

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра физики

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Физика»
для студентов всех направлений и специальностей
всех форм обучения

Воронеж 2021

УДК 537(075.8)
ББК 22.33я73

Составители:

*канд. физ.-мат. наук Т. И. Касаткина,
канд. физ.-мат. наук В. Г. Санников,
канд. техн. наук А. В. Абрамов,
Е. В. Алексеева*

Электромагнетизм. Колебания и волны: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физика» для студентов всех строительных специальностей всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Т. И. Касаткина, В. Г. Санников, А. В. Абрамов, Е. В. Алексеева. - Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. - 41 с.

Методические указания содержат теоретический материал, необходимый для выполнения лабораторных работ по разделам «Электромагнетизм», «Колебания и волны» дисциплины «Физика». В методических указаниях представлены описания методик измерения, приборов, порядок выполнения лабораторных работ и расчета искомых величин в лаборатории кафедры физики ВГТУ.

Методические указания предназначены для студентов всех строительных специальностей всех форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ЛР _ Электромагнетизм. Колебания и волны.

Ил. 11. Табл. 21. Библиогр.: 4 назв.

**УДК 537(075.8)
ББК 22.33я73**

Рецензент - Е. В. Шведов, д-р. физ.-мат. наук, проф. кафедры физики
Воронежского государственного технического университета

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания содержат краткий теоретический материал, необходимый для выполнения лабораторных работ по разделам «Электромагнетизм», «Колебания и волны» дисциплины «Физика».

В методических указаниях представлены описания методик измерения, приборов, порядок выполнения лабораторных работ и расчета искомых величин в лаборатории кафедры физики ВГТУ, библиографический список.

Материал методических указаний скомпонован таким образом, что каждая последующая работа является логическим продолжением предыдущей. Особое внимание уделено вопросам измерений магнитного поля, без качественного изучения которых невозможно понимание принципов работы электротехнических приборов, генераторов и медицинской техники. Общее усвоение материала, изложенного в методических указаниях, поможет студентам в понимании физических процессов, протекающих в различных устройствах техники и электроники, будет способствовать правильному проектированию электронных средств, выбору необходимых схемотехнических вариантов для их исполнения, оптимизации их параметров и работы, а также модернизации.

Составители старались по возможности привести основные физические зависимости и закономерности, за исключением тех, которые требуют слишком громоздких вычислений, при желании студент может ознакомиться с ними в учебных изданиях, которые вошли в библиографический список, приведенный в конце методических указаний.

После каждой лабораторной работы приведены контрольные вопросы с целью развития умения применять на практике вопросы теории и для способствования лучшему усвоению и закреплению материала. Контрольные вопросы также могут быть использованы студентами в целях подготовки к получению допуска для выполнения лабораторных работ.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ № 1 - 3

Еще в XIX веке экспериментально было показано, что подобно тому как вокруг электрического заряда формируется электростатическое поле, так и вокруг токов и магнитов в пространстве возникает силовое поле, которое называется магнитным. Обнаружить магнитное поле можно по механическому ориентирующему воздействию на рамку с током или на стрелку магнитного компаса.

В соответствии с законом Ампера на проводник с током в магнитном поле действует сила:

$$dF = IBdl \sin \alpha, \quad (1)$$

где α – угол между вектором \vec{B} и элементом тока $d\vec{l}$.

Если в магнитное поле помещена рамка с током, нормаль \vec{n} к которой составляет угол α с вектором магнитной индукции \vec{B} , то на рамку с током начинает действовать пара сил, определяемая выражением:

$$M = IBabs \sin \alpha, \quad (2)$$

где a и b стороны прямоугольного контура с током, если $S = a \cdot b$ – площадь прямоугольного контура, то обозначив величину \vec{P}_m , как магнитный момент контура:

$$\vec{P}_m = IS\vec{n}, \quad (3)$$

где \vec{n} единичный вектор нормали к плоскости контура с током, направление которого определяется по правилу «правого винта» - уравнение (2) может быть представлено виде:

$$\vec{M} = [\vec{P}_m \vec{B}], \quad (4)$$

или в скалярной форме:

$$M = P_m B \sin \alpha, \quad (5)$$

угол α – угол между положительным направлением нормали \vec{n} к рамке стоком и вектором магнитной индукции \vec{B} .

В соответствии с законом Био-Савара-Лапласа магнитная индукция $d\vec{B}$, создаваемая элементом $d\vec{l}$ проводника с током I некоторой точке A , будет определяться по формуле:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}, \quad (6)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магнитная постоянная, μ - относительная магнитная проницаемость среды, \vec{r} - радиус-вектор от элемента $d\vec{l}$ до точки A (рис. 1).

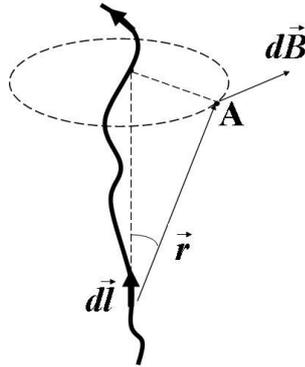


Рис. 1. Определение вектора магнитной индукции \vec{B}

Для определения вектора магнитной индукции, создаваемой всем проводником в некоторой точке, выражение (6) интегрируется по всей длине проводника. Интегрирование выражения (6) в случае кругового контура радиуса R с током I приводит к следующей формуле (7) для магнитной индукции в центре контура:

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}, \quad (7)$$

где R – радиус кругового контура с током.

Если контур содержит N витков, то величина магнитной индукции B_K в центре кругового витка (плоской катушки) определится следующей формулой:

$$B_K = \frac{\mu_0 \mu IN}{2R} \quad (8)$$

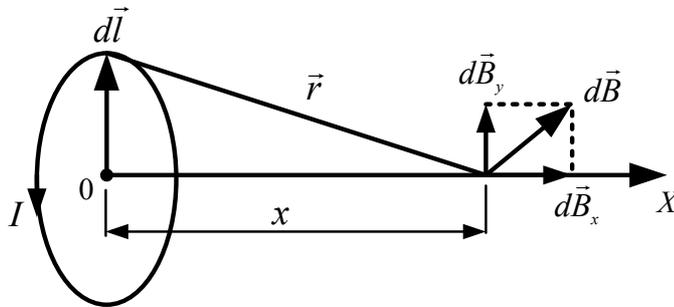


Рис. 2. Определение вектора магнитной индукции \vec{B} на расстоянии x от плоскости кругового тока

В случае, если точка, в которой исследуется магнитное поле расположена на некотором расстоянии x (рис. 2) от плоскости катушки - величина магнитной индукции будет определяться по формуле:

$$B_K = \frac{\mu_0 \mu N I R^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (9)$$

Таким образом, с учетом формул (7)-(9), зная ток, протекающий в плоской катушке, геометрические размеры, число витков плоской катушки и

расстояние x всегда можно определить величину и направление вектора магнитной индукции \vec{B} в любой точке.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛОСКОЙ КАТУШКИ

Цель работы: определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и величины магнитной индукции катушки с током.

Оборудование: источник питания, катушка индуктивности, компас.

1.1 Методика эксперимента

Работа выполняется на оборудовании, представленном на рис. 1.1. Она состоит из плоской катушки 1 и расположенной вдоль ее оси деревянной платформы 2, с нанесенной разметкой, показывающей расстояние r от плоскости катушки. Катушку можно считать плоской, если радиусы слоев обмотки $R_i \gg b$, где b – длина катушки. Радиус витков катушки R можно принять равным среднему значению R_i , при $R_i \gg d$, где d – толщина обмотки. В работе среднее значение радиуса обмотки $R = 80$ мм, а параметры сечения обмотки $b = d = 4$ мм, что хорошо удовлетворяет указанным выше условиям. На платформе размещается компас 3, показывающий направление вектора магнитной индукции результирующего поля $\vec{B} = \vec{B}_3 + \vec{B}_K$, где \vec{B}_3 и \vec{B}_K представляют собой векторы магнитной индукции горизонтальной составляющей поля Земли и катушки, соответственно. Питание катушки осуществляется током от источника питания 4 с клемм 5 на клеммы 6 (в произвольной полярности соединения). Прежде чем включить источник питания тумблером 7, необходимо установить переключатель диапазонов напряжения 8 в положение соответствующее 15 В. Необходимые значения силы тока в катушке задаются с помощью регулятора 9. Направление протекания тока в катушке изменяется путем переключения положения тумблера П. На рабочей панели катушки с платформой расположены клеммы выводов от ее обмотки, соответствующие 0, 15, 30, 45 и 60 виткам. Клемма вывода 10 позволяет менять количество используемых витков, путем подключения к соответствующей клемме. Экспериментальная часть данной работы состоит из двух этапов. На первом этапе определяется горизонтальная составляющая магнитного поля Земли. Для этого следует расположить компас в центре катушки так, чтобы направление север – юг ($N-S$) на компасе совпало с плоскостью катушки. Затем надо повернуть катушку с платформой так, чтобы стрелка компаса совпала с направлением $N-S$.

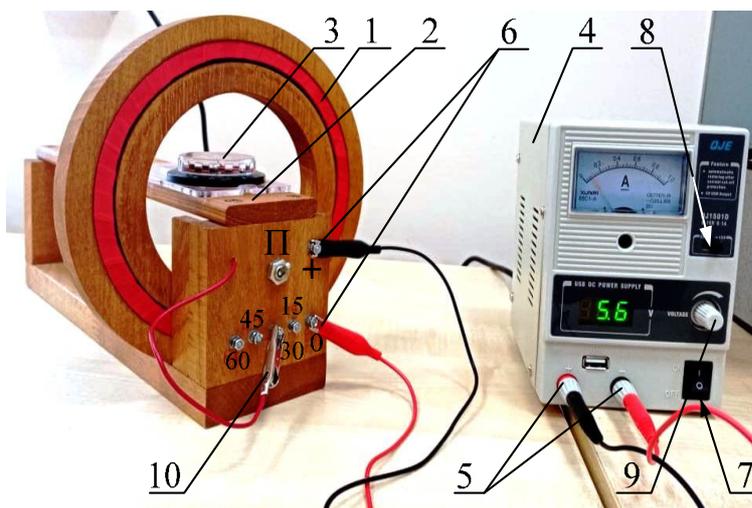


Рис. 1.1. Установка для определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и плоской катушки: 1 - плоская катушка; 2 - горизонтальная платформа; 3 - компас; 4 – источник питания; 5 - клеммы источника питания; 6 - клеммы подключения плоской катушки; 7 – тумблер «сеть»; 8 - переключение диапазона напряжений; 9 - регулировка напряжения; 10 - контакт переключения числа витков катушки

При этом плоскость катушки станет параллельна магнитному меридиану (вектору \vec{B}_3). Если через катушку пропустить ток I , то магнитное поле катушки \vec{B}_K в центре компаса будет перпендикулярно \vec{B}_3 . Суперпозиция этих полей даст результирующее магнитное поле \vec{B} , направление которого покажет стрелка компаса, отклонившись на угол α от магнитного меридиана. Из геометрического положения векторов следует:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|\vec{B}_K|}{|\vec{B}_3|}. \quad (1.1)$$

При равенстве $|\vec{B}_K| = |\vec{B}_3|$ угол α будет равен 45° . Таким образом, можно измерить величину B_3 , рассчитав B_K , отвечающую данному условию. Если компас размещен в центре катушки $r = 0$, то расчет B_K сводится к виду (1.8). На втором этапе работы, используя найденное значение B_3 и формулу (1.9), изучается характер изменения магнитного поля катушки вдоль ее оси.

