. Дайте приборам прогреться не менее 5–7 минут.
2. Выбор эксперимента кнопкой «ЭКСПЕРИМЕНТ», изменение частоты и изменение амплитуды входного напряжения возможно только при выключенном генераторе! Генератор включается и отключается кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ». Для надёжного срабатывания кнопки необходимо удерживать её в течение ~ 1 секунды.
3. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. Приложение 3) и запишите данные установки.
4. Проведите исследование основной кривой намагничивания ферромагнетика $B = B(H)$ статическим методом. Для этого отключите генератор нажатием кнопки «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ» и нажмите кнопку «ЭКСПЕРИМЕНТ». При этом учебная установка переходит в режим первого опыта (принципиальная электрическая схема согласно [рис. 16.2](#)).
5. Вращением ручек «Амплитуда» изменяйте силу тока I_1 в первичной обмотке образца и записывайте значения напряжения U_2 с выхода интегратора во вторичной обмотке, соответствующее этому току. Данные занесите в [ТАБЛИЦУ 16.1](#).
6. Отожмите кнопку «ЭКСПЕРИМЕНТ» и приступите к выполнению второго опыта по изучению явления гистерезиса ферромагнетика в динамическом режиме с помощью осциллографа. Для этого соберите схему [рис. 16.4](#) для исследования явления гистерезиса ферромагнитного образца, соединяя контрольные точки блок-схемы перемычками. Для получения петли гистерезиса на экране осциллографа

необходимо соединить выход синусоидального генератора XS_1 с первичной обмоткой XS_3 катушки, выход XS_2 соединяется с другим концом первичной обмотки XS_4 .

7. Подключите входы X и Y осциллографа соединительными проводами к соответствующим выходам учебной установки. Клемма XS_6 подключается ко входу Y осциллографа. Клемма XS_5 подключается ко входу X осциллографа.

8. Кнопкой «ЧАСТОТА» на передней панели модуля установите частоту для исследования явления гистерезиса ферромагнитного образца (оптимальное значение частоты $\sim 200\text{--}300$ Гц), текущее значение частоты генератора показано на ЖКД дисплее учебной установки.

9. С помощью ручки «АМПЛИТУДА» на панели установки установите уровень сигнала с выхода генератора $U \sim 4,5\text{--}5,0$ В. Измерение значения амплитуды выходного напряжения генератора возможно только при отключённом генераторе. Генератор включается и отключается кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ».

10. Включите генератор гармонического сигнала кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ».

11. Ручкой «ВОЛЬТ/ДЕЛ» оси Y установите уровень сигнала, обеспечивающий наилучший масштаб для наблюдения петли гистерезиса (рекомендуемое значение $5\text{--}1$ ВОЛЬТ/ДЕЛ). Ручка **плавно** при этом должна быть повернута до упора по часовой стрелке.

12. Вращением ручки «УСИЛЕНИЕ X » на панели учебной установки, а также ручек (\leftrightarrow) (\updownarrow) для осей X и Y на осциллографе установите изображение петли таким образом, чтобы картинка занимала $\frac{3}{4}$ экрана и была расположена **строго по центру** относительно координатной сетки осциллографа.

13. Проверьте симметричность установки изображения относительно осей X и Y на шкале экрана и скопируйте это изображение на миллиметровую бумагу.

14. Измерьте $H_{\text{коэрц}}$ и $B_{\text{ост}}$ в относительных единицах (мм).

15. Повторите опыт для трёх значений напряжения U . Сделайте вывод.

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $R = 100$ Ом; $N_1 = 150$ витков; $N_2 = 650$ витков; $r = 0,015$ м; $S = 3 \cdot 10^{-4}$ м²

Таблица 16.1

№ п/п	I , мкА	U_2 , В	H , А/м	B , Тл	μ

1. Используя данные [ТАБЛИЦЫ 16.1](#) и формулы [\(6\)](#), [\(1\)](#), [\(7\)](#), рассчитайте значения B , H , μ .

2. Постройте графики зависимости $B(H)$, $\mu(H)$.

3. Рассчитайте погрешности ΔB , ΔH , $\Delta \mu$ для B , H и μ , соответствующих μ_{max} :

$$\Delta H = H \sqrt{\left(\frac{\Delta I_1}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_1}{N_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_1}{l_1}\right)^2},$$

$$\Delta B = B \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_2}{N_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2},$$

$$\Delta\mu = \mu \sqrt{\left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2},$$

$$\Delta U = 0,05 \text{ В}; \frac{\Delta R}{R} = 0,05; \frac{\Delta S}{S} = 0,05; \frac{\Delta I_1}{I_1} = 0,05.$$

4. Запишите окончательный результат для тех же значений B , H и μ в виде

$$B = \bar{B} \pm \Delta B, \quad H = \bar{H} \pm \Delta H, \quad \mu = \bar{\mu} \pm \Delta\mu$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

Контрольные вопросы

1. Какая связь существует между векторами \vec{B} , \vec{H} , \vec{j} ?
2. Дайте определение векторов магнитной индукции и намагниченности.
3. Объясните два метода измерений в данной работе.
4. Выведите расчётные формулы (1), (6), (7).
5. Назовите основные свойства ферромагнетиков.
6. В чём заключается явление гистерезиса?
7. Как с помощью осциллографа получают петлю гистерезиса?
8. Как определяют коэрцитивную силу и остаточную магнитную индукцию?
9. Объясните с точки зрения теории ферромагнетизма ход графика $B(H)$.
10. Объясните ход графика $\mu(H)$. К какому значению стремится магнитная проницаемость при $H \rightarrow \infty$?

Лабораторная работа № 17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

Цель работы: ознакомление с одним из методов определения электродвижущих сил (ЭДС).

Введение

Направленное движение зарядов в цепях электрического тока может происходить под действием как электростатических (кулоновских) полей, так и под действием полей иного происхождения (*сторонних сил*). Это можно охарактеризовать работой, которую они совершают над перемещающимися по цепи зарядами. Работа, совершаемая кулоновскими силами при переносе единичного положительного точечного заряда из точки **1** в точку **2** цепи (рис. 17.1), называется разностью потенциалов между точками **1** и **2**:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A^{\text{кул}}}{q}. \quad (1)$$

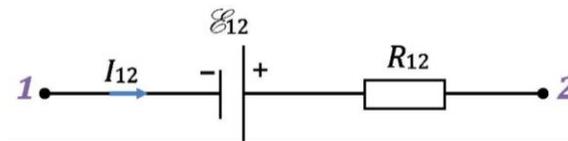


Рис. 17.1

Электродвижущей силой (ЭДС) на участке цепи **1-2** (рис. 17.1) называется работа сторонних (неэлектростатических) сил по перемещению единичного положительного точечного заряда из точки **1** в точку **2** на участке цепи:

$$\mathcal{E}_{12} = \frac{A^*}{q}. \quad (2)$$

Напряжением на участке цепи **1-2** называется физическая величина U_{12} , равная суммарной работе всех сил по переносу единичного положительного точечного заряда из точки **1** в точку **2**:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}. \quad (3)$$

Согласно **обобщённому закону Ома для участка цепи** напряжение на этом участке цепи равно произведению силы тока на сопротивление этого участка:

$$I_{12}R_{12} = U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12} \quad (4)$$

где R_{12} — суммарное сопротивление данного участка, I_{12} — сила тока на этом участке цепи.

Пользуясь обобщённым законом Ома, нужно соблюдать правило знаков, согласно которому ЭДС источника, включённого на участке цепи **1-2** положительна, если направление обхода от **1** к **2** соответствует направлению движения от катода к аноду внутри источника. На примере рис. 17.1 $\mathcal{E}_{12} > 0$.

1. Описание установки и метода измерений

Сущность **метода компенсации** заключается в том, что неизвестная ЭДС компенсируется равной по величине и противоположной по знаку разностью потенциалов, так что ток на участке с исследуемой ЭДС равен нулю.

Принципиальная схема данного метода измерения ЭДС изображена на [рис. 17.2](#). Здесь \mathcal{E} — вспомогательный источник, ЭДС которого заведомо больше ЭДС исследуемого элемента \mathcal{E}_x ; R_x, R — внешние сопротивления; r_0, r_x — внутренние сопротивления источников; G — гальванометр.

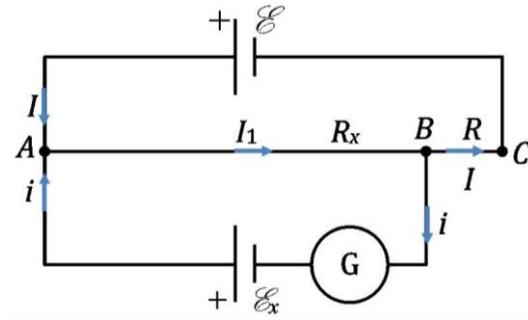


Рис. 17.2

Компенсация возможна только в том случае, если \mathcal{E} и \mathcal{E}_x включены одноимёнными полюсами навстречу друг другу. Если $\mathcal{E} > \mathcal{E}_x$, то всегда можно подобрать такое положение подвижного контакта B , при котором тока в цепи гальванометра не будет. Обозначим установившиеся значения токов на всех участках при некотором положении контакта B через I, i , и I_1 ([рис. 17.2](#)). Тогда согласно обобщённому закону Ома для участка $B \mathcal{E}_x A$ (при направлении обхода от B к A) получим

$$i(r_x + R_G) = \varphi_B - \varphi_A + \mathcal{E}_x,$$

R_G — сопротивление гальванометра. Изменив положение контакта B , добиваемся отсутствия тока через гальванометр: $i = 0$. В этом случае искомая ЭДС

$$\mathcal{E}_x = \varphi_A - \varphi_B. \quad (5)$$

С другой стороны, по закону Ома для участка AR_xB

$$IR_x = \varphi_A - \varphi_B,$$

где R_x — сопротивление участка AB в момент компенсации. Так как в условиях компенсации ток в точках A и B не разветвляется ($i = 0$ в цепи $A \mathcal{E}_x B$), токи I и I_1 равны ([рис. 17.2](#)). На основании закона Ома для замкнутой цепи $ABC \mathcal{E} A$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r_0 + R_0},$$

где $R_0 = R_x + R$ — сопротивление участка AC цепи (сопротивлением соединительных проводов можно пренебречь). Таким образом,

$$\varphi_A - \varphi_B = IR_x = \frac{\mathcal{E} R_x}{r_0 + R_0}$$

или с учётом (5)

$$\mathcal{E}_x = \frac{\mathcal{E} R_x}{r_0 + R_0}. \quad (6)$$

Зная ЭДС вспомогательного источника, можно найти \mathcal{E}_x . Ввиду непостоянства величины ЭДС обычных источников (аккумуляторов, гальванических элементов) и наличия у них неизвестного внутреннего сопротивления r_0 приходится отказаться от непосредственного применения формулы (6), а проводить сравнение с одним и тем же эталонным источником. Таким источником является *нормальный элемент*,

электродами которого служат кадмий и ртуть, а электролитом — насыщенный раствор сернокислого кадмия. ЭДС нормального элемента \mathcal{E}_N мало изменяется с течением времени и в интервале комнатных температур практически не зависит от температуры;

$$\mathcal{E}_N = 1,0183 \text{ В.}$$

Для сравнения элемента \mathcal{E}_x с элементом \mathcal{E}_N проводят ещё раз компенсационное измерение, заменив исследуемый элемент нормальным элементом. Отсутствию тока в цепи нормального элемента $A \mathcal{E}_N B$ будет соответствовать новое положение контакта B . Тогда согласно (6)

$$\mathcal{E}_N = \frac{\mathcal{E} R_N}{r_0 + R_0}, \quad (7)$$

где R_N — значение сопротивления участка AB , при котором наступает компенсация для элемента \mathcal{E}_N . Разделив (6) на (7), получим

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_N \frac{R_x}{R_N}. \quad (8)$$

Так как участок цепи ABC представляет однородную струну с постоянным сечением (реохорд), то отношение R_x/R_N можно заменить отношением соответствующих длин $\frac{l_x}{l_N}$ и соотношение (8) примет вид

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_N \frac{l_x}{l_N}.$$

2. Порядок выполнения работы

1. Соберите цепь по схеме [рис. 17.3](#). Вспомогательным источником ЭДС служит блок питания **УБП**; ABC — реохорд; G — гальванометр; K — кнопочный ключ; Π — переключатель, позволяющий поочерёдно включать или элемент \mathcal{E}_x или элемент \mathcal{E}_N ; $R_{\text{бал}}$ — балластное сопротивление, необходимое для предохранения нормального элемента и гальванометра от излишне большого тока в них при отсутствии компенсации (через G и \mathcal{E}_N можно пропускать токи порядка 10^{-5} А).
2. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. [Приложение 3](#)) и запишите данные установки.
3. Проверьте правильность включения полюсов всех трёх источников.
4. Установите переключатель Π в положение, при котором включён элемент \mathcal{E}_x .
5. Замкните на короткое время ключ K и наблюдайте отклонение стрелки гальванометра. Переместите контакт B , при каждом новом его положении замыкают на короткое время ключ K . Так продолжите до тех пор, пока стрелка гальванометра не остановится на нуле.
6. При достижении компенсации запишите значение l_x длины участка AB струны.

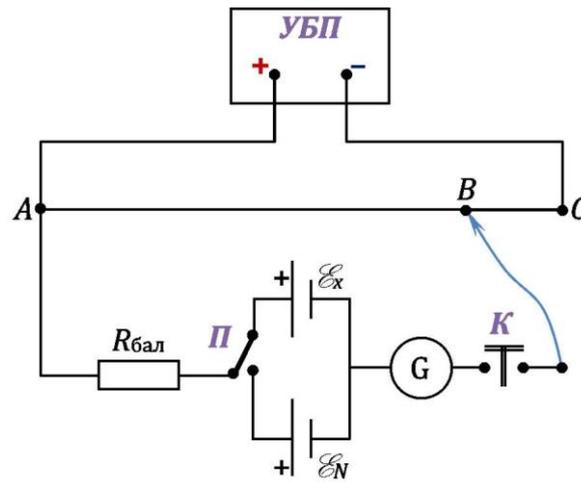


Рис. 17.3

7. Прделайте опыт 5 раз. Для учёта погрешности, связанной с неточностью компенсации, сначала добейтесь компенсации перемещением контакта слева направо. Далее, нарушив компенсацию, вновь найдите положение контакта, при котором ток в гальванометре равен нулю, только теперь путём перемещения контакта справа налево.

8. Повторите для элемента \mathcal{E}_N все действия, указанные в пп. 4–6, и запишите значения l_N .

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $\mathcal{E}_N = \dots$

Таблица 17.1

№ п/п	l_x , мм	l_N , мм	\mathcal{E}_x , В
Среднее			

1. Найдите средние значения l_x и l_N . Занесите их в [ТАБЛ. 17.1](#).

2. По средним значениям с помощью формулы (7) вычислите ЭДС элемента \mathcal{E}_x .