1.2. Порядок выполнения работы

1.2.1. Измерение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

1. В соответствии с данным выше описанием, соберите измерительную установку и сориентируйте катушку и компас в ее центре.
2. Подключите вывод 10 к клемме 60 витков.
3. Установите регулятор тока 9 на ноль.

4. Включите источник питания в сеть.

5. Проверьте, чтобы стрелка компаса и направление $N-S$ на нем были строго параллельны плоскости катушки, которой соответствует красная линия на платформе.

6. Увеличивайте силу тока в катушке регулятором 9 до момента поворота стрелки компаса на угол максимально близкий к 45° влево или вправо (α_l или α_n). Запишите значение соответствующего тока в табл. 1.1.

7. Переключите положение тумблера П. Измерьте угол отклонения стрелки компаса в противоположном направлении. Если значение угла α_n заметно отличается от α_l , необходимо добиться их хорошего совпадения, за счет регулировки силы тока и положения платформы относительно B_3 . (Следует иметь в виду, что если при одном и том же значении силы тока один из углов меньше 45° , а другой больше 45° , то это является следствием не точного выполнения пункта 5 и для исправления этого, необходимо осуществить небольшой поворот катушки с платформой).

8. После достижения удовлетворительного равенства углов α_l и α_n , запишите их значения, а также и их среднее значение $\langle \alpha \rangle = (\alpha_n + \alpha_l) / 2$ и соответствующую им силу тока в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

N	60			45			30			15		
I, mA												
$\alpha(^{\circ})$	α_l	α_n	$\langle \alpha \rangle$									
$B_K, Tл$												
$\langle B_K \rangle, Tл$												

9. Не нарушая положение катушки, повторите пункты 6-8 для N равных 45, 30 и 15 витков.

10. Вычислите с помощью формулы (4) значения B_K соответствующие каждому измерению, и найдите их среднее значение $\langle B_K \rangle = B_3$, которое можно принять в качестве горизонтальной составляющей магнитной индукции поля Земли.

2.2.2 Исследование магнитного поля плоской катушки

1. Не нарушая ориентации компаса и катушки, подключите вывод 10 к клемме 60 витков.

2. Установите регулятором 9 такой ток в катушке, чтобы угол α в любую из сторон составлял $65-70^\circ$ и запишите значения α и I в табл. 1.2.

3. Переключите положение тумблера П и выполните действия, указанные в п. 7 предыдущего этапа работы. Запишите значения углов α_n и α_l в табл. 1.2.

4. Не нарушая ориентации катушки и не меняя силу тока в ней, перенесите компас в точку платформы со значением $r = 5 \text{ см}$ так, чтобы направление $N - S$ на компасе оставалось параллельным плоскости катушки.

5. Проведите измерения углов α_n и α_l , и запишите их табл. 1.2.

6. Повторите пункты 4 и 5 для $r = 10 \text{ см}$; $r = 15 \text{ см}$ и $r = 20 \text{ см}$.

7. Вычислите для каждого значения r величины $\langle \alpha \rangle$, $\text{tg} \langle \alpha \rangle$ и запишите их в табл. 1.2.

8. Используя формулу (1.1), найдите экспериментальные значения $B_{KЭксп}$ для различных r и запишите их в табл. 1.2.

9. Используя формулу (9), рассчитайте теоретические значения $B_{KТеор}$ при различных r .

10. Постройте графики зависимостей $B_{KЭксп}$ и $B_{KТеор}$ от r .

Таблица 1.2

Определение магнитного поля плоской катушки

N	60														
$I, \text{ мА}$															
$r, \text{ см}$	0			5			10			15			20		
$\alpha(^{\circ})$	α_l	α_n	$\langle \alpha \rangle$												
$\text{tg} \langle \alpha \rangle$															
$B_{KЭксп}, \text{ Тл}$															
$B_{KТеор}, \text{ Тл}$															

Контрольные вопросы

1. Перечислите источники магнитного поля.
2. Как обнаружить магнитное поле?
3. Назовите основные характеристики магнитного поля, каковы их размерности? Как изображают магнитное поле графически?
4. Где находится северный магнитный полюс Земли? Что такое магнитный меридиан?
5. В чем заключается принцип суперпозиции магнитных полей?
6. Как вычислить магнитный момент плоской катушки и соленоида?
7. В чем заключается смысл закона Био-Савара-Лапласа?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИЗМЕРЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА РАМКИ С ТОКОМ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Цель работы: измерение вращающего момента пары сил, действующего на рамку с током в однородном магнитном поле.

Оборудование: рамки с различным числом витков, катушки Гельмгольца, источники тока, реостат, мультиметры, крутильные весы.

2.1 Описание лабораторной установки

Внешний вид установки представлен на рис. 2.1. Рамка с током 1 помещается в магнитное поле, создаваемое катушками Гельмгольца 2, взаимное расположение и подключение которых обеспечивает однородное магнитное поле. Питание катушек и контура стоком осуществляется с помощью источников тока 3 и 4. Контроль величин токов производится мультиметрами 5 и 6. Вращающий момент контролируется крутильными весами 7, закрепленных на штативе. Нулевое положение весов контролируется перед каждым измерением. При прохождении тока через контур в магнитном поле катушек рамка повернется на некоторый угол, завернув пружину крутильных весов. Для определения вращающего момента надо повернуть рамку в начальное положение с помощью винта 8. В первоначальное положение рамка возвращается по установочной линейке 11. При этом стрелка винта 9 покажет по круговой шкале 10 величину момента вращающей силы, действующей на рамку с током (цена деления шкалы 10: 1 деление - $1 \cdot 10^{-5}$ Н м).

Модуль индукции магнитного поля катушек Гельмгольца будет определяться следующим выражением:

$$|\vec{B}| = CI_K, \quad (2.1)$$

где C - некоторая постоянная величина, учитывающая геометрию и количество витков катушек Гельмгольца, а I_K - сила тока в катушках.

Тогда для нахождения вращающего момента, в случае использовании круглых рамок с током, можно применить следующую формулу:

$$|\vec{M}| = CI_K NI_p \frac{\pi d^2}{4} \sin \alpha, \quad (2.2)$$

где N – число витков в рамке, I_p - ток в рамке, d – диаметр рамки, α – угол между нормалью к рамке с током и вектором \vec{B} однородного магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца. Постоянная установки $C = 6,92 \cdot 10^{-4} \text{ Н/А}^2 \text{ м}$.

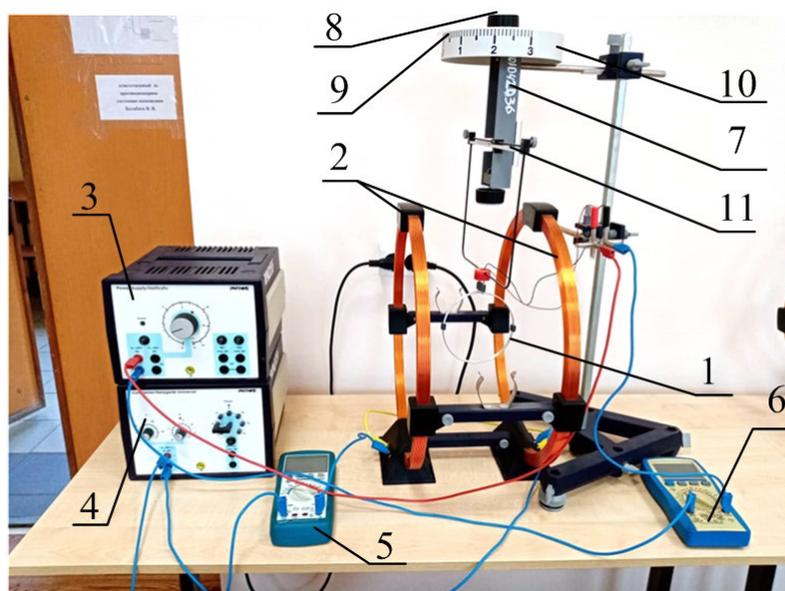


Рис. 2.1. Внешний вид экспериментальной установки: 1 - рамка с током; 2 - катушки Гельмгольца; 3 - источник питания рамки; 4 - источник питания катушек Гельмгольца; 5, 6 - амперметры; 7 - крутильные весы; 8 - винт крутильных весов; 9 - стрелка крутильных весов; 10 - круговая шкала; 11 - установочная линейка

2.2. Порядок выполнения работы

1. Соберите установку, как показано на рис. 2.1. Круговую рамку 1 с тремя витками ($N = 3$) и диаметром $d = 0,12$ м необходимо подвесить к крутильным весам таким образом, чтобы нормаль к рамке была перпендикулярна к осям катушек Гельмгольца, т.е. угол $\alpha = 90^\circ$.

2. С помощью винта 8 установите нулевое положение стрелки по шкале 10 крутильных весов 7.

3. Включите блок питания 4 и установите ток через катушки Гельмгольца $I_K = 1$ А. Величину тока необходимо контролировать амперметром 5.

4. Включите блок питания 3 и установите ток через круговую рамку $I_P = 1,5$ А. Величина тока контролируется амперметром 6.