3. Рассчитайте случайные погрешности измерения l_x и l_N (см. Приложение 1). Рассчитайте суммарные погрешности Δl_x и Δl_N :

$$\Delta l_x = \sqrt{\Delta l_{xсл}^2 + \Delta l_{xприб}^2}, \quad \Delta l_N = \sqrt{\Delta l_{Nсл}^2 + \Delta l_{Nприб}^2}.$$

Запишите окончательные результаты прямых измерений в виде

$$l_N = \bar{l}_N \pm \Delta l_N, \quad l_x = \bar{l}_x \pm \Delta l_x$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

4. Найдите погрешность косвенного измерения ЭДС по формуле

$$\Delta \mathcal{E}_x = \mathcal{E}_x \sqrt{\left(\frac{\Delta \mathcal{E}_N}{\mathcal{E}_N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_N}{l_N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_x}{l_x}\right)^2}.$$

С учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)) запишите окончательный результат в виде

$$\mathcal{E}_x = \bar{\mathcal{E}}_x \pm \Delta \mathcal{E}_x.$$

5. Начертите график распределения потенциала вдоль участка цепи $A \mathcal{E}_x B$ для случая компенсации. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

11. Что называется ЭДС источника? Что такое нормальный элемент?
12. В чём сущность метода компенсации? Чем компенсируется ЭДС, на каком участке? Укажите, на каком участке цепи в момент компенсации нет тока.
13. Сформулируйте обобщённый закон Ома для участка и для замкнутой цепи. Дайте определение всех величин, входящих в него.
14. Запишите обобщённый закон Ома для участков $A \mathcal{E}_x B$ и $AR_x B$ в отсутствие компенсации и в момент компенсации.
15. Сравните разность потенциалов и напряжение на участках AB и $ARGB$ на электрической схеме работы.
16. С какой целью для определения ЭДС методом компенсации используется нормальный элемент? Можно ли найти ЭДС (искомую) без использования нормального элемента?
17. Почему должно быть выполнено условие $\mathcal{E} > \mathcal{E}_x$ (\mathcal{E}_N)? С какой целью в цепь гальванометра включено балластное сопротивление?
18. Нарисуйте график распределения потенциала вдоль участка $A \mathcal{E}_x B$ в отсутствие компенсации для случаев, когда стрелка гальванометра отклоняется влево и вправо от нуля. Сопротивлением проводов и гальванометра пренебречь.
19. Сравните разность потенциалов и напряжение на участках AB и $AR_{\text{бал}}GB$ (рис. 17.3).
20. Можно ли измерить ЭДС методом компенсации, если изменить полярность? Почему?
21. Как рассчитать погрешность при измерении ЭДС? Какие меры приняты в работе для уменьшения этой погрешности?

Лабораторная работа № 20

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ФИГУР ЛИССАЖУ

Цель работы: изучение сложения взаимно перпендикулярных гармонических колебаний, измерение частоты генератора при помощи фигур Лиссажу, приобретение экспериментальных навыков исследования периодических процессов с помощью электронного осциллографа.

Введение

Пусть материальная точка участвует в двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаниях:

$$\begin{cases} x = a \cos \omega_1 t, \\ y = b \cos(\omega_2 t + \alpha), \end{cases} \quad (1)$$

где ω_1, ω_2 — циклические частоты колебаний точки по осям x и y соответственно, α — разность фаз этих колебаний, a — амплитуда колебания точки по оси x , b — амплитуда колебания точки по оси y .

Вначале рассмотрим простейший случай, когда $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, т. е. соотношение частот $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{1}{1}$:

$$\begin{cases} x = a \cos \omega t, \\ y = b \cos(\omega t + \alpha). \end{cases} \quad (2)$$

Найти результат сложения означает найти вид функции $y(x)$, т. е. траекторию движения материальной точки в плоскости (x, y) . Запишем систему уравнений в виде

$$\begin{cases} \frac{x}{a} = \cos \omega t; \\ \frac{y}{b} = \cos(\omega t + \alpha) = \cos \omega t \cos \alpha - \sin \omega t \sin \alpha. \end{cases} \quad (3)$$

Из первого уравнения системы (3) находим

$$\cos \omega t = \frac{x}{a}, \quad \sin \omega t = \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}. \quad (4)$$

С учётом уравнений (4) второе уравнение системы (3) преобразуем следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{y}{b} &= \frac{x}{a} \cos \alpha - \sin \alpha \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}, \\ \frac{y}{b} - \frac{x}{a} \cos \alpha &= -\sin \alpha \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Возведём обе стороны уравнения (5) в квадрат:

$$\frac{y^2}{b^2} + \frac{x^2}{a^2} \cos^2 \alpha - \frac{2xy}{ab} \cos \alpha = \sin^2 \alpha - \frac{x^2}{a^2} \sin^2 \alpha$$

и, проведя тригонометрические преобразования, получим уравнение траектории $f(x, y)$:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \alpha = \sin^2 \alpha. \quad (6)$$

Очевидно, что в рассматриваемом случае траекторией частицы будет эллипс, вид которого определяется разностью фаз α и отношением амплитуд a и b (рис. 20.1).

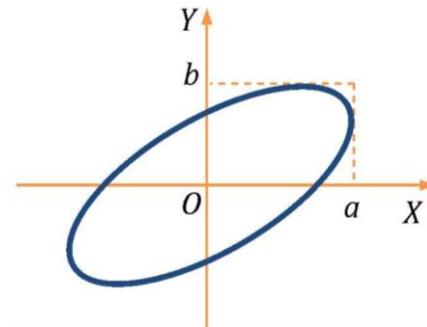


Рис. 20.1

Рассмотрим некоторые частные случаи.

1. $\alpha = 0$,

$$\left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right)^2 = 0, \quad y = \frac{b}{a}x$$

— отрезок прямой линии, частица движется по прямой в первом и третьем квадрантах (рис. 20.2А).

2. $\alpha = \pm\pi$,

$$\left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right)^2 = 0, \quad y = -\frac{b}{a}x$$

— с учётом знака уравнение колебания тоже описывает прямую, но частица движется по прямой уже во втором и четвёртом квадрантах (рис. 20.2Б).

3. $\alpha = \pi/2$. В этом случае уравнение колебания принимает вид

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

— частица движется по эллипсу, полуоси которого a и b совпадают с осями координат. При $a = b$ эллипс превращается в окружность. Движение частицы по траектории будет происходить в направлении часовой стрелки (рис. 20.2В).

4. $\alpha = 3\pi/2$. То же самое, что и $\alpha = -\pi/2$, так как изменение фазы на 2π несущественно. Движение будет происходить по эллипсу, как и в случае 3, с той лишь разницей, что движение будет происходить против часовой стрелки (рис. 20.2Г).

Особый случай представляет результат сложения двух гармонических колебаний, частоты которых немного отличаются друг от друга, т.е. $\omega_1 \approx \omega_2$, но $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \ll \omega$. Результат сложения таких колебаний можно рассматривать как сложение двух колебаний одинаковой частоты с медленно изменяющейся разностью фаз:

$$\begin{cases} x = a \cos \omega t, \\ y = b \cos(\omega t + \Delta\omega t + \alpha). \end{cases}$$

Тогда траектория точки будет последовательно проходить через состояния, изображённые на рис. 20.2.

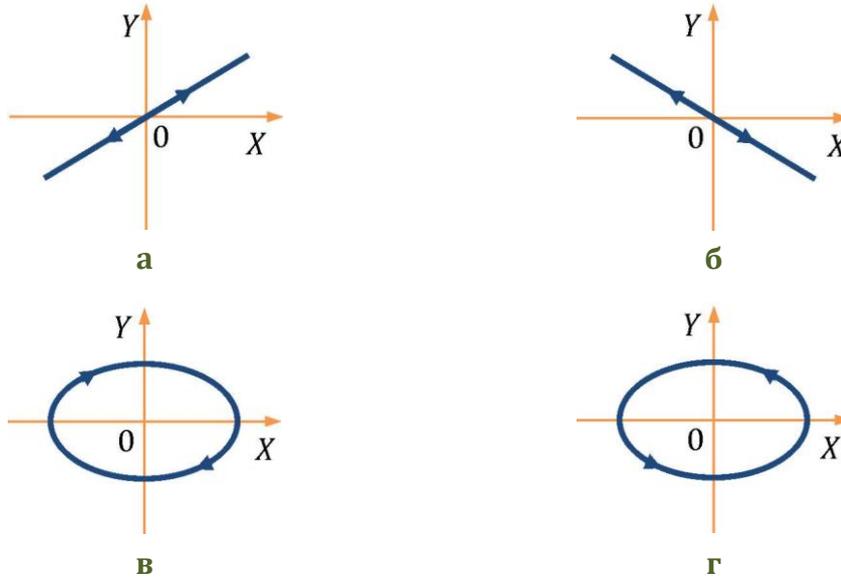


Рис. 20.2

Если частоты взаимно перпендикулярных колебаний не одинаковы и соотносятся как целые числа, то траектория результирующего колебания имеет более сложную форму и носит название *фигуры Лиссажу*.

На [рис. 20.3](#) показана фигура Лиссажу для соотношения частот $\frac{\omega_x}{\omega_y} = \frac{1}{2}$ (периодов $T_x:T_y = T_1:T_2 = 2:1$).

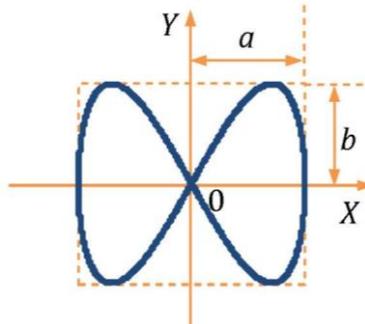


Рис. 20.3

Фигуры Лиссажу для других соотношений частот представлены на [рис. 20.4](#).

Фигуры Лиссажу очень удобно наблюдать на экране осциллографа, так как в этом случае можно рассматривать траектории, получающиеся при сложении колебаний, частоты которых соотносятся не как целые числа. Фигуры Лиссажу при этом вращаются.

Если отношение частот является рациональным числом, т. е. $\frac{\omega_x}{\omega_y} = \frac{n_x}{n_y}$, где n_x и n_y —

целые числа, то это отношение равно отношению числа точек касания фигуры Лиссажу со сторонами прямоугольника, в который эта фигура вписана, т. е. $\frac{\omega_x}{\omega_y} = \frac{n_x}{n_y}$,

где n_x — количество точек касания со стороной BC , пересекающей ось x ; n_y — количество точек касания со стороной AB , пересекающей ось y (см. [рис. 20.5](#)).

$\omega_x:\omega_y$	Сдвиг фаз α		
	0	$\pi/4$	$\pi/2$
1:1			
1:2			
1:3			
2:3			

Рис. 20.4

По виду фигур Лиссажу можно определить значение отношения $\frac{n_x}{n_y}$. Это даёт возможность по известной эталонной частоте определить другую частоту.

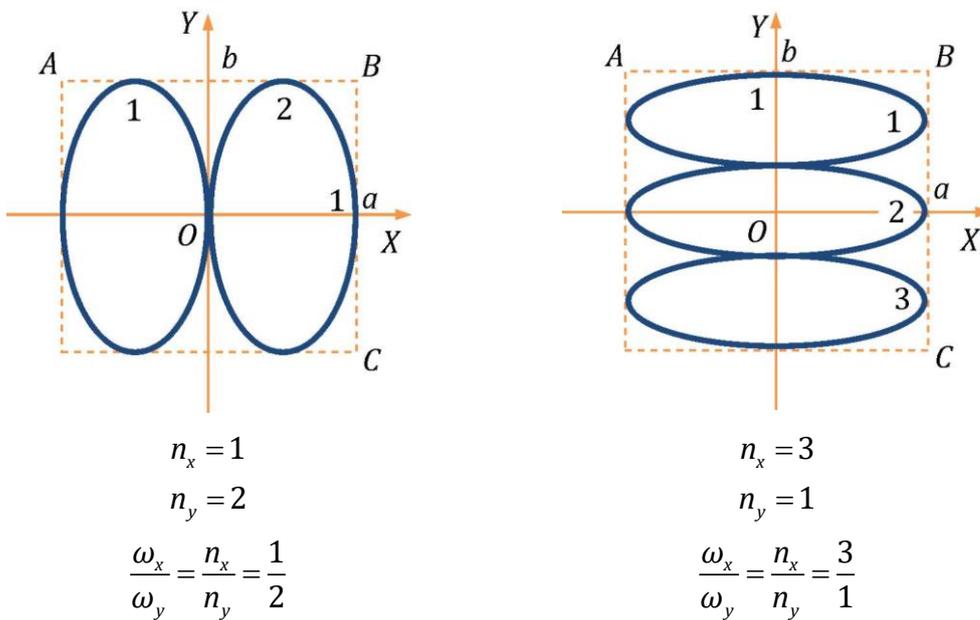


Рис. 20.5

1. Описание установки и метода измерений

На рис. 20.6 представлена блок-схема установки для исследования взаимно перпендикулярных колебаний.

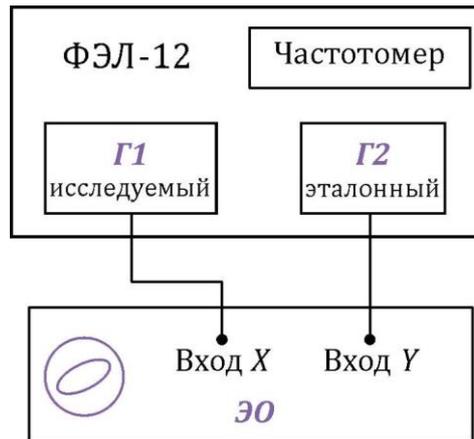


Рис. 20.6

Основной частью лабораторного модуля ФЭЛ-12 являются два генератора: исследуемый генератор *Г1* с постоянной неизвестной частотой; другой (эталонный) генератор *Г2*, частоту которого можно изменять ручкой «ЧАСТОТА». Частотомер позволяет с точностью до 2 Гц измерять частоту эталонного генератора. Переключение диапазонов генератора осуществляется кнопкой «ДИАПАЗОН». Эталонный и исследуемый генераторы подключаются к входам X и Y электронного осциллографа ОСУ-10В (на схеме [рис. 20.6](#) — ЭО), осциллограф при этом должен быть переведён в режим «X-Y» для наблюдения фигур Лиссажу. Принцип работы электронного осциллографа описан в [Приложении 2](#).

2. Порядок выполнения работы

1. Перед началом эксперимента ознакомьтесь с принципом работы электронного осциллографа (см. [Приложение 2](#)).
2. Подключите лабораторную установку к электронному осциллографу согласно блок-схеме [рис. 20.6](#). При этом сигнал с выхода 1 (исследуемого генератора) подаётся на канал X осциллографа, сигнал с выхода 2 (генератор с перестраиваемой частотой) подаётся на канал Y осциллографа.
3. Включите осциллограф и лабораторный модуль в сеть напряжением ~220 В.
4. Нажмите на кнопку POWER для включения осциллографа.
5. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. [Приложение 2](#)).
6. Переведите осциллограф в режим наблюдения фигур Лиссажу. Для этого нажмите кнопку MENU. Управление в контекстном меню осуществляется четырьмя кнопками в виде стрелочек. На экране во всплывающем окне выберите «X-Y». Переключите в режим ON, нажав кнопку ОК. Нажмите на кнопку AUTO, чтобы осциллограф выполнил самостоятельную настройку графика. Для корректировки положения фигуры можно использовать ручки « \leftrightarrow » « \updownarrow » осей X и Y осциллографа, а для корректировки размера — ручки «-» «+».
7. Вращая ручки чувствительных резисторов «ЧАСТОТА» — сначала «ГРУБО», а затем — «ПЛАВНО», получите изображение первой фигуры — [рис. 20.4](#). Запишите в [таблицу 20.1](#) показания частотомера ν (отображаются на жидкокристаллическом дисплее в герцах).
8. Продолжая очень медленно изменять частоту генератора, получите фигуры Лиссажу, приведённые на [рис. 20.4](#). Рекомендуется также понаблюдать фигуры Лиссажу, получающиеся при других кратных частотах. Следует учитывать что ручки «ЧАСТОТА» обладают высокой чувствительностью, поэтому для получения фигур

большой кратности их следует вращать **плавно** в области нужной частоты. Все показания занесите в [ТАБЛИЦУ 20.1](#). Для переключения диапазонов частот генератора используйте кнопку «ДИАПАЗОН».