5. Измерьте вращающий момент сил, действующий на рамку с током в однородном магнитном поле. Для этого необходимо повернуть винт 8 до возвращения рамки с током в начальное положение по установочной линейке 11. По шкале крутильных весов 10 определите количество делений момента сил. Умножив количество делений на цену деления $1 \cdot 10^{-5}$ Н·м, определите значение вращающего момента.

6. Результаты измерений занесите в табл. 2.1

7. Повторите опыт п.п. 2-5 со значениями тока через катушки Гельмгольца $I_K = 1,4; 1,8; 2,2; 2,6$ А.

8. Используя формулу (2.2), рассчитайте теоретическое значение вращательного момента $M_{теор.}$

Таблица 2.1

Результаты измерения вращающего момента при различных значениях тока в катушках Гельмгольца

	$I_p = 1,5A$				
I_K, A	1,0	1,4	1,8	2,2	2,6
$M, H \cdot m$					
$M_{теор.}, H \cdot m$					

9. Повторите пп.2-5,8 при значении тока через катушки Гельмгольца $I_K = 1,5A$ и тока через рамку $I_p = 1,4; 1,8; 2,2; 2,6A$. Результаты измерения занесите в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты измерений вращающего момента при различных значениях тока через рамку

	$I_K = 1,5A$				
I_p, A	1,0	1,4	1,8	2,2	2,6
$M, H \cdot m$					
$M_{теор.}, H \cdot m$					

10. Постройте графики зависимостей $M = f(I_K); M = f(I_p)$.

11. Сравните экспериментальные и теоретические значения вращательного момента.

Контрольные вопросы

1. Что называется индукцией магнитного поля? Куда направлен вектор \vec{B} индукции магнитного поля?

2. Как ориентированы линии магнитной индукции для прямого и кругового тока?

3. Сформулируйте закон Био – Савара -Лапласа.

4. Дайте определение вектора магнитного момента контура с током.

5. Сформулируете и поясните закон Ампера.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА БИО-САВАРА- ЛАПЛАСА ДЛЯ КРУГОВОГО КОНТУРА С ТОКОМ

Цель работы: экспериментальная проверка выполнимости закона Био-Савара-Лапласа для кругового контура с током (плоской катушки).

Оборудование: магнитный компас, круговой контур с изменяющимся числом витков (плоская катушка), регулируемый источник тока.

3.1. Описание лабораторной установки

Проверка формулы (9) проводится на лабораторной установке, представленной на рис. 3.1. Конструкция установки позволяет независимо изменять значения всех переменных, входящих в соотношение (9): силы тока I , числа витков N , расстояния x от плоскости в котором расположен круговой контур с током. При этом сила тока I с помощью переменного сопротивления может плавно регулируется в пределах одного диапазона, а изменение числа витков в контуре N осуществляется дискретно от 15 до 60. Исследование магнитного поля кругового контура с током проводится с помощью магнитного компаса, помещаемого на различном расстоянии от плоскости контура. При этом система контур – компас при $x=0$ ориентируется в пространстве таким образом, чтобы стрелка компаса находилась в плоскости кругового контура, а поле, создаваемое контуром, было перпендикулярно магнитному полю Земли.

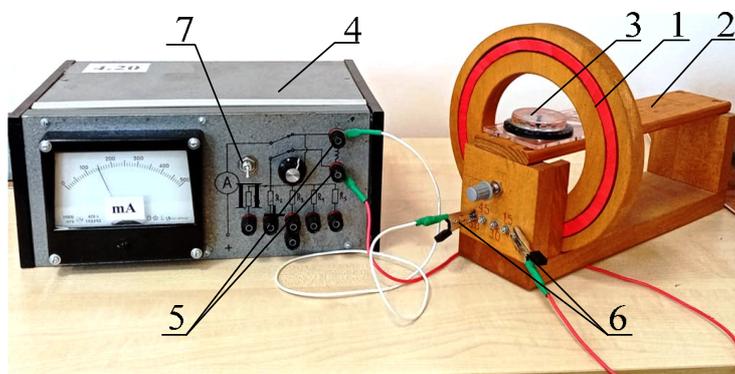


Рис. 3.1. Внешний вид установки: 1 - плоская катушка с « N » витками; 2 - горизонтальная платформа; 3 – компас; 4 - блок питания; 5 - клеммы подключения напряжения; 6 - выходы переключения числа витков; 7 - тумблер изменения полярности напряжения

На рис. 3.2 представлено направление векторов магнитной индукции поля Земли и плоской катушки. Зная значение горизонтальной составляющей B_z магнитного поля Земли (в нашем случае $B_z = 3 \cdot 10^{-5}$ Тл), и угол α на которой отклонится стрелка компаса под действием поля, созданной плоской катушкой,

по тангенсу угла α , можно определить значение вектора магнитной индукции контура по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|\vec{B}_K|}{|\vec{B}_3|}. \quad (3.1)$$

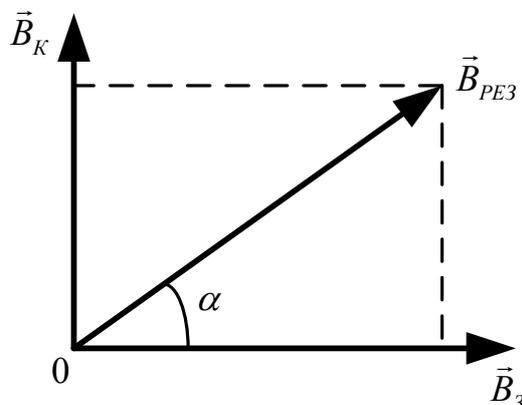


Рис. 3.2. Направление векторов магнитной индукции поля Земли и плоской катушки (кругового контура)

Лабораторная установка, представленная на рис. 3.1, работает следующим образом: от источника тока поочередно подключаются клеммы кругового витка (катушки) с количеством витков 15, 30, 45 и 60. Величина тока регулируется нагрузочными сопротивлениями блока питания и подстроечным сопротивлением $R_{\text{подстр}}$ на корпусе кругового контура. Зная значение угла α и величину горизонтальной составляющей поля Земли B_3 , по формуле (3.1) можно определить значение B_K катушки в данной точке.

3.2. Порядок выполнения работы

1. Поместите магнитный компас в центр плоской катушки ($x=0$). Система компас – катушка ориентируется в пространстве таким образом, чтобы стрелка магнитного компаса и плоскость катушки были параллельны, т.е. находились в плоскости магнитного меридиана.

2. Подключите катушку с числом витков $N = 15$ к источнику тока 4. Плавно изменяя с помощью сопротивлений $R_1 - R_5$ ток через катушку, добейтесь отклонения магнитной стрелки на угол $\alpha = 45^\circ$. Определите ток через катушку. С помощью тумблера 7 измените направление тока на противоположное и вновь получите отклонение стрелки на угол $\alpha = -45^\circ$. Значения силы токов занесите в табл. 3.1.

3. Повторите п. 2 с другим числом витков катушки ($N = 30, 45, 60$). При этом во всех случаях экспериментальное значение индукции магнитного поля

катушки B_K будет равно индукции горизонтальной составляющей магнитного поля Земли B_3 .

4. По среднему значению тока $\langle I \rangle$ для различного числа витков и формуле (8) рассчитайте теоретическое значение вектора магнитной индукции плоской катушки. Сравните полученные результаты.

Таблица 3.1

Измерения магнитной индукции в центре плоской катушки с током

N	15			30			45			60		
$I, \text{мА}$	$+I$	$-I$	$\langle I \rangle$									
$B_K, \text{Тл}$												
$B_{K\text{Теор}}, \text{Тл}$												

5. Подключите максимальное количество витков $N = 60$ катушки к источнику тока. Плавно изменяя силу тока, добейтесь максимального отклонения магнитной стрелки на угол $\alpha \approx 80^\circ$ при различных направлениях тока ($x = 0$). Значение углов и силу тока занесите в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Измерения магнитной индукции в зависимости от расстояния от источника магнитного поля

N	60														
$I, \text{мА}$															
$x, \text{см}$	0			5			10			15			20		
$\alpha(^{\circ})$	α_l	α_n	$\langle \alpha \rangle$												
$\text{tg}\langle \alpha \rangle$															
$B_K, \text{Тл}$															
$B_{K\text{Теор}}, \text{Тл}$															

6. Не меняя значение силы тока через катушку, повторите п.5 аккуратно перемещая компас параллельно первоначальному положению на расстояния $x = 5; 10; 15; 20 \text{ см}$. При каждом значении x определите углы отклонения магнитной стрелки. Результаты занесите в табл. 3.2.

7. По средним значениям угла вычислите $tg\langle\alpha\rangle$ и по формуле (3.1) определите величину магнитной индукции поля плоской катушки при различных значениях x .

8. Используя формулу (9) рассчитайте теоретическое значение $B_{кТеор}$ при различных значениях x . Все полученные значения $B_к(x)$ и $B_{кТеор}(x)$ занесите в табл. 3.2.

9. Постройте графики зависимостей $B_к(x)$ и $B_{кТеор}(x)$.

Контрольные вопросы

1. Что такое магнитное поле и условия его возникновения?
2. Дайте определение магнитной индукции. Поясните куда направлен вектор магнитной индукции \vec{B} .
3. Запишите и поясните закон Био-Савара-Лапласа.
4. Как найти индукцию магнитного поля в центре кругового контура с током?
5. Устройство и принцип действия лабораторной установки.
6. Поясните методику экспериментальной проверки закона Био-Савара-Лапласа для кругового контура с током.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы: определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца. Измерение магнитного наклона поля Земли и вычисление вектора магнитной индукции магнитного поля Земли.

Оборудование: катушки Гельмгольца, источник тока, реостат, мультиметр, магнитный компас.

4.1. Теоретические сведения

В XVII веке У. Гильберт предположил, что Земля является своеобразным «громадным магнитом», ось которого не совпадает с осью вращения Земли, т.е. в любой точке пространства, окружающего Землю обнаруживается действие магнитного поля. Так, подвешенная на нити или укрепленная на острие магнитная стрелка в каждой точке земной поверхности ориентируется определенным образом – в направлении северного полюса по так называемым магнитным меридианам. Это основной факт, который доказывает существования магнитного поля Земли (рис. 4.1).

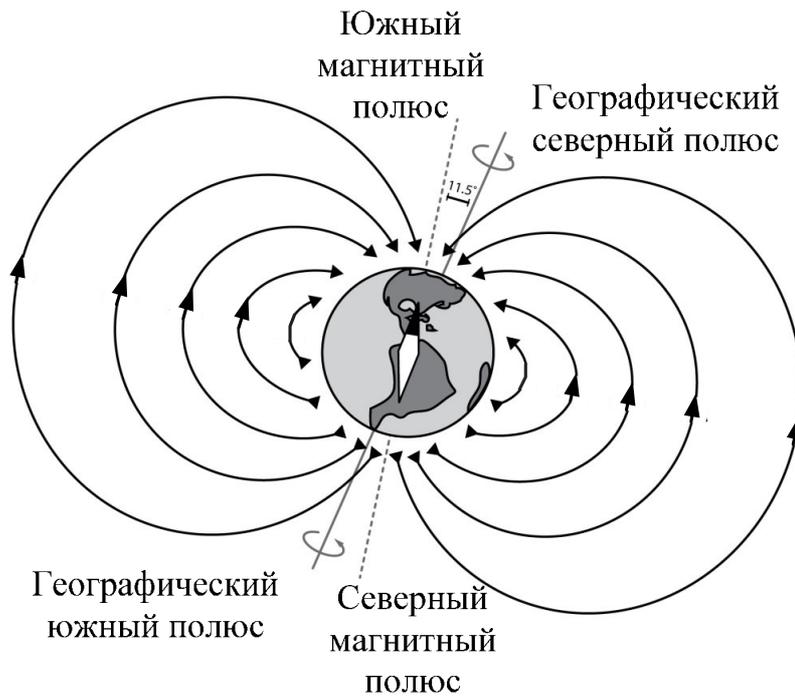


Рис. 4.1. Модель магнитного поля Земли

Точное представление о направлении магнитного поля Земли можно получить, укрепив стрелку магнитного компаса таким образом, чтобы она могла совершать отклонение в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Такие приборы носят название деклинометры. Положение стрелки в них будет совпадать с силовой линией магнитного поля Земли, а направление стрелки с вектором \vec{B}_3 . Т.е. магнитное поле Земли имеет две составляющие: горизонтальную $\vec{B}_{3Г}$ и вертикальную $\vec{B}_{3В}$.

Зная величину каждой составляющей или (и) величину магнитного наклона – величину угла θ между вектором магнитной индукции $\vec{B}_{3Г}$ и горизонтальной плоскостью, можно определить:

$$|\vec{B}_{3В}| = |\vec{B}_{3Г}| \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (4.1)$$

и модуль вектора магнитной индукции магнитного поля Земли \vec{B}_3 :

$$B_3 = \sqrt{B_{3Г}^2 + B_{3В}^2}. \quad (4.2)$$

На практике наиболее просто определить горизонтальную составляющую $\vec{B}_{3Г}$ магнитного поля Земли и угол θ . Для определения $\vec{B}_{3Г}$ рассматривают суперпозицию внешнего магнитного поля, создаваемого системой катушек Гельмгольца (вектор магнитной индукции катушек $\vec{B}_К$ направлен горизонтально и перпендикулярно вектору $\vec{B}_{3Г}$ магнитного поля Земли). Тогда результирующий вектор \vec{B}_{PE3} магнитной индукции будет равен:

$$\vec{B}_{PE3} = \vec{B}_{3Г} + \vec{B}_К. \quad (4.3)$$

Катушками Гельмгольца называется система, состоящая из двух одинаковых тонких катушек, расположенных соосно на расстоянии равному радиусу катушек. В пространстве между катушками в геометрическом центре создается почти однородное магнитное поле, величина которого определяется:

$$B_K = \mu_0 \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{IN}{R}, \quad (4.4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная; $N = 154$ - число витков в каждой катушке; I – ток, протекающий через последовательно соединенные катушки, $R = 0,2 \text{ м}$ – средний радиус катушки.

Таким образом, если поместить в центр системы Гельмгольца на осевую линию магнитный компас и сориентировать систему так, чтобы плоскости катушек были строго параллельны магнитной стрелке компаса, то воздействие на компас магнитным полем, создаваемым катушками Гельмгольца, приведет к повороту стрелки компаса на некоторый угол α . Тогда из геометрических соображений выразим горизонтальную составляющую магнитного поля Земли:

$$B_{3г} = \frac{B_K}{\text{tg}\alpha} = \mu_0 \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{IN}{R \text{tg}\alpha}, \quad (4.5)$$

угол θ - магнитного наклона измеряется с помощью поворота компаса на 90° по часовой стрелке в вертикальное положение в отсутствие магнитного поля. Далее по формулам (4.1) и (4.2) производится расчет вертикальной составляющей магнитного поля Земли $B_{зв}$ и модуля вектора магнитной индукции Земли \vec{B}_3 .

4.2. Описание лабораторной установки

Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 4.2. В отсутствие магнитного поля компас 1, укрепленный на штативе, помещается в центр системы Гельмгольца таким образом, чтобы стрелка компаса была строго параллельна плоскостям катушек Гельмгольца 2, взаимное расположение и подключение, которых обеспечивает однородное магнитное поле. Питание катушек осуществляется с помощью источников тока 3. Контроль величин тока проводится с помощью мультиметра 4. С помощью реостата 5 необходимо установить точное значение тока через катушки.

4.3. Порядок выполнения работы

4.3.1. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

1. В отсутствие магнитного поля проверьте ориентацию системы Гельмгольца, чтобы плоскость катушек была строго параллельна стрелке компаса.

Включите источник тока 3, и помощью реостата 5 установите минимальное значение тока в катушках. При этом стрелка компаса повернется на угол α_1 . Произведите измерение этого угла в градусах и занесите в табл. 4.1.

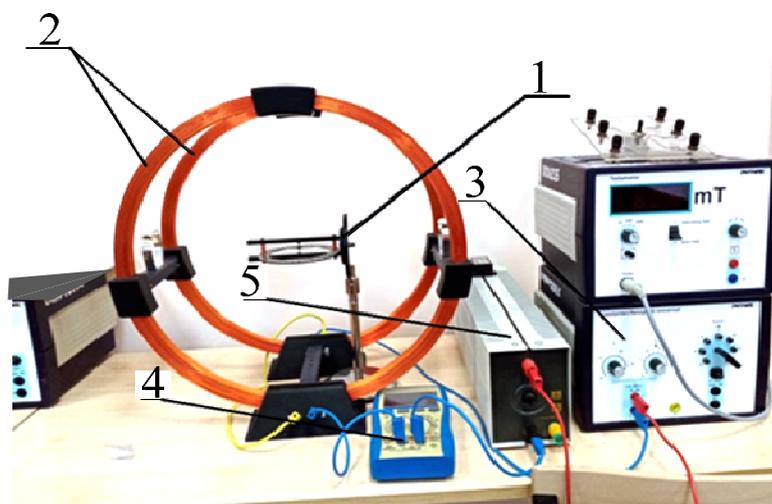


Рис. 4.2. Внешний вид экспериментальной установки: 1 - компас; 2 - катушки Гельмгольца; 3 - источник питания; 4 – амперметр; 5 – реостат

Таблица 4.1

Результаты определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

$I, \text{ мА}$	20	40	60	80	100
α_1					
α_2					
$\text{tg} \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$					
$B_{3Г}$					
$\langle B_{3Г} \rangle$					

2. Увеличивая ток через катушки Гельмгольца через 20 мА, определите соответствующие отклонения стрелки магнитного компаса α_1 . Значения углов занесите в табл. 4.1.

3. Изменив направление тока в источнике 3, при тех же величинах тока через катушки, определите значения углов α_2 . Значения занесите в табл. 4.1.

4. Вычислите значение $\text{tg} \alpha = \text{tg} \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$ и рассчитайте значение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли $B_{3Г}$ по формуле (4.5).

5. Рассчитайте среднее значение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли $\langle B_{3Г} \rangle$.

4.3.2. Измерение наклона магнитного поля Земли

1. Отключите катушки Гельмгольца от источника тока 3.
2. Проверьте ориентацию магнитного компаса. Стрелка компаса должна указывать на начало отсчета по круговой шкале 0° .
3. Поверните корпус компаса по часовой стрелки в вертикальное положение, не изменяя направление север - юг в горизонтальной плоскости. При этом стрелка будет вращаться в плоскости магнитного меридиана.
4. Измерьте угол наклона магнитного поля Земли θ по положению стрелки.
5. Вычислите вертикальную составляющую B_{zv} и модуль вектора магнитной индукции магнитного поля Земли B_z по формулам (4.1) и (4.2)

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте условия возникновения магнитного поля. Что такое магнитная индукция?
2. Дайте формулировку закона Био-Савара-Лапласа. Как определяется модуль и направление вектора магнитной индукции?
3. Запишите формулу для расчета вектора магнитной индукции кругового контура с током.
4. Магнитное поле Земли и возможные причины его возникновения?
5. Поясните работу лабораторной установки и методику расчета составляющих вектора магнитной индукции магнитного поля Земли.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРОМАГНЕТИКА

Цель работы: определение точки Кюри ферромагнетика.

Оборудование: ферромагнитный образец, электрическая печь, соленоид, милливольтметры, термопара.

5.1. Теоретические сведения

Все вещества, помещенные в магнитное поле, в той или иной степени испытывают его воздействие, проявляющееся в усилении или ослаблении суммарного магнитного поля. Первую попытку объяснить это явление сделал Ампер, предположив наличие в веществе микротоков, обусловленных движением электронов вокруг ядра. Движущийся электрон эквивалентен круговому току с магнитным моментом \vec{p}_m . В дальнейшем Эйнштейн и де Гааз сделали предположение о собственном механическом моменте (спине) и магнитном моменте \vec{p}_{ms} электрона. И тогда полный магнитный момент атома

(молекулы) будет складываться из магнитных моментов, входящих в атом (молекулу) электронов:

$$\vec{P}_a = \sum_i \vec{p}_{im} + \sum_i \vec{p}_{ims}. \quad (5.1)$$

Для количественного описания вводится понятие вектора намагниченности \vec{J} :

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V} = \frac{\sum \vec{P}_a}{V}, \quad (5.2)$$

где $\sum \vec{P}_a$ - векторная сумма магнитных моментов атомов (молекул), содержащихся в объеме V .