9. Подключите исследуемый генератор (выход 1) к входу Y осциллографа, сигнальный провод с перестраиваемого генератора отключите. Переведите осциллограф в обычный режим развёртки. Для этого нажмите кнопку MENU, во всплывающем окне выберите «X-Y». Переключите генератор в режим OFF, нажав кнопку ОК. Нажмите на кнопку AUTO, чтобы осциллограф выполнил самостоятельную настройку, и получите изображение синусоидального сигнала исследуемого генератора на экране осциллографа. Для того чтобы определить период сигнала, достаточно нажать на любую из кнопок «F» справа от экрана осциллографа.

10. По окончании работы все приборы отключите от сети питания, поставив соответствующие переключатели в положение «ВЫКЛ».

3. Обработка результатов измерений

Таблица 20.1

Вид фигуры						
n_x	1	1	1	2	3	
n_y	1	2	3	3	2	
ν_x , Гц						
ν_y , Гц						

1. По результатам [ТАБЛИЦЫ 20.1](#) для каждого опыта рассчитайте частоту ν_x исследуемого генератора.

2. Рассчитайте среднее значение частоты исследуемого генератора.

3. Найдите частоту исследуемого сигнала $\nu_{\text{иссл}} = \frac{1}{T_{\text{иссл}}}$ и сравните её с частотой, найденной с помощью фигур Лиссажу.

Контрольные вопросы

- Какие колебания называются гармоническими?
- Дайте определения периода, частоты, фазы колебаний.
- Что такое колебательная система с двумя степенями свободы?
- В чём состоит метод фигур Лиссажу?
- Определите отношение частот колебаний по виду фигуры Лиссажу.
- Получите уравнение, описывающее траекторию колеблющейся частицы в двух взаимно перпендикулярных направлениях.
- Выведите уравнение окружности, получаемой в результате сложения взаимно перпендикулярных колебаний.
- Выведите уравнение эллипса, получаемого в результате сложения взаимно перпендикулярных колебаний.
- Нарисуйте блок-схему установки для наблюдения фигур Лиссажу и объясните принцип её работы.

Лабораторная работа № 21 ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЯЧИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

Цель работы: определение длины электромагнитной волны и частоты сигнала генератора с помощью системы Лехера.

Введение

Наличие и распространение электромагнитных волн вытекает из I и II уравнений Максвелла. В дифференциальной форме для вакуума эти уравнения выглядят так:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right).$$

Здесь \vec{E} — напряжённость электрического поля, \vec{B} — магнитная индукция, \vec{j} — плотность тока проводимости, ε_0 — электрическая постоянная, μ_0 — магнитная постоянная. Из этих уравнений следует, что переменное электрическое поле порождает магнитное поле, а переменное магнитное поле — вихревое электрическое поле.

Двухпроводная линия, или *система Лехера*, состоит из двух длинных параллельных проводов, натянутых на некотором расстоянии друг от друга. В дальнейшем будем пренебрегать сопротивлением проводов, а также будем считать, что расстояние между проводами значительно меньше, а длина проводов значительно больше длины электромагнитной волны. При этих условиях электромагнитное поле сосредоточено, в основном, между проводами, поэтому система Лехера практически не излучает электромагнитные волны в окружающее пространство, выполняя роль канала для передачи высокочастотной энергии от генератора к приёмнику.

Рассмотрим механизм переноса энергии вдоль полубесконечной двухпроводной линии, индуктивно связанной с генератором высокочастотных колебаний ([рис. 21.1](#)).

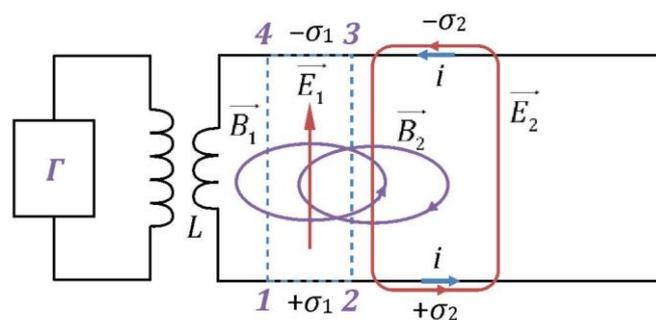


Рис. 21.1

В витке L будут наводиться вынужденные электромагнитные колебания, частота которых совпадает с частотой сигнала генератора. Эти колебания, сопровождаемые переменным током проводимости в витке, дают начало электромагнитной волне, распространяющейся вдоль системы. Выделим контур 1234 (отмечен на [рис. 21.1](#) пунктиром), причём стороны 12 и 34 малы. Пусть в некоторый момент времени электрическое поле \vec{E}_1 в этом контуре направлено вверх и увеличивается по абсолютной величине. При этом $\pm\sigma_1$ — поверхностные заряды, создающие это

электрическое поле. Согласно теории Максвелла, изменяющееся электрическое поле, т. е. *ток смещения*, вызывает появление магнитного поля. Применяя II уравнение Максвелла и правило буравчика, находим направление магнитного поля \vec{B}_1 , также увеличивающегося по абсолютной величине. Но изменяющееся магнитное поле вызывает появление вихревого электрического поля \vec{E}_2 , направление которого определяется правилом Ленца. Наличие проводов деформирует поле так, что силовые линии электрического поля в пространстве между проводами становятся перпендикулярны проводам, вызывая появление поверхностных зарядов $\pm\sigma_2$. При этом в проводах возникают токи проводимости i_1 , которые в любом сечении линии равны по величине и противоположны по направлению. Но согласно I уравнению Максвелла возрастающему полю \vec{E}_2 сопутствует появление магнитного поля \vec{B}_2 . Поле \vec{E}_2 на участке 23 направлено противоположно полю \vec{E}_1 и, следовательно, будет уничтожать последнее, равно как поле \vec{B}_2 уничтожит \vec{B}_1 . Таким образом, поля \vec{E}_1 и \vec{B}_1 исчезнут, но появятся поля \vec{E}_2 и \vec{B}_2 в соседней точке пространства. В последующие моменты времени явление будет протекать аналогично. Электрические и магнитные поля, взаимно превращаясь друг в друга, распространяются вдоль линии. Если линия находится в вакууме, то скорость переноса энергии совпадает со скоростью электромагнитных волн в вакууме.

Распространение электромагнитного поля вдоль линии, как мы видели, сопровождается распространением волн тока проводимости i , поверхностных зарядов σ , а также волны разности потенциалов U между проводами (в плоскости, перпендикулярной линии). Векторы \vec{E} и \vec{B} перпендикулярны друг другу и направлению распространения волны. В бегущих вдоль неограниченной линии волнах все величины E , B , i , U и σ колеблются синфазно, одновременно достигая максимального значения и одновременно уменьшаясь до нуля. Если генератор индуцирует в линии гармонические колебания с циклической частотой ω , то любая из вышеназванных волн может быть описана следующим уравнением:

$$s = s_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right], \quad (1)$$

где s — колеблющаяся величина, s_0 — её амплитуда, x — расстояние от начала линии; здесь c — скорость электромагнитных волн в вакууме.

«Мгновенная фотография» бегущих вдоль системы Лехера волн, длина которых равна λ , изображена на [рис. 21.2](#). Направление распространения волны обозначено волновым вектором \vec{k} .

Рассмотрим теперь процессы, происходящие в системе Лехера, если она накоротко замкнута в точке $x = l$. В этом случае переменный ток проводимости в правом короткозамкнутом мостике даст начало отражённой электромагнитной волне (а также отражённым волнам i , U , σ), распространяющейся в отрицательном направлении оси x . Механизм возникновения и распространения отражённой волны полностью аналогичен ранее рассмотренному механизму распространения прямой волны, возникающей в левом короткозамкнутом витке. Электромагнитная волна, отражённая в точке $x = l$, распространяется вдоль линии, вновь отражаясь в точке $x = 0$, и т. д. Многократно отражённые от концов линии волны складываются между собой и с падающей волной, в результате чего в системе возникают сложные электромагнитные колебания.

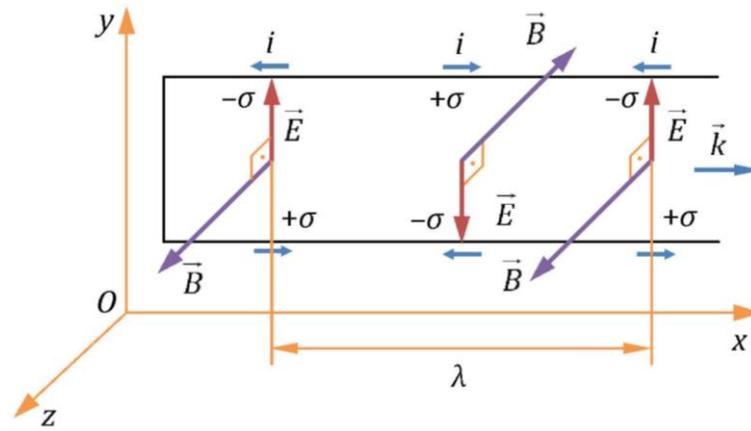


Рис. 21.2

При произвольной длине l отражённые волны в любой точке линии имеют случайную фазу и, складываясь, в среднем гасят друг друга. В этих условиях амплитуда результирующих колебаний мала, а также мал ток проводимости в линии. Иная картина имеет место, если на длине линии укладывается целое число длин полу-волн $l = n \frac{\lambda}{2}$ ($n = 1, 2, \dots$ — целое число; $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$). Волна, пройдя расстояние $2l$, не изменяет в этом случае фазу, поэтому многократно отражённые волны в каждую точку линии приходят с неизменной разностью фаз. В зависимости от величины разности фаз или от координаты точки эти волны усиливают или ослабляют друг друга. В линии устанавливаются стоячие волны с наибольшей амплитудой колебаний. В частности, наибольшей величины достигает ток проводимости, и включённая в линию лампа накаливания загорается наиболее ярко. Говорят, что в этом случае система Лехера настроена в **резонанс** с генератором.

Опишем математически стоячие волны, рассматривая однократное отражение и считая, что волна в точке $x = l$ отражается полностью. Тогда уравнение отражённой волны имеет вид

$$s' = s_0 \sin \left[\omega \left(t + \frac{x + 2l}{c} \right) + \varphi \right]. \quad (2)$$

Знак «+» у слагаемого $\frac{x}{c}$ связан с тем, что отражённая волна распространяется в отрицательном направлении оси x . Угол φ характеризует изменение фазы волны при отражении, причём значение этого скачка различно для различных величин.

Складывая (1) и (2), найдём уравнение стоячей волны

$$s = s' + s'' = 2s_0 \cos \left(\frac{\omega}{c} x - \frac{\varphi}{2} \right) \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (3)$$

Амплитуда колебаний стоячей волны определяется множителем $2s_0 \cos \left(\frac{\omega}{c} x - \frac{\varphi}{2} \right)$. В точках, где

$$\frac{\omega}{c} x - \frac{\varphi}{2} = \frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}; \dots; (2n+1) \frac{\pi}{2},$$

амплитуда колебаний равна нулю. Эти точки называются **узлами** стоячей волны. В точках, удовлетворяющих условию

$$\frac{\omega}{c}x - \frac{\varphi}{2} = 0; \pi; \dots; n\pi,$$

амплитуда достигает максимума. Это так называемые **пучности** стоячей волны. Расстояние между соседними узлами такое же, как и между соседними пучностями, и равно $\frac{\lambda}{2}$.

Используя граничные условия, найдём изменение фазы при отражении для различных волн.

Касательная составляющая напряжённости электрического поля на границе идеального проводника (короткозамыкающего мостика) должна быть равна нулю, ибо в противном случае в проводнике возник бы бесконечно большой ток. Для обеспечения нуля на границе напряжённость отражённого электрического поля в каждый момент времени имеет направление, противоположное напряжённости электрического поля падающей волны. Иными словами, напряжённость электрического поля бегущей и отражённой волн находятся в противофазе: $\varphi = \pi$, и на границах линии $x = (0, l)$ имеет место узел электрического поля.

Разность потенциалов и поверхностная плотность зарядов однозначно определяется напряжённостью электрического поля, поэтому на границах линии U и σ также имеют узел. Впрочем, последний результат следует и из иных соображений: разность потенциалов на концах короткозамыкающего проводника всегда равна нулю. Ток в короткозамыкающем проводнике максимален, поэтому сила тока и создаваемое им магнитное поле на краях линии имеют пучность, т. е. в этом случае $\varphi = 0$. Используя (3), можно теперь конкретизировать уравнение стоячей волны:

$$E_y = 2E_0 \sin \frac{\omega}{c}x \cos \omega t, \quad B_z = 2B_0 \cos \frac{\omega}{c}x \sin \omega t. \quad (4)$$

Из (4) следует, что в стоячей электромагнитной волне колебания электрического и магнитного полей происходят не в фазе. Пучности электрического поля совпадают при этом с узлами магнитного поля и наоборот. На [рис. 21.3](#) изображён график распределения амплитуды стоячей волны для напряжённости электрического поля и магнитной индукции. Причина сдвига фаз заключается в различных условиях отражения на границе для электрического и магнитного полей.

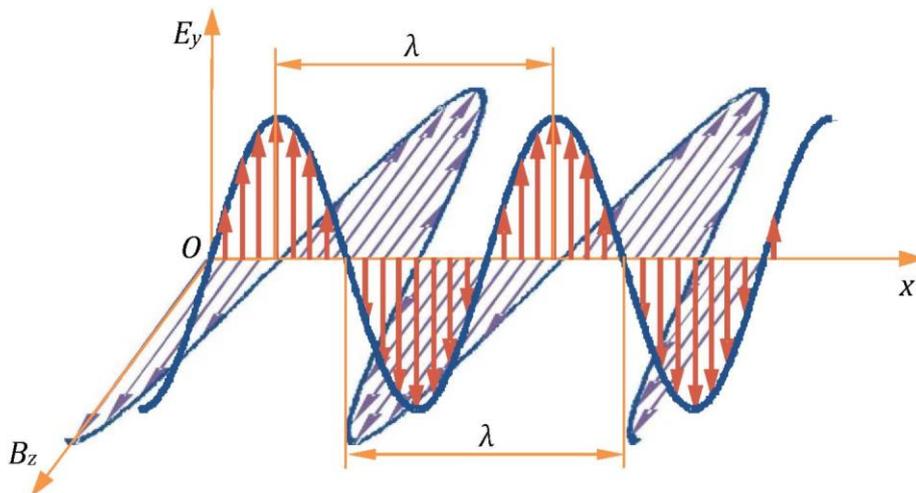


Рис. 21.3

1. Описание установки и метода измерений

Установка (рис. 21.4) состоит из двухпроводной линии NM , генератора электромагнитных колебаний Γ и зонда $\mathcal{E}\mathcal{Z}$ для измерения напряжённости электрического поля. Зонд вставляется в гнездо на ползуне, который может перемещаться вдоль линии. Положение зонда отсчитывается по шкале. В начале линии помещена лампа накаливания \mathcal{L} , являющаяся индикатором тока. В конце линии имеется передвижной закорачивающий мостик M , служащий для настройки линии Лехера в резонанс. Подача питания к генератору от электрической сети осуществляется через регулируемый выпрямитель ВУП-2.