В случае внешнего магнитного поля с индукцией \vec{B} в нем появляется свое магнитное поле \vec{B}' , величина которого пропорциональна \vec{J} :

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{J}, \quad (5.3)$$

где μ_0 - магнитная постоянная. Можно показать, что суммарное поле будет равно:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}). \quad (5.4)$$

При этом для не слишком больших полей намагниченность будет определяться выражением: $\vec{J} = \chi \vec{H}$, где χ - магнитная восприимчивость.

Выражение (5.4) может быть записано в виде:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} (1 + \chi) = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (5.5)$$

где $\mu = 1 + \chi$ - магнитная проницаемость материала.

Из формулы (5.5) следует, что результирующее поле в веществе будет зависеть от внешнего магнитного поля в вакууме $\sim \vec{H}$ и магнитной восприимчивости χ .

Для материалов (Ag, Au, Cu...), называемых диамагнетиками $\chi < 0$ - поле, создаваемое микротоками, будет противоположно внешнему полю за счет явления прецессионного движения электронных орбит атомов.

Парамагнетики ($\chi > 0$) имеют малую величину магнитной восприимчивости $\sim 10^{-4}$. Их поле микротоков совпадает с внешним, но имеет незначительную величину.

Ферромагнетики ($\chi \gg 1$) - вещества (Fe, Co, Ni...), обладающие спонтанной намагниченностью в отсутствие магнитного поля, при наличии внешнего поля будут существенно увеличивать результирующее поле. На рис. 6.1 показана зависимость намагниченности \vec{J} для различных магнетиков.

Ферромагнитными свойствами вещество обладает в широком диапазоне температур, вплоть до точки фазового перехода в парамагнитное состояние. Температура перехода в парамагнитную фазу и из парамагнитной фазы вновь ферромагнитное состояние носит название точки Кюри.

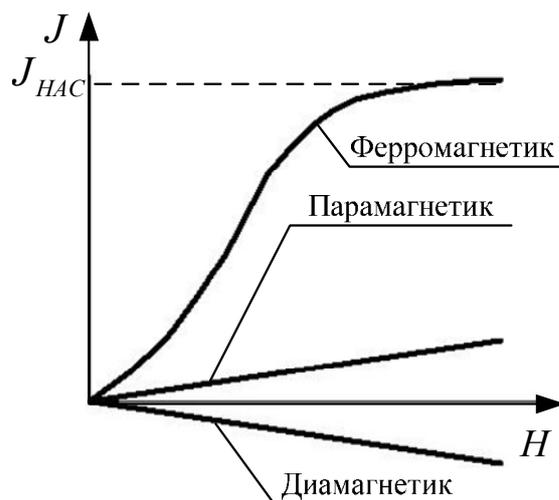


Рис. 5.1. Зависимость вектора намагниченности различных материалов от напряженности внешнего магнитного поля

5.2. Методика измерений

Принципиальная схема установки для определения точки Кюри ферромагнетика приведена на рис. 5.2. В печь 1, содержащую две изолированные друг от друга обмотки 3 и 4, помещается исследуемый образец 2. Печь вместе с образцом нагревается первичной обмоткой 3, по которой пропускается переменный ток. Вторичная обмотка 4, индуктивно связанная с первичной, соединена с милливольтметром 5, измеряющим индуцируемую ЭДС ε_1 . Об изменении магнитных свойств образца, с увеличением температуры, можно судить по изменению индуцируемой во вторичной обмотке ЭДС ε_1 . Температурная зависимость ЭДС ε_1 показана на рис. 5.3. Резкое уменьшение ЭДС ε_1 обусловлено переходом вещества из ферромагнитного состояния в парамагнитное. Температура данного перехода является **точкой Кюри**. Для измерения температуры используется термопара 7, термо ЭДС ε_2 , которой регистрируется милливольтметром 6. Градуировочная прямая $\varepsilon = f(^{\circ}C)$ термопары показана на рис. 5.4.

5.3. Порядок выполнения работы

1. Включите печь, и по мере нагревания образца, через каждые 0,2 мВ, с помощью милливольтметра 6, измерять ЭДС ε_2 термопары, одновременно с этим регистрируйте милливольтметром 5 величину индуцируемой во вторичной катушке ЭДС ε_1 . Результаты измерений занесите в табл. 5.1.

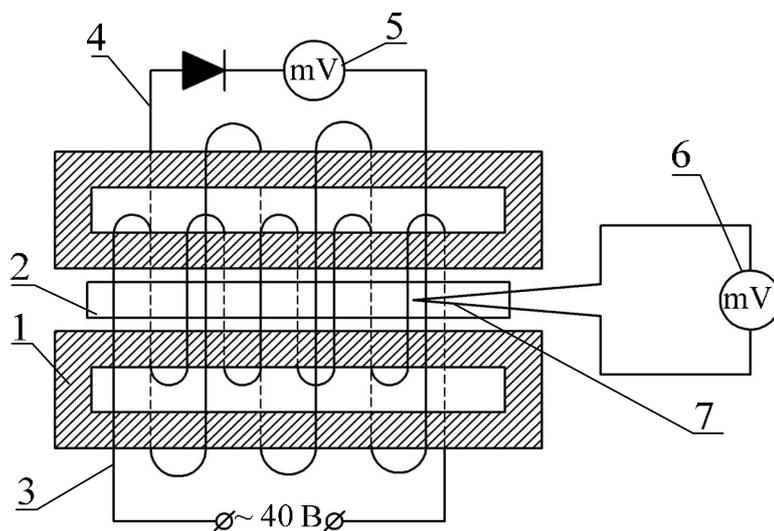


Рис. 5.2. Принципиальная схема установки: 1 – печь; 2 – исследуемый образец; 3 – первичная обмотка; 4 – вторичная обмотка; 5 – милливольтметр; 6 - милливольтметр; 7 – термопара

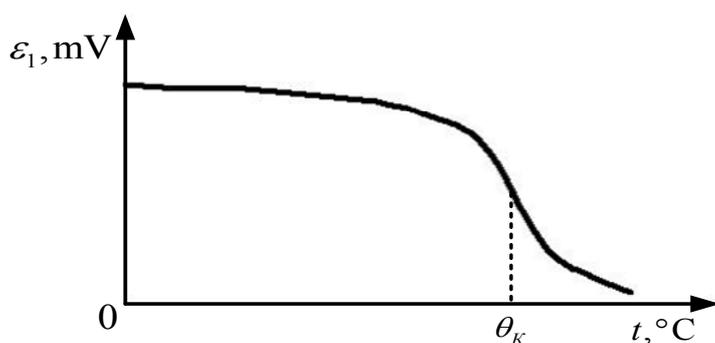


Рис. 5.3 Температурная зависимость ЭДС индукции

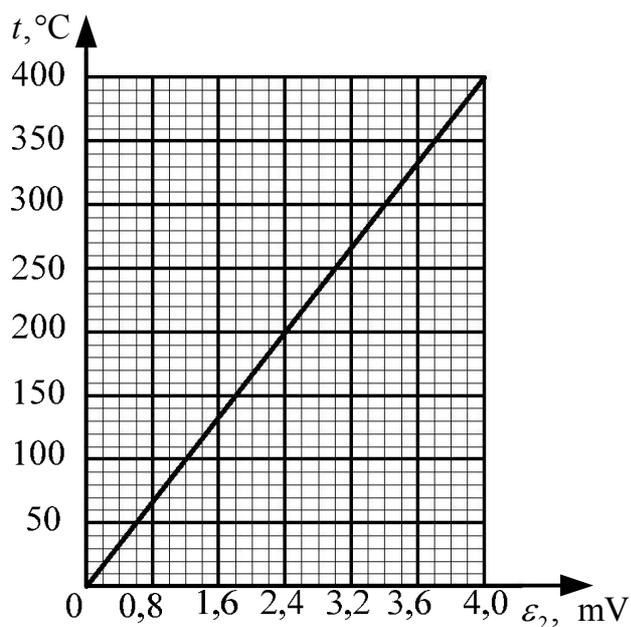


Рис. 5.4. Градуировочный график термопары

Результаты измерений

№	ε_1 , mV	ε_2 , mV	t , °C
1			
2			
...			

2. Зафиксируйте начало резкого уменьшения ε_1 . Снимите несколько последующих ε_1 по мере увеличения температуры.

3. Используя градуировочный график термопары $\varepsilon_2 = f(t^{\circ}C)$, определите температуры, соответствующие значениям ЭДС. Полученные значения занесите в табл. 5.1.

4. Постройте график зависимости $\varepsilon_1 = f(t^{\circ}C)$, используя для этого полученные значения температур.

5. Определите точку Кюри ферромагнетика по формуле:

$$\theta_K = \theta_K'' + t_{КОМ},$$

где θ_K'' - температура, соответствующая точке резкого уменьшения зависимости $\varepsilon_1 = f(t^{\circ}C)$; $t_{КОМ}$ - комнатная температура.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение напряженности магнитного поля. Сформулируйте закон полного тока. Запишите связь между векторами \vec{B} и \vec{H} .

2. Дайте определение ЭДС индукции.

3. Сформулируйте гипотезу Ампера. Опишите процесс намагничивания вещества. Охарактеризуйте вектор намагниченности.

4. Опишите магнитные моменты атомов. Охарактеризуйте поведения атома в магнитном поле.

5. Дайте определения диа-, пара- и ферромагнетиков. Охарактеризуйте кривую намагничивания. Дайте определения точки Кюри. Дайте описание доменной структуры ферромагнетиков.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы: определение условий возникновения колебаний максимальной частоты физического маятника.

Оборудование: физический маятник в виде однородного тонкого стержня длиной 0,61 м с укрепленной на нем, перемещаемой призмой в качестве точки подвеса, электронный секундомер, линейка.

6.1. Теоретические сведения

Физическим маятником называется любое твердое тело, подвешенное в точке, лежащей выше центра тяжести и способное совершать колебания. Рассмотрим колебания физического маятника, изображенного на рис.6.1. При отклонении маятника от положения равновесия на угол α создается вращающий момент, стремящийся вернуть маятник в положение равновесия:

$$M = -mgx \sin \alpha. \quad (6.1)$$

Вращающий момент (6.1) аналогичен квазиупругой силе. Где x - расстояние от точки подвеса O до центра тяжести C . Знак минус в формуле (6.1) показывает, что направление вращающего момента M и отсчета угла α противоположны, m - масса маятника; g - ускорение свободного падения.

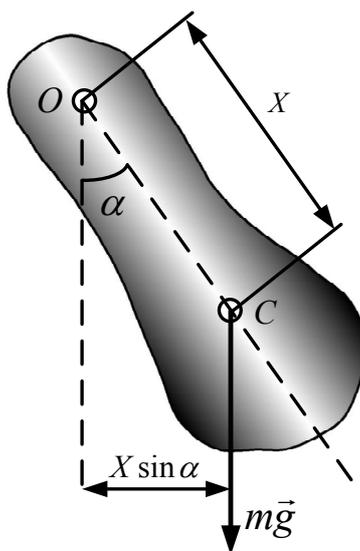


Рис. 6.1. Модель физического маятника

Используя основное уравнение динамики вращательного движения, запишем момент силы M , как произведение момента инерции маятника I на угловое ускорение ε относительно оси вращения:

$$M = I\varepsilon. \quad (6.2)$$

$$M = I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -mgx \sin \alpha. \quad (6.3)$$

Подставляя формулу (6.1) в (6.2) и разделив обе части уравнения на момент инерции, получаем уравнение:

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + mgx \sin \alpha = 0. \quad (6.4)$$

Приняв для малых углов отклонения маятника $\sin \alpha \approx \alpha$, с учетом этого, получаем дифференциальное уравнение свободных незатухающих колебаний физического маятника:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{mgx}{I} \alpha = 0, \quad (6.5)$$

или

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \omega_0^2 \alpha = 0, \quad (6.6)$$

где

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mgx}{I}}. \quad (6.7)$$

Решением дифференциального уравнения (6.6) будет выражение:

$$\alpha(t) = \alpha_m \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (6.8)$$

где α_m - амплитуда колебаний или максимальный угол отклонения маятника от положения равновесия.

Собственная циклическая частота ω_0 колебаний физического маятника и его период колебаний T зависят от его момента инерции I , формы, размеров тела и расстояния от оси вращения до центра масс:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgx}}. \quad (6.9)$$

Подставляя в формулу (6.7) различные моменты инерции тела, можно найти частоту и период колебаний различных физических маятников. Таким образом, физический маятник при малых углах отклонения от положения равновесия будет совершать гармонические колебания.

Циклическая частота колебаний маятника будет определяться расстоянием x и моментом инерции маятника:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \sqrt{\frac{mgx}{I}} \quad (6.10)$$

где x – расстояние от точки подвеса O до центра масс C .

Согласно теореме Штейнера, момент инерции стержня относительно оси, проходящей через точку подвеса, находящейся на расстоянии x от центра масс:

$$I = I_0 + mx^2 = \frac{ml^2}{12} + mx^2, \quad (6.11)$$

где $I_0 = \frac{ml^2}{12}$ - момент инерции стержня относительно оси, проходящей через центр стержня (через середину стержня), l - длина однородного стержня.

Подставив (6.11) в формулу (6.10), получим следующее выражение:

$$\omega = \sqrt{\frac{12gx}{l^2 + 12x^2}}. \quad (6.12)$$

Продифференцировав выражение (6.12) по x и приравняв его нулю, найдем экстремум функции, т.е. условие при котором ω будет максимально:

$$\frac{d\omega}{dx} = 0, \quad \frac{d\omega}{dx} = \frac{\sqrt{3g}(l^2 - 12x^2)}{\sqrt{x(l^2 + 12x^2)}^3} = 0. \quad (6.13)$$

Понятно, что выражение (6.13) будет равно нулю при $l^2 - 12x^2 = 0$, т.е. частота ω максимальна при

$$x = \frac{l}{2\sqrt{3}}. \quad (6.14)$$

6.2. Описание методики измерений

Физический маятник с электронным блоком измерения периода колебаний представлен на рис. 6.2.

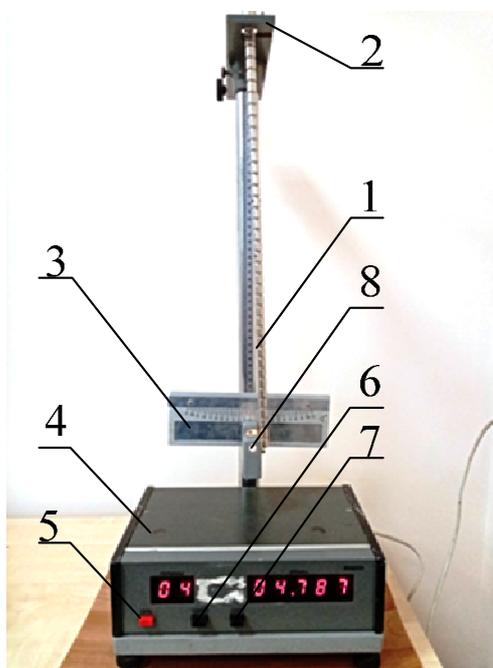


Рис. 6.2. Физический маятник с электронным блоком измерения периода колебаний: 1 - физический маятник; 2 - опорная призма; 3 - шкала угла отклонения маятника; 4 - электронный секундомер; 5 - кнопка «Сеть»; 6 - кнопка «Сброс»; 7 - кнопка «Стоп»; 8 - подвижной блок фотодатчика

В экспериментальной установке используется физический маятник 1 в виде стержня, на котором с помощью фиксирующего винта можно изменять положение опорной призмы 2 - точки подвеса с интервалом 1 см. Маятник подвешивается на горизонтальной стойке, закрепленной на вертикальной штанге. На горизонтальной стойке имеется горизонтальная площадка, на которую опирается опорная призма маятника. Максимальный угол отклонения маятника фиксируется по рамке 3. Электронный секундомер 4 с подвижным блоком фотодатчика 8. На левом табло секундомера фиксируется число периодов, а правом - время колебаний « n » периодов маятника. Электронный секундомер подсчитывает число полных колебаний, совершаемых маятником с момента начала колебаний и их время. Остановка времени счета производится с помощью кнопки 7 «СТОП». Сброс текущих показаний кнопка 6 «СБРОС». При изменении длины маятника блок с фотодатчиком 8 необходимо передвигать таким образом, чтобы маятник оказывался в рабочей зоне фотодатчика.

6.3. Порядок выполнения работы

1. Включите установку кнопкой 5 «СЕТЬ»
2. Установите опорную призму 2 на максимальное расстояние x от свободного конца физического маятника. Измерьте расстояние от точки подвеса до центра масс – красная точка на маятнике. Значение x занесите в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты измерений

Расстояние x до центра масс (м)	Количество колебаний n	Время колебаний t , с	Период колебаний T , с	Циклическая частота ω , c^{-1}

3. При этом стойка подвеса маятника и блок фотодатчика отрегулируйте по высоте таким образом, чтобы маятник свободно совершал колебания, а нижний конец маятника перекрывал луч фотодатчика 8.

4. Отклоните маятник на угол порядка 8° по линейке фотодатчика, предварительно нажав кнопку 6 «СБРОС».

5. Отпустите маятник и проведите измерения времени не менее 10 полных колебаний. Кнопку 7 «СТОП» нажимайте при достижении 9 периодов.

6. Результаты измерений занесите в табл. 6.1.

7. Передвиньте с помощью стопорного винта опорную призму 2 на 1 см ближе к центру масс и повторите пункты 2 - 6.

8. Повторите пункты 2 - 7 не менее 10-12 раз.

9. Рассчитайте период и циклическую частоту колебаний физического

маятника.

10. Постройте график $\omega = f(x)$, найдите максимальную частоту, определите соответствующее ей значение x и сравните его со значение x , полученным по формуле (6.14).

Контрольные вопросы

1. Дайте определение и приведите примеры гармонических осцилляторов.
2. Запишите дифференциальное уравнение и его решение для физического маятника, совершающего гармонические колебания.
3. Сформулируйте понятие приведенной длины физического маятника.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Цель работы: определение скорости звука в воздухе при комнатной температуре.

Оборудование: генератор звуковых колебаний, телефон, акустическая труба с подвижным поршнем, слуховая трубка.

7.1. Теоретические сведения

В звуковой или акустической волне, происходят механические колебания частиц среды с малыми амплитудами. Звуковые волны в жидкостях и газах являются продольными и представляют собой последовательные сгущения и разрежения частиц среды. Уравнение звуковой волны, распространяющейся вдоль направления x будет иметь вид:

$$\xi = A \cos(\omega t - kx), \quad (7.1)$$

где ω - циклическая частота, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число.

Стоячими волнами называются волны, образующиеся при интерференции двух волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами. Две плоские волны, распространяющиеся навстречу друг другу вдоль оси x будут описываться уравнениями:

$$\xi_1 = A \cos(\omega t - kx), \quad \xi_2 = A \cos(\omega t + kx). \quad (7.2)$$

Сложив два уравнения (7.2), получим уравнение стоячей волны:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos kx \cos \omega t = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega t. \quad (7.3)$$

В точках среды, где $\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm m\pi$ (m – целые числа от 0 и до...) будем наблюдать максимальную амплитуду стоячей волны равную $2A$. Такие точки называются пучностями стоячей волны. В точках среды, где $\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm(m + \frac{1}{2})\pi$ (m – целые числа от 0 и до ...) амплитуда волны обращается в нуль. Эти точки носят название узлов стоячей волны.

7.2. Описание установки и метода измерений

Метод определения скорости звука в данной работе основан на свойствах звуковой стоячей волны. Образование стоячей звуковой волны хорошо наблюдается в любой воздушной полости, например, в цилиндрической трубе, закрытой с двух концов. В такой трубе интерферируют прямая волна и отражённая от акустически более плотной среды звуковая волна. Образование стоячих волн тесно связано с явлением резонанса на ограниченных участках сплошной упругой среды. Воздух, заключённый в трубе, можно рассматривать как вибратор, частота собственных колебаний которого может совпадать с частотой источника, и в трубке возникает акустический резонанс. При резонансной частоте колебания плотности воздуха достигают максимальной амплитуды и звучание воздушного столба в трубе максимально.

Как известно, при свободных колебаниях в трубе, закрытой с обоих концов, устанавливается стоячая волна с узлами на концах. Следовательно, резонанс в такой трубе наблюдается тогда, когда на её длине L укладывается целое число полуволен бегущей волны.