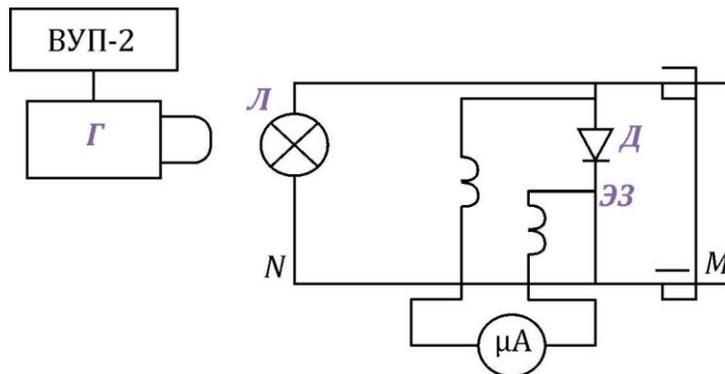


Рис. 21.4

Электрический зонд представляет собой небольшой диполь, расположенный перпендикулярно проводам линии. Переменное электрическое поле возбуждает в диполе переменный ток, который выпрямляется детектором D и регистрируется микроамперметром постоянного тока. Зависимость между модулем напряжённости электрического поля E и током через измерительный прибор $I_{\text{дет}}$ вследствие наличия в цепи детектора не является линейной. Эта зависимость определяется типом детектора, и в наших условиях её можно считать квадратичной: $I_{\text{дет}} = kE^2$. Коэффициент пропорциональности k зависит от размеров зонда (диполя), расположения зонда относительно проводов линии и для данной установки является константой. Отсюда следует

$$E \sim \sqrt{I_{\text{дет}}}. \quad (5)$$

2. Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 3](#)) и запишите данные установки.
2. Включите выпрямитель питания генератора. После прогрева катода лампы генератора установите ручку анодного напряжения в среднее положение, следя за накалом лампочки в начале линии.
3. Перемещением мостика M настройте систему в резонанс с генератором по максимуму накала лампы, уменьшая при этом, если необходимо, анодное напряжение.
4. Перемещая зонд вдоль всей линии, снимите зависимость показаний прибора от длины линии $I_{\text{дет}}(x)$. Измерения проводите через 2–5 см, отмечая особо точки максимумов и минимумов. Анодное напряжение подбирают на лампе генератора таким, чтобы в пучности отклонение стрелки микроамперметра было не менее 2/3 шкалы. Результаты измерений занесите в [ТАБЛИЦУ 21.1](#).

3. Обработка результатов измерений

Таблица 21.1

x , см	
$I_{\text{дет}}$, мкА	
E , отн. ед.	

1. По данным измерений рассчитайте $\sqrt{I_{\text{дет}}}$ (так как численное значение k неизвестно, то найденное значение E оказывается выраженным в относительных единицах).
2. Постройте (на одном листе) график зависимости модуля напряжённости электрического поля от расстояния до начала линии $E(x)$.
3. Найдите длину электромагнитной волны и частоту сигнала генератора по формулам

$$\lambda = 2l_0, \quad v = \frac{c}{\lambda},$$

где l_0 — среднее расстояние между соседними узлами стоячей волны, найденное из графика; c — скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.

4. Рассчитайте погрешности измерений по формулам

$$\Delta\lambda = \lambda \frac{\Delta l_0}{l_0}, \quad \Delta v = v \frac{\Delta l_0}{l_0}$$

(относительной погрешностью c пренебрегаем). Запишите результаты измерений в виде

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda, \quad v = \bar{v} \pm \Delta v$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)). Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Что такое система Лехера?
2. Каков механизм переноса энергии вдоль полубесконечной двухпроводной линии, индуктивно связанной с генератором высокой частоты?
3. Нарисуйте «мгновенную фотографию» волн, бегущих вдоль системы Лехера.
4. Какие процессы происходят в системе Лехера, замкнутой накоротко?
5. Как в системе Лехера возникают стоячие электромагнитные волны? Какая картина наблюдается: а) при произвольной длине системы; б) в случае, если на длине линии укладывается целое число длин полуволн?
6. Выведите уравнение стоячей электромагнитной волны. От чего зависит амплитуда стоячей волны?
7. Какие точки называют узлами, пучностями стоячей волны? На каком расстоянии находятся две соседние пучности друг от друга; узел и пучность?
8. Что называется длиной электромагнитной волны? Как длина волны связана с частотой и циклической частотой волны?
9. Нарисуйте схему установки и объясните принцип её действия.
10. Для чего служит в работе передвижной мостик? Где его устанавливают при выполнении работы?

11. В каких точках линии показание микроамперметра максимально; минимально?

Лабораторная работа № 22 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Цель работы: изучение явления резонанса в последовательной RLC -цепи, расчёт резонансной частоты контура.

Введение

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из последовательно соединённых конденсатора C , активного сопротивления R , катушки индуктивности L и источника переменной ЭДС $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \Omega t$ (рис. 22.1). В такой последовательной RLC -цепи возникают вынужденные электрические колебания, описываемые дифференциальным уравнением вида

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + 2\beta \frac{dI}{dt} + \omega_0^2 I = B \cos \Omega t, \quad (1)$$

где $\beta = R/2L$ — коэффициент затухания; $\omega_0^2 = 1/LC$ — квадрат собственной циклической частоты контура; $B = \mathcal{E}_0 \Omega / L$, Ω — циклическая частота вынуждающей ЭДС.

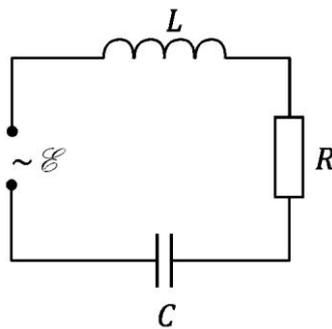


Рис. 22.1

Частное решение уравнения (1) для установившихся вынужденных колебаний имеет вид

$$I = I_0 \sin(\Omega t - \varphi), \quad (2)$$

где I_0 — амплитудное значение тока, φ — сдвиг фаз между вынуждающей ЭДС и током в цепи.

Подставив (2) в (1), найдём значения I_0 и φ :

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R^2 + \left(\Omega L - \frac{1}{\Omega C}\right)^2}}, \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Omega L - \frac{1}{\Omega C}}{R}. \quad (4)$$

Выражение (3), связывающее амплитудные значения тока и внешней ЭДС, по аналогии называют **законом Ома для переменного тока**.

Из сказанного следует, что через некоторое время (которое потребуется для полного затухания свободных колебаний) после включения гармонически меняю-

щейся переменной ЭДС в цепи устанавливается ток с частотой, равной частоте вынуждающей ЭДС. При этом фазы вынуждающей ЭДС и возникающего в цепи тока не одинаковы, а сдвинуты. Из выражений (3) и (4) видно, что амплитуда тока и сдвиг фаз зависят от частоты Ω вынуждающей ЭДС. Характер этой зависимости можно проверить экспериментально.

1. Описание установки и метода измерений

Схема включения приборов в RLC -цепи представлена на [рис. 22.2](#).

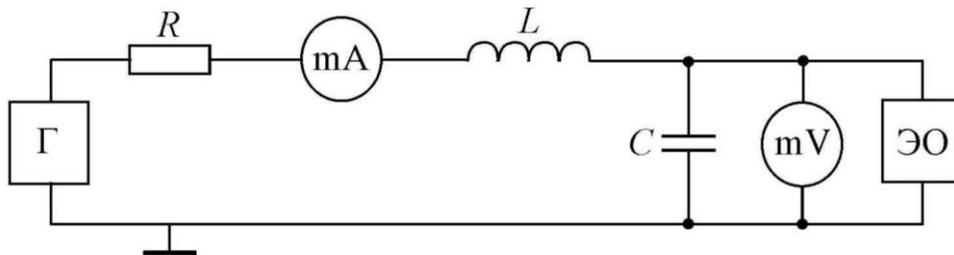


Рис. 22.2

Источником внешней вынуждающей ЭДС служит звуковой генератор Г, позволяющий получать синусоидальные колебания в широком диапазоне частот. При некотором значении $\Omega = \Omega_{\text{рез}}$ амплитуда тока достигает максимального значения — наблюдается явление резонанса. Из (3) следует, что амплитуда тока будет максимальной:

$$I_{0 \text{ рез}} = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \quad (5)$$

при условии $\Omega_{\text{рез}} L - \frac{1}{\Omega_{\text{рез}} C} = 0$, откуда

$$\Omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (6)$$

т. е. $\Omega_{\text{рез}} = \omega_0$ — собственной циклической частоте контура. Тогда из (4) $\text{tg} \varphi = 0$, т. е. ток совпадает по фазе с ЭДС.

Зависимость амплитуды тока от частоты вынуждающей ЭДС изображается графически с помощью резонансных кривых ([рис. 22.3](#)). Чем меньше активное сопротивление, тем больше амплитуда силы тока при резонансе и тем острее резонансная кривая.

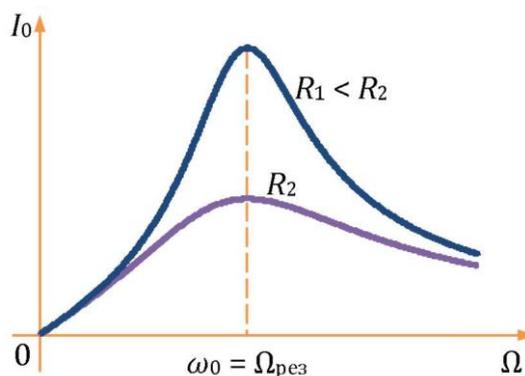


Рис. 22.3

При изменении частоты вынуждающей ЭДС изменяется разность потенциалов на конденсаторе U_C и катушке U_L . Закон изменения U_C находят из соотношений $U_C = q/C$, $q = \int Idt$ и формулы (2):

$$U_C = \frac{1}{C} \int I_0 \sin(\Omega t - \varphi) dt = -\frac{I_0}{\Omega C} \cos(\Omega t - \varphi) = U_{0C} \sin\left(\Omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right). \quad (7)$$

Константа интегрирования обозначает произвольное постоянное значение напряжения на конденсаторе, и поэтому её следует положить равной нулю. Амплитуда напряжения на конденсаторе

$$U_{0C} = \frac{I_0}{\Omega C}, \quad (8)$$

где $1/\Omega C$ — ёмкостное сопротивление; U_C отстаёт по фазе от I на $\pi/2$.

Разность потенциалов на катушке найдём, применяя закон Ома для участка цепи $U_L = IR_L - \mathcal{E}_L$, где R_L — активное сопротивление катушки; $\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt}$ — ЭДС самоиндукции. В условиях работы $IR_L \ll \mathcal{E}_L$, поэтому с учётом формулы (2) получим

$$U_L = I_0 \Omega L \cos(\Omega t - \varphi) = U_{0L} \sin\left(\Omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right). \quad (9)$$

Здесь

$$U_{0L} = I_0 \Omega L \quad (10)$$

— амплитудное значение разности потенциалов на катушке; ΩL — индуктивное сопротивление; U_L опережает по фазе ток на $\pi/2$.

Напряжение на активном сопротивлении R

$$U_R = IR = I_0 R \sin(\Omega t - \varphi) = U_0 \sin(\Omega t - \varphi), \quad (11)$$

т. е. изменяется синфазно с током.

При резонансе, как следует из формул (5), (6), (8), (10), амплитудные значения U_{0C} и U_{0L} равны. Действительно,

$$U_{0C \text{ рез}} = \frac{I_{0 \text{ рез}}}{\Omega_{\text{рез}} C} = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \frac{\sqrt{LC}}{C} = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \sqrt{\frac{L}{C}};$$

$$U_{0L \text{ рез}} = I_{0 \text{ рез}} \Omega_{\text{рез}} L = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \frac{L}{\sqrt{LC}} = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Если $\sqrt{\frac{L}{C}} \gg R$, то амплитуды напряжений $U_{0C \text{ рез}}$ и $U_{0L \text{ рез}}$ могут значительно превышать \mathcal{E}_0 — амплитудное значение внешней ЭДС. Поэтому явление резонанса в последовательном RLC -контуре называется **резонансом напряжений**. В этом случае контур ведёт себя как чисто активное сопротивление.

Как показывает анализ уравнения (8) с учётом (3), разность потенциалов на конденсаторе U_{0C} достигает максимального значения при циклической частоте

$$\Omega'_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}, \quad (12)$$

т. е. несколько меньше собственной циклической частоты ω_0 . Резонансные кривые для этого случая приведены на [рис. 22.4](#).

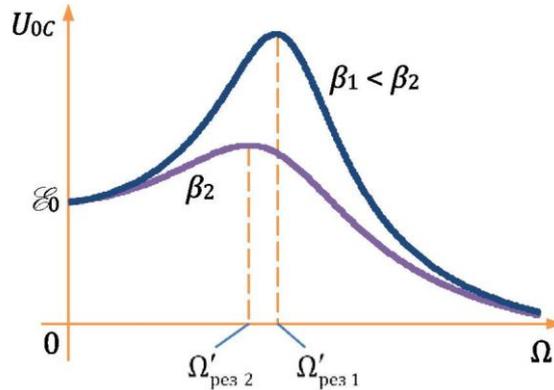


Рис. 22.4

Можно показать, что максимальное значение амплитуды U_{OL} на катушке достигается при частотах $\Omega''_{рез}$, несколько больших ω_0 . Изменяя частоту звукового генератора ν ($\nu = \frac{\Omega}{2\pi}$), изучают зависимости I_0 и U_{OC} (или U_{OL}) от ν при двух значениях активного сопротивления R (см. [рис. 22.2](#)). Амплитуду тока определяют миллиамперметром mA, который показывает действующее значение тока, связанное с амплитудным соотношением $I = I_0/\sqrt{2}$. Величину U_{OC} измеряют с помощью милливольтметра mV. Амплитуда вынуждающей ЭДС \mathcal{E}_0 при различных частотах Ω должна оставаться постоянной. Для контроля за величиной ЭДС служит вольтметр, установленный на генераторе G . Для качественного наблюдения за изменением амплитуды и частоты колебаний используется электронный осциллограф \mathcal{O} .

По результатам измерений строят резонансные кривые для I_0 и U_{OC} (или U_{OL}) (см. [рис. 22.3, 22.4](#)).