Установка, в которой получают стоячие волны, состоит из металлической трубы A , закрытой с одного конца поршнем B , который может перемещаться вдоль трубы. Схема лабораторной установки представлена на рис. 7.1. С другой стороны, труба закрыта телефоном T , подключённым к звуковому генератору (телефон служит излучателем звуковых волн). Положение поршня отсчитывается по шкале. Возникновение резонанса фиксируется непосредственно на слух (при помощи трубки C) по максимальной интенсивности звука, достаточно высокой в этом случае, так как помимо телефона звучит столб воздуха, заключённый в трубке. При перемещении поршня длина столба воздуха между телефоном и поршнем меняется и максимальный звук наблюдается каждый раз, когда на его длине укладывается целое число полуволен. Разность длин трубы для двух последовательных положений максимума равна:

$$\Delta L = L_{n+1} - L_n = \lambda / 2, \quad (7.4)$$

следовательно,

$$\lambda = 2\Delta L, \quad (7.5)$$

а скорость звука ν :

$$v = \lambda \nu = 2\Delta L \nu. \quad (7.6)$$

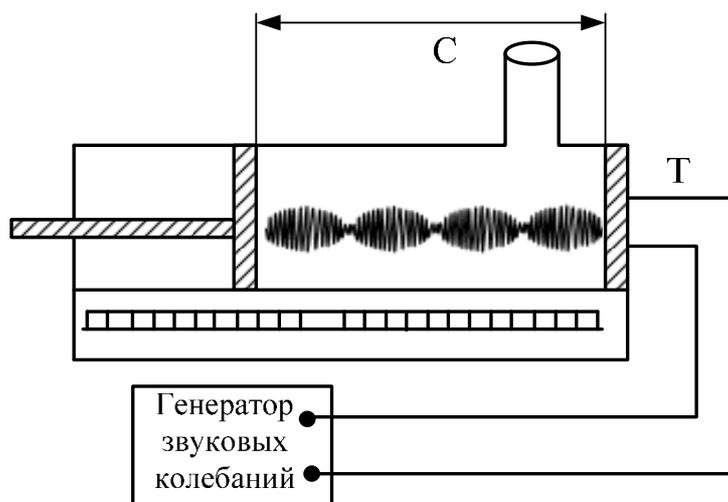


Рис. 7.1. Схема лабораторной установки

Частота колебаний отсчитывается по лимбу звукового генератора. Измерения производятся при $\nu = 1000, 1500, 2000$ Гц. При каждой частоте необходимо сделать не менее трёх измерений длины волны.

7.3. Порядок выполнения работы

1. Включите генератор звуковой частоты и установите лимб на частоту 1000 Гц. Перемещая поршень в трубке, найдите такие его последовательные положения, при которых слышится максимум звука. Измерения L_n для каждого максимума звучания сделайте не менее трёх раз, затем рассчитайте среднее арифметическое ΔL .

2. По разности положений для двух последовательных резонансов определите длину волны по формуле (7.5).

3. Те же измерения проведите на частотах 1500 и 2000 Гц. Данные измерений занесите в табл. 7.1.

4. По полученным данным определите скорость звука при разных частотах и найдите её среднее значение при комнатной температуре.

5. Рассчитайте скорость звука в воздухе при комнатной температуре:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}, \quad (7.7)$$

где $\gamma = 1,4$ - показатель адиабаты воздуха; $\mu = 0,029$ кг/моль – молярная масса воздуха.

6. Оцените в процентах разницу между измеренным и вычисленным значением скорости звука по формуле:

$$\varepsilon = \frac{|v_{cp} - v|}{v} \cdot 100\%. \quad (7.8)$$

Результаты измерений

№ опыта	ν , Гц	L_n , м	L_{n+1} , м	V , м/с	$ V_i - V_{cp} $, м/с
1	1000				
2	1000				
3	1000				
Среднее				$V_{cp} =$	
1	1500				
2	1500				
3	1500				
Среднее				$V_{cp} =$	
1	2000				
2	2000				
3	2000				
Среднее				$V_{cp} =$	

Контрольные вопросы

1. Каковы основные различия между бегущей и стоячей волной?
2. Что представляют собой звуковые волны в жидкостях и газах?
3. Получите выражения для координат узлов и пучностей стоячей волны.
4. При каком условии наблюдается резонанс в акустической трубе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: исследование резонансных кривых тока и напряжения в колебательном контуре, определение добротности контура.

Оборудование: генератор звуковых колебаний, лабораторный модуль, содержащий колебательный контур, электронный вольтметр.

8.1. Теоретические сведения

Для осуществления вынужденных электромагнитных колебаний необходимо в реальный колебательный контур (рис. 8.1), содержащий катушку индуктивности L , конденсатор емкости C и активное сопротивление R , включить последовательно с элементами контура переменную ЭДС, или подать переменное напряжение:

$$U = U_m \cos \omega t. \quad (8.1)$$

Согласно закону Ома для неоднородного участка цепи (рис. 8.1) получим:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_s + \varepsilon(\omega), \quad (8.2)$$

где $\varphi_1 - \varphi_2 = q/C$ – разность потенциалов на обкладках конденсатора; $\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}$ – ЭДС самоиндукции катушки индуктивности.

С учетом того, что $I = \frac{dq}{dt}$, и $\varepsilon_s = -L \frac{d^2q}{dt^2}$ уравнение (8.2) принимает вид:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{U}{L} \cos \omega t, \quad (8.3)$$

где $\beta = R/2L$ – коэффициент затухания, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – частота собственных колебаний контура.

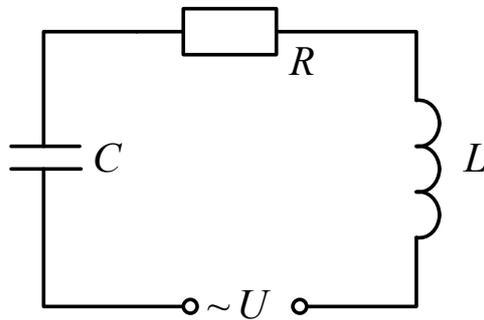


Рис. 8.1. Схема реального колебательного контура

Уравнение (8.3) представляет собой **стандартное дифференциальное уравнение вынужденных электромагнитных колебаний**. При установившихся колебаниях дифференциальное уравнение (8.3) имеет решение:

$$q = q_m \cos(\omega t - \Psi), \quad (8.4)$$

где

$$q_m = \frac{U_m / L}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}, \quad (8.5)$$

$$\operatorname{tg} \Psi = \frac{2\beta \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (8.6)$$

Продифференцировав выражение (8.4) по t , найдем силу тока в контуре при установившихся колебаниях

$$I = -\omega q_m \sin(\omega t - \Psi) = I_m \cos(\omega t - \Psi + \frac{\pi}{2}). \quad (8.7)$$

Запишем это выражение в виде:

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad (8.8)$$

где $\varphi = \Psi - \pi/2$ – есть сдвиг по фазе между током и приложенным напряжением.

Амплитуду силы тока и начальную фазу найдем из формул (8.5) и (8.6):

$$I_m = \omega q_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (8.9)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg}(\psi - \pi / 2) = \frac{\omega L - 1 / \omega C}{R}. \quad (8.10)$$

Разделив выражение (8.4) на емкость, получим напряжение на конденсаторе:

$$U_C = \frac{q_m}{C} \cos(\omega t - \psi) = U_{Cm} \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}), \quad (8.11)$$

где

$$U_{Cm} = \frac{q_m}{C} = \frac{I_m}{\omega C}. \quad (8.12)$$

Умножив производную функции (8.8) на L , получим напряжение на индуктивности:

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = \omega L I_m \sin(\omega t - \varphi) = U_{Lm} \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}), \quad (8.13)$$

где

$$U_{Lm} = \omega L I_m. \quad (8.14)$$

Сопоставление формул (8.8), (8.11) и (8.13) показывает, что напряжение на емкости отстает по фазе от силы тока на $\pi/2$, а напряжение на индуктивности опережает ток на $\pi/2$.

Напряжение на активном сопротивлении изменяется в фазе с током. Фазовые соотношения можно представить очень наглядно с помощью векторной диаграммы (рис. 8.2).

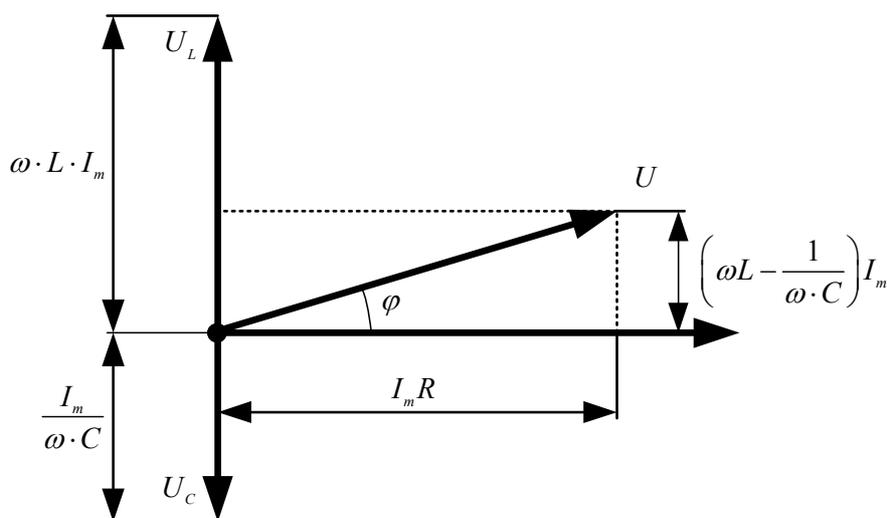


Рис. 8.2. Векторная диаграмма напряжений

Резонансная частота для заряда и напряжения на конденсаторе равна:

$$\omega_{U_{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}. \quad (8.15)$$

Резонансные кривые для напряжения U_c изображены на рис. 8.3.