По ширине резонансной кривой можно найти логарифмический декремент затухания δ для данного контура и добротность контура. **Логарифмический декремент затухания** определяется как логарифм отношения двух амплитуд в моменты времени, разделённые одним периодом, и характеризует затухание свободных (при отсутствии вынуждающей ЭДС) колебаний в контуре:

$$\delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = \beta T. \quad (13)$$

Ширину резонансной кривой для I_0 определим как разность между двумя значениями циклических частот Ω_1 и Ω_2 (по обе стороны от резонансной частоты $\Omega_{рез}$), для которых выполняется соотношение

$$I_0^2 = \frac{1}{2} I_{0max}^2. \quad (14)$$

Найдём значения Ω_1 и Ω_2 , удовлетворяющие условию [\(14\)](#). Подставляя [\(3\)](#) и [\(5\)](#) в формулу [\(14\)](#) и учитывая, что $\beta = R/2L$ и $\omega_0^2 = 1/LC$, получаем биквадратное уравнение $(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 = 4\beta^2 \Omega^2$. Решив это уравнение, имеем

$$\Omega_1 = -\beta + \sqrt{\beta^2 + \omega_0^2}, \quad \Omega_2 = \beta + \sqrt{\beta^2 + \omega_0^2}, \quad \Omega_2 - \Omega_1 = 2\beta. \quad (15)$$

Преобразовав выражение (15), перейдём от коэффициента β к логарифмическому декременту $\delta = \beta T_0$:

$$\delta = \frac{\pi(\Omega_1 - \Omega_2)}{\omega_0}. \quad (16)$$

2. Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. Приложение 3) и запишите данные установки.
2. Соберите электрическую цепь по схеме рис. 22.2. При этом необходимо проследить, чтобы клемма «Земля» (\perp) генератора была соединена с клеммами «Земля» (\perp) осциллографа и милливольтметра. Контур подключите к осциллографу на вход Y.
3. Включите звуковой генератор и осциллограф, дайте им прогреться в течение нескольких минут. Положения ручек генератора и электронного осциллографа указаны в таблице на установке.
4. Убедитесь в наличии резонанса в контуре. Для этого, изменяя частоту переменной ЭДС вращением ручки «Частота» звукового генератора, наблюдайте за картинкой на экране осциллографа. Частоту генератора изменяют в пределах от 20 до 200 Гц. При резонансе амплитуда колебаний максимальна.
5. Проведите измерения для получения резонансных кривых при $R = 0$. Для этого, изменяя частоту ЭДС на 10 Гц вращением ручки «Частота», записывайте показания миллиамперметра и милливольтметра для каждой частоты. Измерения начинают с частоты, соответствующей минимальным значениям тока и разности потенциалов, регистрируемым приборами. Осциллограф на время измерений отключают. Вблизи резонанса измерения проводят через более короткие интервалы частот. Для построения кривой следует снять 15–20 точек. Следите, чтобы во время измерений выходное напряжение генератора \mathcal{E}_0 не изменялось! Результаты занесите в таблицу 22.1.
6. Повторите измерения п. 5 при включённом сопротивлении R и при том же значении \mathcal{E}_0 .
7. Измерьте значение \mathcal{E}_0 . Для этого милливольтметр подсоедините к выходу генератора. Запишите данные установки.

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $L = \dots$; $C = \dots$; $\mathcal{E}_0 = \dots$

Таблица 22.1

ν , Гц	$R = 0$		$R = \dots$	
	I_0 , мА	U_0 , В	I_0 , мА	U_0 , В

1. Постройте зависимости $I_0 = f(\nu)$ при $R = 0$ и $R \neq 0$ на одном графике. Найдите по графику резонансную частоту $\nu_{\text{рез}}$.
2. Найдите теоретическое значение $\nu_{\text{рез}}$ по известным значениям L и C в соответствии с формулой (6) и сравните с измеренным.

3. Постройте зависимости $U_{0C} = f(\nu)$ при $R = 0$ и $R \neq 0$ на одном графике и найдите по графику $\nu_{\text{рез}}$ и $\nu'_{\text{рез}}$. Вычислите теоретические значения $\nu_{\text{рез}}$ по формуле (6) и $\nu'_{\text{рез}}$ с помощью формулы (10) и сравните с измеренными.
4. Сравните измеренное значение вынуждающей ЭДС \mathcal{E}_0 с резонансным значением U_{0C} , вычислите отношение $U_{0C \text{ рез}} / \mathcal{E}_0$.
5. По резонансным кривым $I_0 = f(\nu)$ при $R = 0$ по формуле (15) найдите сопротивление проводов и при $R \neq 0$ по формуле (16) найдите логарифмический декремент затухания контура.

Контрольные вопросы

1. Изобразите электрическую схему идеального колебательного контура; контура, в котором возникают затухающие и вынужденные колебания.
2. Какие колебания называются гармоническими?
3. Что называется вынужденными колебаниями? Чему равна частота установившихся вынужденных колебаний?
4. В чем состоит метод векторных диаграмм и как использовать его для нахождения амплитуды и начальной фазы вынужденных колебаний?
5. Выведите формулы (3) и (4).
6. От чего зависят амплитуда тока, сдвиг фаз φ ?
7. Нарисуйте резонансные кривые для I_0 , U_{0C} , U_{0L} , чему равна резонансная частота в этих случаях при условии $R = 0$ и $R \neq 0$?
8. Могут ли амплитудные значения U_{0C} и U_{0L} быть больше амплитудных значений внешней ЭДС?
9. Что называется логарифмическим декрементом затухания?
10. Что такое добротность колебательного контура?

Лабораторная работа № 23
ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ
МЕТОДОМ СЛОЖЕНИЯ ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: изучение сложения взаимно перпендикулярных колебаний с помощью осциллографа и измерение скорости звука.

Введение

Механические возмущения (деформации), распространяющиеся в упругой среде, называются **упругими волнами**. В отличие от других видов механического движения среды, распространение упругих волн в среде не связано с переносом вещества. Если эти возмущения, а следовательно, амплитуды соответствующих им колебаний невелики, то такие упругие волны называют **звуковыми**. Соответствующие колебания, частоты которых $\nu < 16$ Гц, относятся к **инфразвуковым**, а с частотами $\nu > 20$ кГц — к **ультразвуковым**. Если же частоты колебаний лежат в пределах от 16 Гц до 20 кГц — это слышимые звуки. Звуковые волны в воздухе являются **продольными** — частицы среды колеблются в направлении распространения волны.

Колебание частицы среды, в которой распространяется плоская волна, около положения равновесия (вдоль оси z) описывается законом

$$S = A \cos\left(\omega t - \frac{\omega z}{v} + \varphi_0\right), \quad (1)$$

где A — **амплитуда** колебаний; $\left(\omega t - \frac{\omega z}{v} + \varphi_0\right)$ — **фаза** колебания; ω — **круговая частота** ($\omega = 2\pi\nu$); v — скорость распространения волны; φ_0 — **начальная фаза** колебания. Выражение (1) есть **уравнение бегущей волны**. Мгновенная фотография (в определённый момент времени t) такой волны представлена на [рис. 23.1](#).

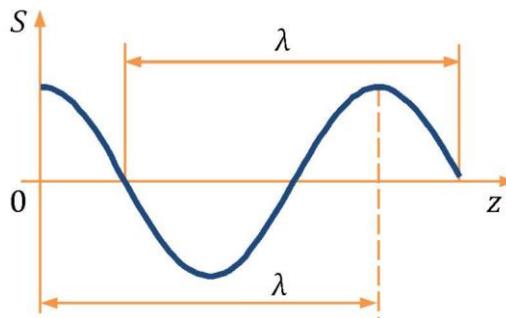


Рис. 23.1

Расстояние λ между двумя ближайшими точками среды, в которых разность фаз колебаний равна 2π , есть **длина волны** ([рис. 23.1](#)). Скорость v распространения волны равна скорости распространения данной фазы колебания и является фазовой скоростью. Следовательно,

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu. \quad (2)$$

(здесь ν — **частота** волны).

Две различные точки среды, имеющие соответственно координаты z_1 и z_2 , будут иметь разность фаз колебаний

$$\Delta\varphi = \omega \frac{z_2 - z_1}{v} = 2\pi \frac{z_2 - z_1}{\lambda}. \quad (3)$$

Таким образом, зная $\Delta\varphi$, z_2 и z_1 , можно найти длину волны λ , а из соотношения (2) — скорость волны, если известна частота ν .

1. Описание установки и метода измерений

Разность фаз колебаний $\Delta\varphi$ в двух точках среды, в которой распространяется звуковая волна, находят, пользуясь методом сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний.

В данной работе складываются колебания от динамика D и микрофона M . Источник звука — динамик — питается от низкочастотного генератора G (синусоидальным током). Схема установки представлена на рис. 23.2.

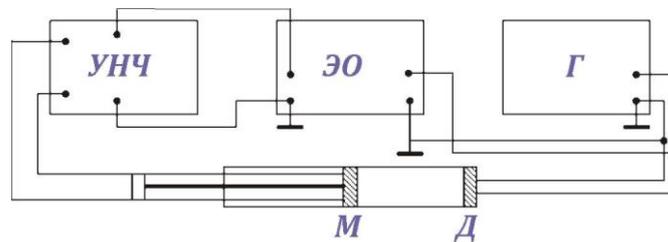


Рис. 23.2

Перед динамиком располагается микрофон M . Динамик и микрофон размещены внутри стеклянной трубки. Звуковые волны, дойдя до микрофона, приводят в колебание его мембрану, в результате чего в нём возникают электрические колебания, частота которых равна частоте электрических колебаний, подаваемых на динамик. Электрические колебания, создаваемые микрофоном и звуковым генератором, подводятся к электронному осциллографу $ЭО$.

Отклоняющие пластины, связанные с входом Y , заставляют электронный луч отклоняться в вертикальном направлении, а с входом X — в горизонтальном. Таким образом, подавая электрические колебания от микрофона, предварительно усиленные усилителем низкой частоты (УНЧ), на вертикально отклоняющие пластины (вход Y), а от звукового генератора — на горизонтально отклоняющие пластины (вход X), заставляют электронный луч участвовать в двух взаимно перпендикулярных колебаниях с одинаковой частотой. На экране осциллографа получается картина сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний (по осям X и Y). В зависимости от разности фаз этих электрических колебаний на экране осциллографа будут наблюдаться различные траектории электронного луча.

Уравнения колебаний по осям X и Y имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= A_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \\ y &= A_2 \cos(\omega t + \varphi_2), \end{aligned} \quad (4)$$

где φ_1 и φ_2 — начальные фазы. Выражения (4) представляют собой заданное в параметрической форме уравнение траектории электронного луча. Для того чтобы получить уравнение траектории в обычном виде, нужно исключить параметр t . В результате, при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты траектория описывается уравнением

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi, \quad (5)$$

где $\Delta\varphi$ — разность фаз двух колебаний. Это уравнение эллипса, эксцентриситет и ориентация осей которого относительно X и Y определяется отношением амплитуд и разностью фаз складываемых колебаний.

Исследуем форму траектории в некоторых частных случаях.

1) Если разность фаз $\Delta\varphi = 0$, то уравнение (5) принимает вид

$$\left(\frac{x}{A_1} - \frac{y}{A_2}\right)^2 = 0,$$

откуда получается

$$y = \frac{A_2}{A_1}x. \quad (6)$$

Это уравнение прямой, проходящей через начало координат, тангенс угла наклона которой определяется отношением амплитуд складываемых колебаний (рис. 23.3А).

Результирующий процесс является гармоническим колебанием вдоль прямой (6) с частотой ω и амплитудой $\sqrt{A_1^2 + A_2^2}$.

2) Если разность фаз складываемых колебаний $\Delta\varphi = \pm m\pi$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), то уравнение траектории (5) примет вид

$$\left(\frac{x}{A_1} + \frac{y}{A_2}\right)^2 = 0,$$

откуда получается

$$y = -\frac{A_2}{A_1}x.$$

Результирующее движение представляет собой колебание вдоль прямой, изображённой на рис. 23.3Б.

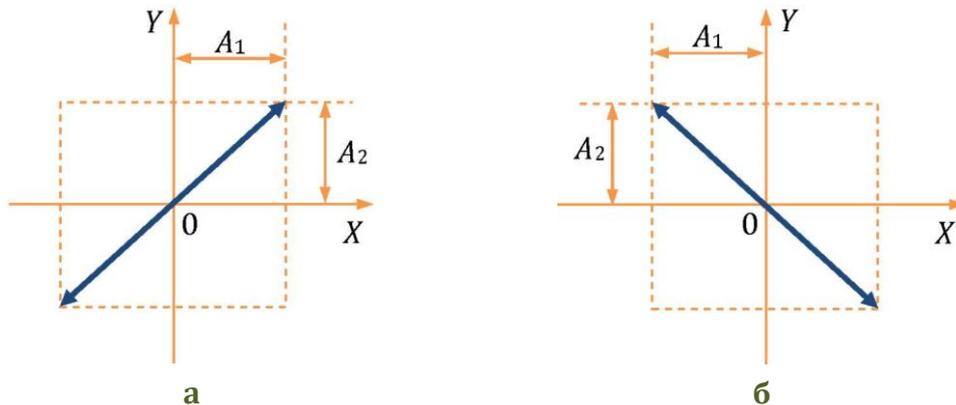


Рис. 23.3

3) Если разность фаз $\Delta\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$, то уравнение (5) переходит в

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1.$$

Это уравнение эллипса, полуоси которого равны соответствующим амплитудам колебаний. Если $A_1 = A_2$, то эллипс вырождается в окружность.

Следовательно, если менять разность фаз складываемых колебаний постепенно, то траектория электронного луча на экране осциллографа принимает различный вид согласно уравнению (5).

Некоторые траектории с указанием соответствующих разностей фаз складываемых колебаний изображены на рис. 23.4.

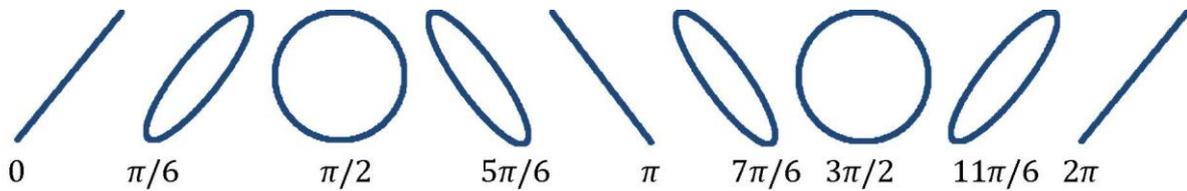


Рис. 23.4

Таким образом, по виду и положению траектории можно определить разность фаз двух колебаний. Разность фаз, в свою очередь, зависит от расстояния l между динамиком и микрофоном. Если это расстояние менять, то будет изменяться форма указанной траектории (3).

При изменении расстояния l на длину звуковой волны λ разность фаз колебаний, подаваемых на осциллограф, изменяется на $\Delta\varphi = 2\pi$. Следовательно, наименьшее расстояние между двумя соседними положениями микрофона, при котором на экране осциллографа полностью повторяется форма каждой из фигур, приведённых на рис. 23.4, равно длине звуковой волны:

$$l_{\min} = \lambda,$$

но

$$l_{\min} = z_1 - z_0,$$

где z_0 — ближайшее к динамику положение микрофона, отвечающее какой-либо форме фигуры; z_1 — следующее положение микрофона, соответствующее той же форме фигуры. Если данная форма фигуры на экране осциллографа повторится n раз, то $\lambda = l/n$.

2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь со схемой включения приборов на установке. Проверьте правильность сборки электрической цепи.
2. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. Приложение 3).
3. Включите осциллограф ЭО и получите светлое пятно в центре экрана.
4. Включите генератор Г, дайте ему прогреться (3–5 мин). Положения всех ручек на генераторе и осциллографе указаны в таблице на установке.
5. Установите на шкале генератора частоту ν сигнала (рекомендуемые значения указаны на установке).
6. Расположите микрофон М вблизи динамика Д и получите на экране осциллографа эллипс.
7. Удаляя микрофон от динамика, получите на экране осциллографа прямую линию. Измерьте положение микрофона z'_0 по миллиметровой шкале. Регулировку наклона прямой линии проводят ручкой «Усилитель У» ЭО или ручкой УНЧ.

Примечание. Нелинейные искажения, вносимые приборами, затрудняют обращение эллипса в прямую. Рекомендуется перемещать микрофон до тех пор, пока площадь эллипса станет минимальной.

8. Перемещайте микрофон до тех пор, пока на экране осциллографа снова не появится такая же прямая линия с тем же направлением наклона (например, две крайние линии на [рис. 23.4](#)). Отметьте z'_1 . Всего найдите 3–5 таких положений (z'_1, \dots, z'_n). Запишите результаты измерений в [ТАБЛ. 23.1](#).

9. Проведите те же измерения в обратном порядке, т. е. приближая микрофон к динамику. Запишите в [ТАБЛИЦУ 23.1](#) z''_n, \dots, z''_0 .

10. Таким же образом снимите показания для другой частоты (указана на установке).

3. Обработка результатов измерений

Таблица 23.1

№ п/п	ν_1 , Гц				v , м/с
	z'_n , мм	z''_n , мм	\overline{z}_n , мм	λ , м	
0					
1					
2					
3					
4					
Среднее					

1. Составьте таблицу, аналогичную [ТАБЛ. 23.1](#), для частоты ν_2 .

2. По найденным значениям положения микрофона z'_n и z''_n найдите его среднее положение \overline{z}_n , соответствующее определённому значению n , где n — число повторений данной линии на экране осциллографа.

3. По средним значениям положения микрофона вычислите длину волны λ для каждого n :

$$\lambda = \frac{\overline{z}_n - \overline{z}_0}{n}.$$

4. Рассчитайте скорость звука по формуле [\(2\)](#) для разных частот.

5. Найдите абсолютную погрешность скорости звука по формуле

$$\Delta v = v \sqrt{\left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 + \frac{\Delta z_n^2 + \Delta z_0^2}{(z_i - z_0)^2}},$$

здесь $\frac{\Delta v}{v} = 2\%$. Запишите окончательный результат в виде

$$v = \overline{v} \pm \Delta v$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

6. Изобразите на миллиметровой бумаге одну из картин сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний.

7. Измерив величину осей эллипса на экране осциллографа и используя полученные результаты, запишите уравнения складываемых колебаний по осям x и y .

Контрольные вопросы

1. Что называется фазовой скоростью волны?
2. Что такое звуковая волна?
3. Напишите уравнение бегущей плоской волны. Что называется фазой, амплитудой, круговой частотой, частотой колебаний?
4. Как связаны длина волны и скорость звука?
5. В чём суть метода определения скорости звука в данной работе? Как измеряют длину волны?
6. Объясните, как работает установка, каково назначение каждого прибора. Какие колебания подаются на вход Y , а какие на вход X осциллографа?
7. Какие кривые получают в результате сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний, от чего зависит их форма?
8. Какие кривые получатся при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний с одинаковой амплитудой? Как осуществить такой эксперимент?
9. Какие кривые получатся на экране осциллографа при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты, но с медленно изменяющейся разностью фаз?
10. Какие кривые получатся на экране осциллографа при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний с разными частотами?
11. От чего зависит форма кривых, получаемых при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний с разными частотами (фигур Лиссажу)? Как осуществить опыт с такими колебаниями?

Лабораторная работа № 24

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА МЕТОДОМ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Цель работы: с помощью метода, основанного на свойствах стоячей волны, найти скорость распространения звука в воздухе.

Введение

Стоячая волна образуется в результате наложения двух бегущих волн, которые распространяются навстречу друг другу и имеют одинаковые амплитуды A_0 и частоты ω . Для определённости будем рассматривать смещения S частиц среды. Тогда уравнения исходных плоских синусоидальных волн, распространяющихся вдоль оси Ox , имеют вид

$$S_1(x, t) = A_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right], \quad S_2(x, t) = A_0 \sin \left[\omega \left(t + \frac{x}{v} \right) \right],$$

где x — координата рассматриваемой точки, v — скорость волны.

Результирующее смещение S частиц среды при наложении этих волн найдём по принципу суперпозиции:

$$S = S_1 + S_2 = 2A_0 \cos \frac{\omega x}{v} \sin \omega t = 2A_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \omega t, \quad (1)$$

где $\lambda = vT = 2\pi v/\omega$ — длина волны.

Из выражения (1) видно, что в каждой точке среды колебания происходят с частотой, равной частоте исходных волн, причём амплитуда оказывается зависящей от координаты x :

$$A = 2A_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda}. \quad (2)$$

В точках, где $\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), амплитуда достигает максимального значения $2A_0$. Эти точки называются **пучностями**. Координаты пучностей определяются условием

$$x_{\text{пуч}} = \pm n \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

В точках, где $\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm (2n+1) \frac{\pi}{2}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), амплитуда колебаний обращается в нуль. Эти точки называются **узлами**. Частицы среды, находящиеся в узлах, колебаний не совершают. Координаты узлов имеют следующие значения:

$$x_{\text{узел}} = \pm (2n+1) \frac{\lambda}{4}. \quad (4)$$

Пучности и узлы сдвинуты друг относительно друга на четверть длины волны. Так как множитель $2A_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$ при переходе через нуль меняет знак, то фаза колебаний по разные стороны от узла отличается на π , т. е. частицы среды, лежащие по разные стороны от узла, колеблются в противофазе. Все частицы среды, заключённые между двумя соседними узлами, колеблются в одной фазе.

График для смещения S в стоячей волне приведён на [рис. 24.1](#), где A, B, C, D — узлы смещения; A_1, B_1, C_1 — пучности смещения. Кривые **I, II, III, IV** — графики смещения

для различных моментов времени, причём кривая **I** соответствует моменту времени, для которого $\sin \omega t_1 = 1$, и, следовательно, даёт распределение амплитуд в стоячей волне. По аналогичному закону будут изменяться и другие характеристики стоячей волны. Например, если продифференцировать уравнение (1) по x , то получим закон изменения относительной деформации среды

$$e = \frac{dS}{dx} = -2 \frac{2\pi}{\lambda} A_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega t. \quad (5)$$

Так как давление пропорционально относительной деформации, то можно сказать, что уравнение (5) описывает звуковое давление в стоячей волне. Из уравнений (1) и (5) следует, что узлы смещения совпадают с пучностями деформации (давления) и наоборот.

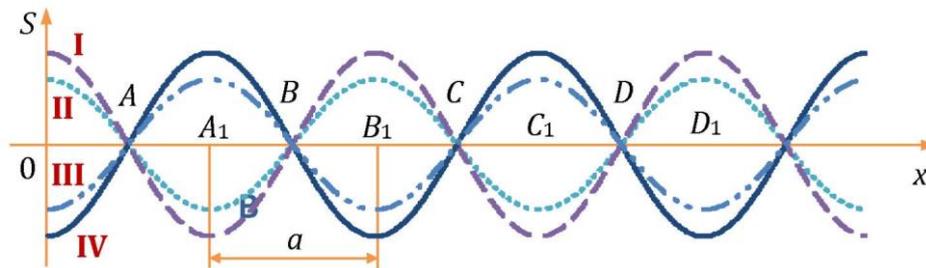


Рис. 24.1

Очень важно, что стоячая волна возникает лишь в случае *когерентности* встречных волн, т. е. когда в каждой точке пространства, где волны распространяются, имеется определённая, не зависящая от времени, разность их фаз.

1. Описание установки и метода измерений

Стоячие звуковые волны можно наблюдать при распространении звука в длинной узкой трубе с гладкими стенками. Если диаметр трубы мал по сравнению с длиной звуковой волны, то звуковая волна распространяется в основном вдоль оси трубы. На концах трубы происходит отражение звуковой волны, причём характер отражения, т. е. изменение фазы волны при отражении, зависит от того, закрыт ли конец твёрдой стенкой или открыт. В частности, фаза звукового давления при отражении от твёрдой стенки не изменяется, а фаза смещения изменяется на противоположную, а при отражении от открытого конца наоборот.

Следовательно, у закрытого конца будут находиться узел смещения и пучность давления. В обоих случаях возникает отражённая от концов трубы волна, которая складывается с падающей волной, и в трубе может возникнуть стоячая волна, но заметной интенсивности она достигает лишь при некотором соотношении между длиной трубы и длиной волны.

Так, для трубы, открытой с одной стороны и закрытой твёрдой стенкой с другой, необходимо, чтобы на длине трубы L укладывалось нечётное число $\lambda/4$, т. е. $L = (2n + 1)\lambda/4$. При этом выполняются условия отражения на концах: на открытом конце возникает узел давления, у твёрдой стенки — пучность давления, а время распространения волны от источника до стенки и обратно равно $t = 2L/v = (2n + 1)T/2$, т. е. нечётному числу полупериодов колебаний ($T = \lambda/v$).

Итак, стоячая волна с заданной длиной волны возникает лишь в трубе определённой длины.

Нахождение скорости звука методом стоячей волны заключается в том, чтобы каким-нибудь способом определить положение пучностей в стоячей волне и измерить расстояние a между двумя соседними пучностями. Из формулы (3) следует, что $a = \lambda/2$ (такое же расстояние между соседними узлами). Тогда скорость распространения волны можно определить по формуле

$$v = \lambda\nu = 2a\nu, \quad (6)$$

где $\nu = \frac{1}{T}$ — частота колебаний источника.

Прибор, при помощи которого определяется скорость звука в воздухе, изображён на рис. 24.2. Он состоит из стеклянной трубы 1 с подвижным поршнем 2 со штоком 3. Труба жёстко укреплена на доске 4. Снаружи трубы параллельно её оси прикреплена линейка, по которой можно определять положение поршня в трубе. Источником звука является телефонный наушник 5, помещённый на конце трубы. На него подаётся синусоидальный электрический сигнал звуковой частоты, вырабатываемый низкочастотным генератором Г. Генератор позволяет регулировать частоту электрического сигнала и его амплитуду, следовательно, частоту и амплитуду звукового давления. Индикатором звукового давления служит также телефонный наушник 6, вмонтированный в поршень 2. Сигнал с индикатора подаётся на осциллограф ЭО, с помощью которого можно судить об амплитуде колебательных процессов.

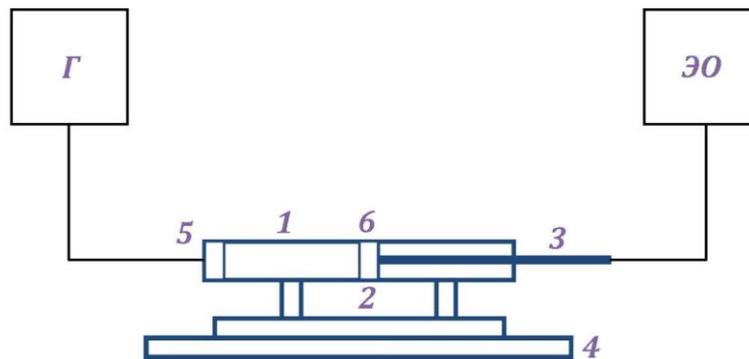


Рис. 24.2

При перемещении поршня в трубе он будет последовательно занимать такие положения, при которых образуется заметная стоячая волна. Как указано выше, при этом у поршня будет пучность звукового давления, сигнал на осциллографе будет максимален. Если l_1 и l_2 , отмеченные по линейке, — два таких положения, то $l_2 - l_1 = a$, а скорость звука в воздухе с учётом (6)

$$v = 2\nu(l_2 - l_1). \quad (7)$$

2. Порядок выполнения работы

1. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. Приложение 3).
2. Включите генератор звуковых колебаний и осциллограф. Порядок включения и рекомендуемые режимы работы указаны в таблице на установке.
3. Установите на генераторе указанное значение частоты ν_1 .
4. Медленно перемещая поршень и наблюдая за амплитудой сигнала на экране осциллографа, найдите два таких последовательных положения поршня, при которых амплитуда сигнала максимальна. Проведите измерения положения поршня по линейке l_1 и l_2 не менее 5 раз.

5. Повторите опыт для двух других частот звука ν_2 и ν_3 . Все результаты занесите в [ТАБЛИЦУ 24.1](#).

3. Обработка результатов измерений

Таблица 24.1

ν_1 , Гц			ν_2 , Гц			ν_3 , Гц		
l_1 , см	l_2 , см	\bar{v} , м/с	l_1 , см	l_2 , см	\bar{v} , м/с	l_1 , см	l_2 , см	\bar{v} , м/с

1. Рассчитайте скорость звука v , подставляя в (7) средние значения l_1 и l_2 .

2. Найдите погрешности Δv для одной из частот по формуле

$$\left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 = \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 + \frac{\Delta l_2^2 + \Delta l_1^2}{(l_2 - l_1)^2}.$$

Определите Δl_1 , Δl_2 с учётом случайной и инструментальной погрешности. Погрешность частоты генератора примите равной двум процентам от измеряемой величины.

3. Запишите окончательный результат в виде

$$v = \bar{v} \pm \Delta v.$$

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

Дополнительные задания

1. Снимите с помощью осциллографа зависимость амплитуды стоячей волны от координаты x и по результатам опыта постройте график $A(x)$.

2. На графике изобразите зависимость деформации среды от координаты x , используя формулу (5). Убедитесь, что в пучностях стоячей волны располагаются узлы деформации среды.

3. По графику $A(x)$ найдите v .

4. Постройте график зависимости фазы колебаний от x .

Контрольные вопросы

1. Как образуется стоячая звуковая волна? Получите уравнение стоячей волны.

2. От чего зависит амплитуда и фаза стоячей волны? Чему равны координаты узлов и пучностей?

3. При каком соотношении между длиной трубы и длиной волны в трубе данной установки возникнет стоячая волна?

4. Объясните, как работает установка и назначение каждого прибора.

5. Какие величины измеряются напрямую?

Лабораторная работа № 25 ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

Цель работы: изучение основных характеристик, описывающих процесс свободных затухающих и вынужденных механических колебаний.

Введение

Тело массой m , подвешенное на пружине с коэффициентом упругости k (рис. 25.1) и выведенное из положения равновесия ($x = 0$), будет совершать свободные затухающие колебания. В процессе движения на тело действуют три силы: сила тяжести $m\vec{g}$; сила сопротивления \vec{f} , пропорциональная скорости; сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, пропорциональная смещению незакрепленного конца пружины.

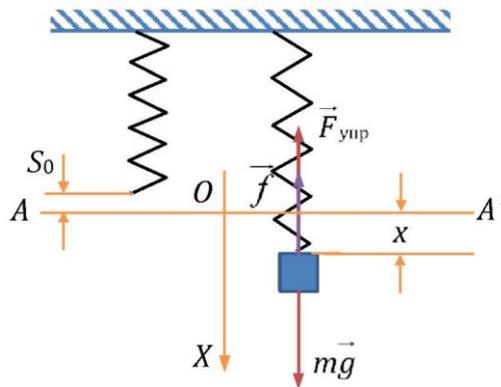


Рис. 25.1

Полное растяжение пружины равно $x + S_0$, тогда проекция силы упругости $F_{\text{упр}x} = -k(x + S_0)$, где S_0 — растяжение пружины, при котором груз находился в положении устойчивого равновесия (прямая AA'). Так как все силы направлены вдоль оси OX , то уравнение второго закона Ньютона запишем сразу в скалярном виде:

$$ma = mg - F_{\text{упр}} - f, \quad (1)$$

где $f = rv$ — модуль силы сопротивления; v — скорость груза; r — коэффициент сопротивления.

Учитывая, что $mg = kS_0$, получим

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - r \frac{dx}{dt}. \quad (2)$$

Обозначим $2\beta = r/m$, $\omega_0^2 = k/m$. Тогда уравнение (2) примет вид

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0. \quad (3)$$

Это дифференциальное уравнение описывает свободные затухающие колебания. Решением уравнения (3) является зависимость

$$x = A_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

где $\beta = r/2m$ — коэффициент затухания, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ — циклическая частота свободных затухающих колебаний; $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ — циклическая частота свободных незатухающих колебаний (в отсутствие силы трения).

Начальная амплитуда A_0 и начальная фаза φ_0 определяются начальными условиями, т. е. значениями x и $\frac{dx}{dt}$ в момент времени $t = 0$.

График зависимости $x(t)$ представлен на [рис. 25.2](#). Амплитуда затухающих колебаний $A(t) = A_0 e^{-\beta t}$ убывает с течением времени и тем быстрее, чем больше коэффициент затухания β . Через время $\tau = \frac{1}{\beta}$ амплитуда уменьшается в e раз.

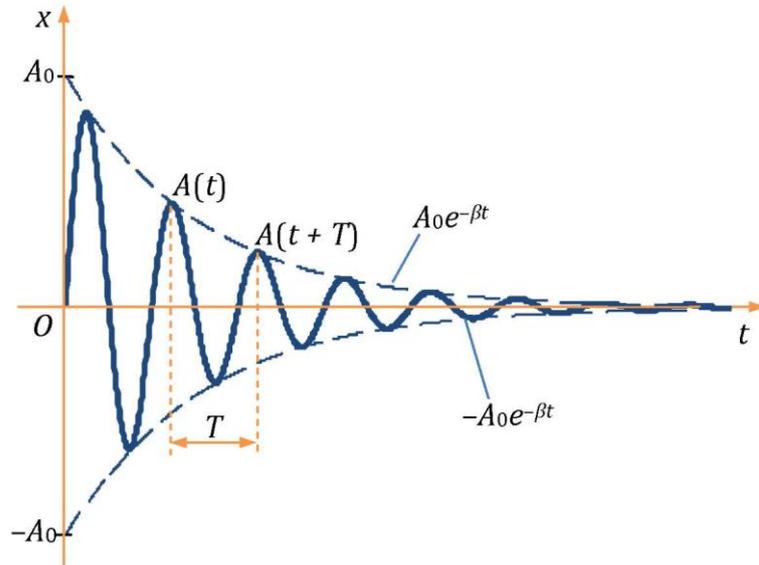


Рис. 25.2

Затухающие колебания не являются строго периодическими, однако смещение x достигает максимального и минимального значений через равные промежутки времени, поэтому можно ввести **условный период**

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \quad (5)$$

Период свободных незатухающих колебаний $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{m/k}$ всегда меньше T ,

так как силы сопротивления замедляют движение.

Характеристикой затухания колебаний служит безразмерная величина — **логарифмический декремент затухания** δ — натуральный логарифм отношения двух амплитуд в моменты времени, разделённые одним периодом:

$$\delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = \beta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N}, \quad (6)$$

где N — число колебаний, в течение которых амплитуда уменьшается в e раз.

Если на тело кроме упругой силы и силы сопротивления будет действовать ещё переменная внешняя сила (вынуждающая сила), то тело будет совершать вынужденные колебания. В простейшем случае вынуждающая сила изменяется по гармоническому закону: $F_x = F_0 \sin \Omega t$, где F_0 — амплитуда, а Ω — циклическая частота вынуждающей силы. В течение некоторого промежутка времени (разного в зависимо-

сти от коэффициента затухания β) происходит наложение вынужденных колебаний и свободных затухающих колебаний — **биения**, а затем устанавливаются вынужденные колебания с постоянной амплитудой A :

$$x = A \sin(\Omega t + \psi_0); \quad (7)$$

$$A = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}}. \quad (8)$$

Циклическая частота вынужденных колебаний равна циклической частоте Ω вынуждающей силы. При $\Omega = 0$ амплитуда A равна статическому смещению A_0 пружины под действием постоянной силы F_0 :

$$A = A_0 = \frac{F_0}{m\omega_0^2} = \frac{F_0}{k}. \quad (9)$$

С увеличением циклической частоты ($\Omega \rightarrow \infty$) амплитуда A стремится к нулю. При постоянных F_0 , m и β амплитуда вынужденных колебаний зависит от соотношения циклических частот вынуждающей силы Ω и свободных незатухающих колебаний системы ω_0 . Амплитуда достигает максимального значения, когда циклическая частота вынуждающей силы Ω равна циклической частоте $\Omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$. Циклическую частоту $\Omega_{\text{рез}}$ называют **резонансной**, а явление резкого возрастания амплитуды при приближении частоты вынуждающей силы к резонансной частоте называется **резонансом**. На [рис. 25.3](#) показаны резонансные кривые колебаний с различными коэффициентами затухания ($\beta_2 < \beta_1$).

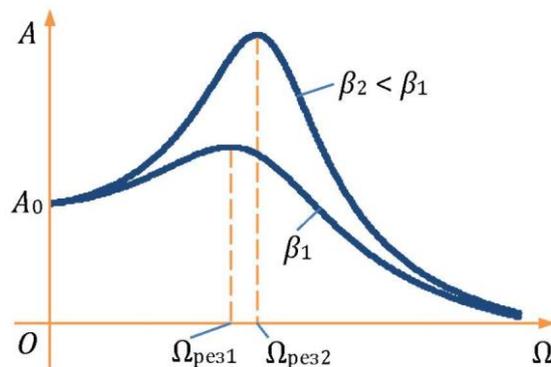


Рис. 25.3

1. Описание установки и метода измерений

Пружинный маятник ([рис. 25.4](#)) состоит из спиральной пружины K и груза m обтекаемой формы. Верхний конец пружины соединён нитью, перекинутой через блок O , с эксцентриком, укреплённом на валу электродвигателя M . При вращении мотора маятник совершает вынужденные колебания с частотой, совпадающей с частотой вращения мотора, которую можно изменять при помощи регулятора R . Смещение груза отсчитывается при помощи указателя P , передвижных рамок R_1 и R_2 и шкалы S .

Груз m помещён в цилиндрический сосуд с маслом. Так как сила трения зависит от расстояния между стенкой сосуда и грузом, то необходимо следить, чтобы груз двигался по оси сосуда.

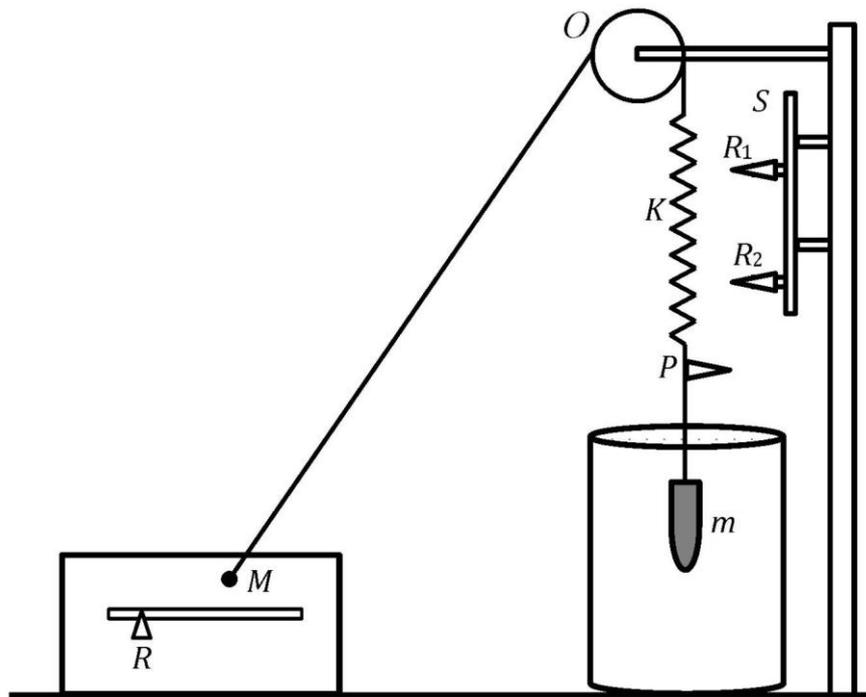


Рис. 25.4

В первой части работы изучают характеристики свободных затухающих колебаний. Измеряют время t , необходимое для совершения n полных колебаний, и вычисляют период по формуле $T = t/n$. Для определения логарифмического декремента затухания δ измеряют по шкале S амплитуды в моменты времени, разделённые n периодами, A_t и A_{t+nT} . Тогда

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_t}{A_{t+nT}}. \quad (10)$$

Во второй части работы изучают характеристики вынужденных колебаний. Включают электродвигатель и постепенно изменяют его циклическую частоту вращения Ω . При каждом положении регулятора частоты электродвигателя измеряют с помощью секундомера период T вынужденных колебаний, а по шкале S — их амплитуду A . Результаты измерений позволяют построить резонансную кривую (рис. 25.5).

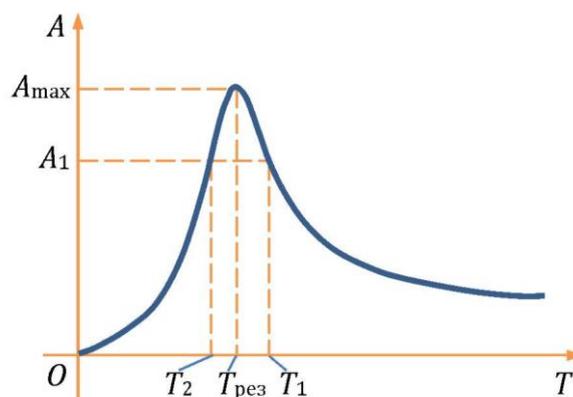


Рис. 25.5

По графику резонансной кривой можно определить логарифмический декремент затухания двумя способами:

1) По высоте резонансной кривой. Если в формуле (8) положить $\Omega_p \approx \omega_0$ (при $\beta \ll \omega_0$), считая эту частоту резонансной, то

$$A_{\max} = \frac{F_0}{2m\beta\omega_0}. \quad (11)$$

Из формулы (6) следует, что $\beta = \frac{\delta}{T}$, где T в данном приближении равно $T_{\text{рез}} \approx T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$. Отсюда $\beta = \delta\omega_0/2\pi$ и $A_{\max} = \pi F_0/m\omega_0^2\delta$. Сопоставляя это выражение и формулу (9), имеем

$$\delta = \frac{\pi A_0}{A_{\max}}. \quad (12)$$

2) По ширине резонансной кривой. Ширину резонансной кривой принято определять как разность между двумя значениями частот Ω_1 и Ω_2 (по обе стороны от резонансной частоты $\Omega_{\text{рез}}$), для которых выполняется соотношение

$$A_1^2 = \frac{1}{2} A_{\max}^2. \quad (13)$$

Найдём значения Ω_1 и Ω_2 , удовлетворяющие условию (13). Подставив (8) и (11) в формулу (13), получим биквадратное уравнение $(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2 = 8\beta^2\omega_0^2$. Решая это уравнение и оставляя члены, содержащие β в первой степени, будем иметь

$$\Omega = \sqrt{\omega_0^2 \pm 2\beta\omega_0} = \omega_0 \sqrt{1 \pm \frac{2\beta}{\omega_0}}.$$

Отсюда получаем с точностью до членов первого порядка малости:

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= \omega_0(1 - \beta/\omega_0); \quad \Omega_2 = \omega_0(1 + \beta/\omega_0); \\ \Omega_2 - \Omega_1 &= 2\beta. \end{aligned} \quad (14)$$

Подставим в (14) значения $\Omega = \frac{2\pi}{T}$ и $\beta = \frac{\delta}{T_0}$:

$$\delta = \frac{\pi T_0(T_1 - T_2)}{T_1 T_2}. \quad (15)$$

2. Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов (см. Приложение 3).

2. Определение периода свободных затухающих колебаний. По шкале S отметьте положение равновесия груза N_0 при помощи указателя P . Задайте грузу некоторое смещение $x_0 = N - N_0$. Затем груз отпустите и секундомером измерьте время t , в течение которого груз совершит $n = 5$ полных колебаний. Полученные результаты запишите в таблицу 25.1. Повторите измерения 5–7 раз.

3. Определение логарифмического декремента затухания. Установите рамку R_1 в положение, соответствующее некоторому начальному смещению N_1 . Отведите груз

из положения равновесия до совмещения указателя P с указателем рамки R_1 и отпустите груз. Когда груз начнёт совершать колебательное движение, измерьте положение N_2 указателя P , которое он будет иметь в момент окончания n -го (например, третьего) полного колебания. Полученные результаты запишите в [ТАБЛИЦУ 25.2](#). Измерения повторите три раза.

4. Снятие резонансной кривой. Включите электродвигатель, установив регулятор частоты R на одно из крайних положений. Когда колебания установятся, подведите рамки R_1 и R_2 на шкале S к крайнему нижнему положению N_1 и крайнему верхнему положению N_2 , которые достигаются указателем P при колебании груза. Измерьте время t , в течение которого груз совершает n полных колебаний (не менее десяти). Аналогичные измерения проведите при других положениях регулятора частоты R . При каждом новом положении регулятора R нужно выждать некоторое время для установления вынужденных колебаний. Для построения резонансной кривой необходимо получить не менее 10–12 точек. При этом экспериментальные точки должны быть сняты по обе стороны от максимума резонансной кривой и особенно тщательно вблизи резонанса.

3. Обработка результатов измерений

Данные установки: $N_0 = \dots$; $A_0 = \dots$

Таблица 25.1

Определение периода свободных затухающих колебаний

$n = \dots$				
№ п/п	x_0 , см	t , с	\bar{t} , с	T , с

Таблица 25.2

Определение логарифмического декремента затухания

$n = 3$						
№ п/п	N_1 , см	N_2 , см	A_1 , см	A_{1+n} , см	δ	$\bar{\delta}$

Таблица 25.3

Получение резонансной кривой

№ п/п	N_1 , см	N_2 , см	n	t , с	T , с

1. По данным [ТАБЛ. 25.1](#) найдите \bar{t} и вычислите период затухающих колебаний по формуле

$$T = \frac{\bar{t}}{n}.$$

2. Рассчитайте абсолютную погрешность измерения периода T по формуле

$$\Delta T = T \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{\bar{t}}\right)^2}$$

и запишите окончательный результат в виде

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

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

3. По данным [ТАБЛИЦЫ 25.2](#) найдите значение амплитуды колебаний A_1 и A_{1+n} ($n = 3$) по формулам $A_1 = N_1 - N_0$, $A_{1+n} = N_2 - N_0$. По средним значениям A_1 и A_{1+n} , используя формулу [\(10\)](#), вычислите логарифмический декремент затухания и занесите полученные значения в [ТАБЛ. 25.2](#). Рассчитайте абсолютную погрешность δ по формуле

$$\Delta\delta = \frac{1}{n} \sqrt{\left(\frac{\Delta A_1}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A_{1+n}}{A_{1+n}}\right)^2}$$

и запишите окончательный результат в виде

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

с учётом правил округления (см. [ПРИЛОЖЕНИЕ 1](#)).

4. Проверьте выполнение условия $\beta \ll \omega$. По найденным значениям δ и T вычислите $\beta = \delta/T$ и $\omega = 2\pi/T$. Сделайте вывод.

5. По данным [ТАБЛИЦЫ 25.3](#) для каждой точки определите период колебаний по формуле

$$T = \frac{t}{n}$$

и амплитуду

$$A = \frac{N_2 - N_1}{2}.$$

По найденным экспериментальным значениям на миллиметровой бумаге постройте график $A = f(T)$.

6. Зная статическое смещение A_0 (указано на установке) и A_{\max} (из графика), рассчитайте логарифмический декремент затухания по формуле [\(10\)](#).

7. Из графика $A = f(T)$ найдите значения периодов T_1 и T_2 ([РИС. 25.5](#)), для которых выполняется условие $A_1 = A_{\max}/\sqrt{2}$, и по формуле [\(15\)](#) рассчитайте логарифмический декремент затухания, приняв $T_0 \approx T_{\text{рез}}$.

8. Сравните значения логарифмических декрементов затухания, полученных в пп. 2 и 7. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. При каких условиях возникают свободные незатухающие и затухающие механические колебания? Выведите дифференциальные уравнения этих колебаний.
2. От чего зависят период (частота) свободных (затухающих и незатухающих) и вынужденных колебаний пружинного маятника?
3. От каких параметров системы зависит амплитуда вынужденных колебаний? Чему равна их частота?
4. Что такое резонанс?
5. Что такое логарифмический декремент затухания?
6. Какими способами определяется логарифмический декремент затухания в данной работе?

7. Как изменится резонансная кривая при увеличении (уменьшении) коэффициента затухания?
8. Что такое добротность колебательной системы?
9. Используя полученные результаты, оцените коэффициент затухания системы β .
10. Приведите примеры использования механического резонанса.

ПОГРЕШНОСТИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Погрешность прямого измерения складывается из инструментальной и случайной погрешностей:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{инс}})^2 + (\Delta x_{\text{сл}})^2},$$

x — измеряемая величина (ток, напряжение и т. д.), Δx — её погрешность.

Инструментальная погрешность обусловлена конструкцией измерительного прибора, неточностью его изготовления. Величина этой погрешности определяется классом точности прибора, но знак её неизвестен (его можно оценить, сравнивая показания данного инструмента измерения с прибором более высокого класса точности).

Предельную инструментальную погрешность стрелочных приборов (амперметры, вольтметры и т. д.) можно определить по классу точности прибора:

$$\Delta x_{\text{инс}} = K \frac{x_{\text{пред}}}{100},$$

где $x_{\text{пред}}$ — предел измерения прибора, т. е. наибольшее значение измеряемой величины, указанное на шкале.

Класс точности указывается на лицевой панели прибора в виде двух цифр, разделённых запятой (0,5; 1,0; 1,5 и т. д.).

Цифровые измерительные приборы представляют собой сложные электронные устройства, поэтому при определении их погрешности необходимо руководствоваться паспортными данными приборов, указанными на учебных стендах. В любом случае их предельная инструментальная погрешность не может быть ниже единицы последнего разряда, высвечиваемого на индикаторной шкале прибора.

Для приборов, у которых указатели перемещаются скачком с одного деления на другое (например, секундомеры), предельное значение инструментальной погрешности принимается равным цене наименьшего деления его шкалы. Так, у секундомера с ценой наименьшего деления 0,2 с инструментальная погрешность равна $\pm 0,2$ с.

Случайная погрешность вызывается причинами, которые не всегда поддаются оценке: зазоры в опорах, колебания стола, электромагнитные наводки и т. д. Она проявляется при повторных измерениях в виде разброса измеряемых значений, как по величине, так и по знаку. Случайная ошибка носит вероятностный характер.

Для оценки случайной погрешности физической величины процесс её измерения повторяется многократно. Если проводится серия из n измерений одной и той же величины ($n > 1$), то из-за наличия случайных погрешностей отдельные значения из этой серии x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) не одинаковы. В отсутствие систематической погрешности в качестве действительного значения измеряемой величины берётся среднее значение:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

Кроме среднего значения следует указать доверительный интервал, в котором с достаточно большой надёжностью лежит истинное значение измеряемой величины. В пределах этого интервала должна лежать большая часть уже проведённых измерений (и измерений, которые мы могли бы провести в будущем). Полуширина доверительного интервала и определяет случайную погрешность измерения:

$$\Delta x_{\text{сл}} = t_{P,n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

Коэффициент Стьюдента $t_{P,n}$ зависит как от числа измерений n , так и от доверительной вероятности P (вероятности того, что истинное значение измеряемой величины находится в пределах доверительного интервала). Доверительную вероятность, как правило, принимают $P = 0,9; 0,95; 0,99$. В рядовых физических экспериментах обычно выбирают $P = 0,95$.

Значения коэффициента Стьюдента можно найти по [ТАБЛИЦЕ 0.1](#).

Таблица 0.1

Коэффициенты Стьюдента

P	$t_{P,2}$ $n = 2$	$t_{P,3}$ $n = 3$	$t_{P,4}$ $n = 4$	$t_{P,7}$ $n = 7$	$t_{P,10}$ $n = 10$
0,9	6,314	2,920	2,132	1,943	1,833
0,95	12,706	4,303	2,776	2,447	2,262
0,99	63,667	9,925	4,604	3,707	3,250

Суммарная погрешность прямого измерения даётся формулой

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{инс}})^2 + (\Delta x_{\text{сл}})^2}.$$

При расчётах следует предварительно округлять значения случайной и предельной погрешностей до трёх значащих цифр.

Результат прямого измерения следует записать в следующей форме:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x; P = 0,95.$$

Это означает, что с доверительной вероятностью 0,95 истинное значение x лежит от $\bar{x} - \Delta x$ до $\bar{x} + \Delta x$.

При записи результатов измерений необходимо пользоваться следующими **правилами округления**:

1. Число, выражающее суммарную погрешность измерения, округляется до одной значащей цифры; если же оно начинается цифрой 1 или 2, то округление проводят до двух значащих цифр.
2. Числовое значение результата измерения должно оканчиваться цифрой того же порядка, что и числовое значение абсолютной погрешности.
3. При округлении целых чисел все отброшенные при округлении цифры заменяются множителем 10^m , где m – число отброшенных цифр. (Например, если $\Delta x = 1327$, то следует записать $\Delta x = 13 \cdot 10^2$, если же $\Delta x = 851$, то после округления получим $\Delta x = 9 \cdot 10^2$.)

4. Если при округлении первая отбрасываемая цифра больше или равна пяти, то предыдущая, сохраняемая цифра, увеличивается на единицу. В противном случае эта цифра не изменяется.

Пример

Если после расчётов оказалось, что погрешность измерения равна 0,47; 0,064; 0,128; 342, то следует записать:

$$\Delta x_1 = 0,5; \Delta x_2 = 0,06; \Delta x_3 = 0,13; \Delta x_4 = 3 \cdot 10^2.$$

Если при этом измеряемая величина равна 3,425; 12,8356; 9.025; 8395,7, то результат необходимо представить в форме:

$$x_1 \pm \Delta x_1 = 3,4 \pm 0,5; P = 0,95;$$

$$x_2 \pm \Delta x_2 = 12,84 \pm 0,06; P = 0,95;$$

$$x_3 \pm \Delta x_3 = 9,03 \pm 0,13; P = 0,95;$$

$$x_4 \pm \Delta x_4 = (84 \pm 3) \cdot 10^2; P = 0,95.$$

ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Электронный осциллограф — это прибор, служащий для наблюдения и измерения параметров электрических сигналов. С его помощью получают изображения функциональных зависимостей одних физических величин от других (чаще от времени) на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

Для исследования зависимости электрического напряжения от времени исследуемое напряжение подаётся на вход Y осциллографа и включается генератор развёртки, вырабатывающий линейно изменяющееся напряжение.

Для исследования зависимости одного напряжения (тока) от другого первое из указанных напряжений подаётся на вход Y , а второе — на вход X , генератор развёртки в этом случае отключается.

Генератор развёртки вырабатывает пилообразное (линейно возрастающее, а затем резко падающее до нуля) напряжение, которое предназначено для равномерного перемещения луча вдоль оси X от левого до правого края экрана, а затем быстрого возвращения его в крайнее левое положение. Обратный ход луча на экране соответствует участкам быстрого изменения пилообразного напряжения.

Частоту напряжения, вырабатываемого генератором развёртки, можно ступенчато и плавно изменять в достаточно больших пределах (как правило, от 10 Гц до 1 МГц и более).

Если напряжение на входе Y равно нулю, но включён генератор развёртки, то на экране будет видна горизонтальная линия. При наличии двух напряжений одновременно (входного и с генератора развёртки) на экране будет видна осциллограмма исследуемого сигнала.

Генератор развёртки в канале X может иметь три режима работы: *автоколебательный*, т. е. периодический (для наблюдения синусоидальных и импульсных сигналов с небольшой *скважностью* — отношением периода колебаний к длительности импульса), *ждущий* (для наблюдения сигналов с большой и переменной *скважностью*), одиночной — *разовой развёртки* (для фотографирования, а в запоминающих осциллографах и для непосредственного изучения одиночных сигналов). В *ждущем* режиме генератор развёртки начинает вырабатывать пилообразное напряжение, если на вход Y осциллографа поступает исследуемый сигнал достаточной амплитуды.

Для того чтобы получить неподвижное изображение, частота генератора развёртки должна быть равна или в целое число раз меньше частоты исследуемого сигнала. С этой целью осуществляют **синхронизацию** частоты генератора развёртки (согласовывают во времени) с частотой исследуемого сигнала. Когда частота генератора развёртки близка частоте исследуемого напряжения, частота генератора развёртки изменяется до точного совпадения с частотой исследуемого сигнала.

Согласование частоты генератора развёртки с частотой исследуемого сигнала обеспечивает блок синхронизации. Существует три варианта синхронизации: внешняя, внутренняя и от сети. *Синхронизацию от сети* применяют для исследования сигналов, частота которых равна или кратна частоте питающей сети (50 Гц).

Наиболее часто используют *внутреннюю синхронизацию*. В этом случае часть исследуемого напряжения подаётся в блок синхронизации, в котором вырабатываются импульсы, управляющие работой генератора развёртки. Исследуемое напряжение как бы «навязывает» свой период генератору развёртки. Если при этом период собственных колебаний генератора развёртки почти равен (или почти кратен) периоду колебаний исследуемого напряжения, то колебания генератора синхронизируются и происходят в такт с исследуемым напряжением. Осциллографы снабжаются переключателем вида синхронизации и переключателем полярности синхронизирующего напряжения.

Существуют многолучевые и многоканальные осциллографы. В многолучевых осциллографах применяются специальные многолучевые электронные трубки, а в многоканальных — специальные коммутаторы электрических сигналов, позволяющие наблюдать несколько сигналов на экране однолучевой ЭЛТ.

СПЕЦИФИКАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

При использовании в работе электроизмерительных приборов заполняется [ТАБЛИЦА 0.2](#). Для многопредельных приборов указываются только те пределы, на которых проводились измерения.

Пример заполнения спецификации приведён в описании лабораторной работы № 7 ([ТАБЛ. 7.3](#)).

Таблица 0.2

№ п/п	Наименование прибора	Система	Пределы измерений		Цена деления	Класс точности
			в делениях	в единицах измерения		

Если в работе используются приборы, не являющиеся электроизмерительными (например, линейка, микроскоп), то столбец «Система» не заполняется, а в столбце «Класс точности» указывается инструментальная погрешность данного прибора в соответствующих единицах измерения (например, 0,1 мм).

ФОРМА ОТЧЁТА О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Номер работы
2. Название работы
3. Цель работы
4. Схема установки. Пояснения к схеме
5. Таблица спецификации измерительных приборов
6. Данные установки (записываются в процессе выполнения работы)
7. Таблицы результатов измерений
8. Расчётные формулы и формулы для погрешностей
9. Предварительный расчёт (выполняется в лаборатории к окончанию работы)
10. Полный расчёт (выполняется к следующему занятию)
11. Окончательные результаты измерений в виде $x = \bar{x} \pm \Delta x$
12. Графики (если требуются; выполняются на миллиметровой бумаге и вклеиваются в тетрадь)
13. Вывод

Отчёты по лабораторным работам оформляются в тетради в клетку (или на сшитых листах). На обложке тетради должны быть указаны ФИО студента и номер бригады. В конце семестра после получения зачёта по лабораторному практикуму тетрадь сдаётся преподавателю.

Отчёт по лабораторной работе выполняется синей или чёрной ручкой. Линии таблиц и рисунков — карандашом, прямые линии — по линейке. Содержимое таблиц, в том числе результаты прямых измерений, и буквенные обозначения на рисунках — ручкой.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

В [ТАБЛИЦЕ 0.3](#) приведены значения постоянных, используемых при расчётах или как справочные значения в работах данного сборника. При проведении расчётов представляйте эти значения с большим количеством значащих цифр (не меньше 5–6), для того чтобы при расчёте погрешности косвенных измерений можно было не учитывать относительную погрешность физических констант.

Таблица 0.3

<i>Постоянная</i>	<i>Общепринятое обозначение</i>	<i>Значение</i>
Скорость света в вакууме	c	$2,99792458 \cdot 10^8$ м/с
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	μ_0	$1,25663706 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Элементарный заряд	e	$1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
Ускорение свободного падения (на широте Москвы)	g	9,8156 м/с ²
Магнетон Бора	μ_B	$9,274078 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Удельный заряд электрона	e/m_e	$1,7588047 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Масса покоя электрона	m_e	$9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг
Число π	π	3,14159265

Список литературы

1. **Детлаф А.А.**, Яворский Б.М. Курс физики. — М.: Издательство «Академия», 2014
2. **Савельев И.В.** Курс общей физики. Т. 2. — СПб.: Издательство «Лань», 2007
3. **Авилова И.В.**, Бирюкова О.В., Ермаков Б.В., Корецкая И.В. Электричество и магнетизм. Сборник задач. Учебное пособие по курсу «Физика». // Под редакцией Ермакова Б.В. — М.: Издательство МЭИ, 2013
4. **Новодворская Е.М.**, Дмитриев Э.М. Сборник задач по физике с решениями для ВТУЗов. — М.: Издательство «Высшая школа», 2003
5. **Иродов И.Е.** Электромагнетизм. Основные законы. — М.: Издательство «Лаборатория базовых знаний», 2001
6. **Иродов И.Е.** Волновые процессы. Основные законы. — М.: Издательство «Лаборатория базовых знаний», 2001
7. **Григорьев С.В.** и др. Механика и молекулярная физика: лабораторный практикум. — М.: Издательство МЭИ, 2017
8. **ГОСТ 2.755-87.** Обозначения условно-графические в электрических схемах