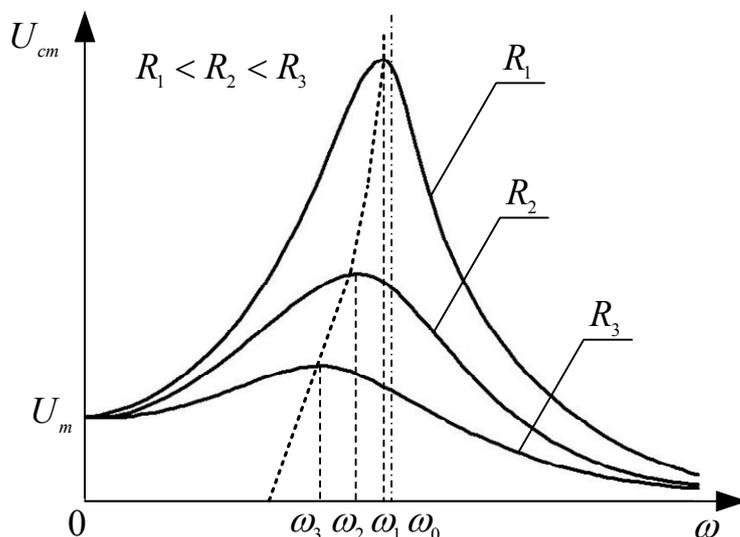


Рис. 8.3. Резонансные кривые для напряжения U_c

При $\omega \rightarrow 0$ резонансные кривые сходятся в одной точке с ординатой $U_{Cm} = U_m$, т.е., в точке, соответствующей напряжению, возникающему на конденсаторе при подключении его к источнику постоянного напряжения U_m .

Максимум при резонансе получается тем выше и острее, чем меньше $\beta = R / 2L$.

Резонансные кривые для силы тока изображены на рис. 8.4. Амплитуда силы тока имеет максимальное значение при $\omega L - 1 / \omega C = 0$. Следовательно, резонансная частота для силы тока совпадает с собственной частотой контура

$$\omega_1 = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (8.16)$$

При $\omega \rightarrow 0$; $I_m = 0$, так как при постоянном напряжении установившийся ток в цепи с конденсатором течь не может.

Резонансные свойства контура характеризует добротность Q , которая показывает, во сколько раз напряжение на конденсаторе может превышать приложенное напряжение, т. е.

$$Q = \frac{U_{C_{рез}}}{U_m}. \quad (8.17)$$

При малых затуханиях $\omega_{рез} \approx \omega_0$ и

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (8.18)$$

Таким образом, добротность обратно пропорциональна активному сопротивлению контура.

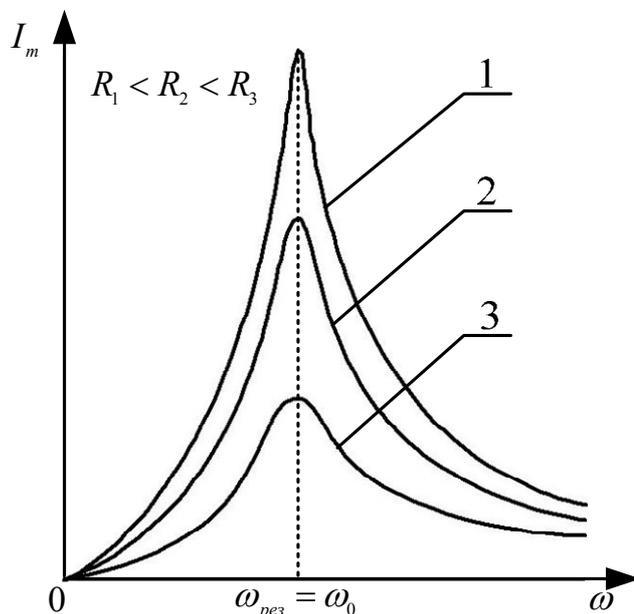


Рис 8.4. Резонансные кривые для силы тока

Добротность контура определяет остроту резонансных кривых. На рис. 8.5 изображена одна из резонансных кривых для силы тока в контуре.

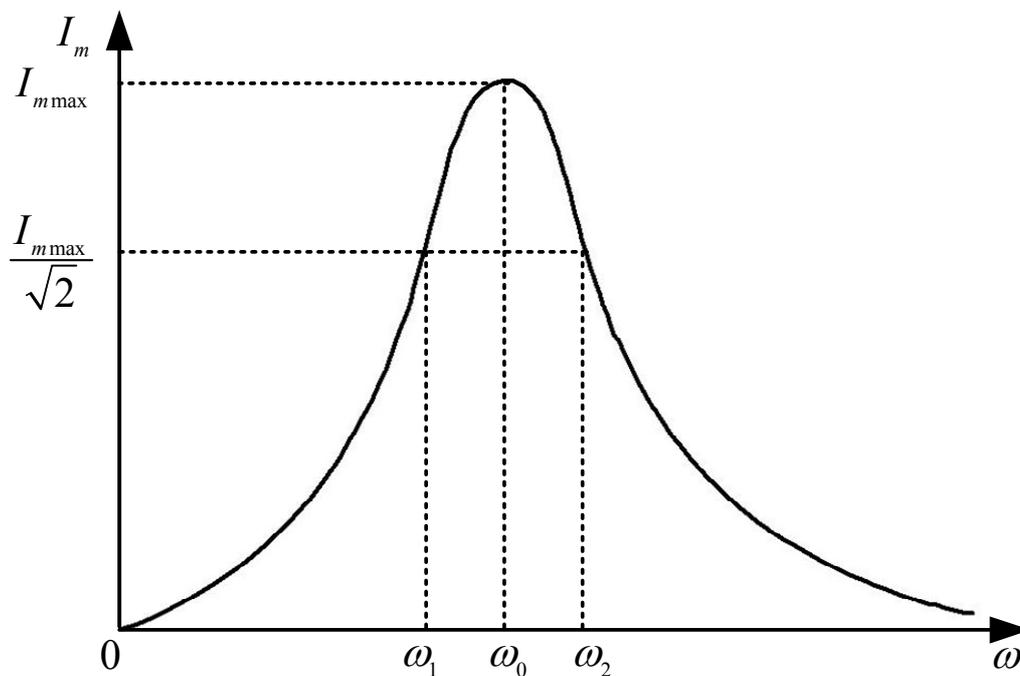


Рис 8.5. Резонансная кривая для силы тока в контуре

Частоты ω_1 и ω_2 соответствуют току $I = I_{\max} / \sqrt{2}$. Относительная ширина резонансной кривой $\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0}$ равна величине обратной добротности контура:

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = \frac{1}{Q}. \quad (8.19)$$

Явление резонанса используют для выделения из сложного напряжения, равного сумме нескольких синусоидальных напряжений, нужной составляющей. Таким образом, осуществляется, например, настройка радиоприёмника на нужную длину волны.

8.2. Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят генератор, лабораторный модуль и электронный вольтметр.

Электрическая схема установки представлена на рис. 8.6.

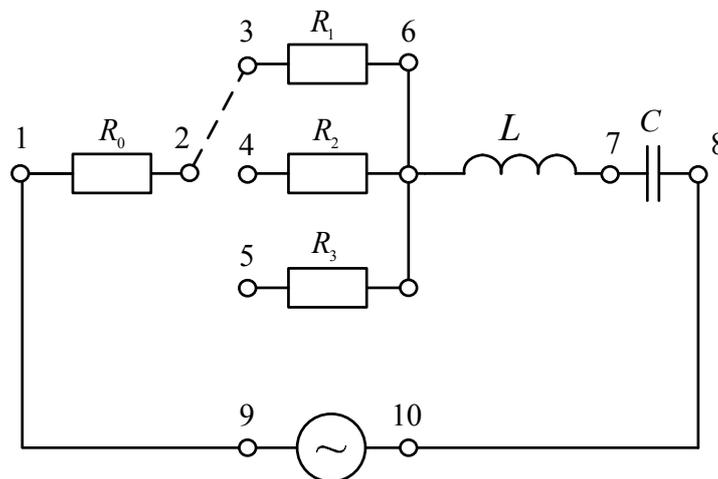


Рис. 8.6. Электрическая схема установки

К гнездам (9-10) на панели модуля подключается генератор гармонических колебаний, а к гнездам (7-8) электронный вольтметр, служащий для измерения напряжения на конденсаторе C , что дает возможность рассчитать ток в цепи по формуле (8.12). Величина добавочного сопротивления может изменяться путем соединения клеммы 2 с клеммами 3, 4 или 5. Общее активное сопротивление контура $R = R_0 + R_d + R_k$, где R_k – омическое сопротивление катушки индуктивности. Значения элементов контура: $R_0 = 10 \text{ Ом}$, $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 100 \text{ Ом}$, $R_3 = 500 \text{ Ом}$, $C = 0,1 \text{ мкФ}$, $L = 1,35 \text{ Гн}$.

8.3. Порядок проведения измерений

1. Подсоедините к гнездам 9-10 генератор гармонических колебаний.

2. Соедините клеммы 2 и 3, в этом случае добавочное сопротивление будет равно 10 Ом.

3. Подсоедините к гнездам 7-8 электронный вольтметр и включите его.

4. Включите генератор гармонических колебаний, установив напряжение не более 10 В и в дальнейшем контролируйте его с помощью вольтметра.

5. Изменяя частоту генератора в пределах от 10 до 200 Гц, снимите зависимость $U_c \sim f(\nu)$, проделав 15-20 измерений. Измерения вблизи резонансной частоты производите с минимально возможным шагом по частоте. Результаты измерений занесите в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Результаты измерений

$R_1 = 10 \text{ Ом}$				$R_2 = 100 \text{ Ом}$				$R_3 = 500 \text{ Ом}$			
ν , Гц	U_R	I , мА	U_C	ν , Гц	U_R	I , мА	U_C	ν , Гц	U_R	I , мА	U_C

6. Соедините клеммы 2 и 4, в этом случае добавочное сопротивление будет равно 100 Ом.

7. Прделайте пункты 4-6 с новым добавочным сопротивлением $R_2 = 100 \text{ Ом}$. Результаты измерений занесите в табл. 8.1.

8. Соедините клеммы 2 и 5, установив добавочное сопротивление 500 Ом.

9. Вновь прделайте пункты 4-6 с новым добавочным сопротивлением R_3 . Результаты занесите в табл. 8.1.

8.4. Обработка результатов измерений

1. По формуле (8.12) рассчитайте значения тока в контуре. Результаты расчетов занесите в табл. 8.1.

2. Постройте графики зависимости $I_1 = f(\nu)$, $I_2 = f(\nu)$ и $I_3 = f(\nu)$ (рис. 8.4), где I_1 - ток в контуре при $R_1 = 10 \text{ Ом}$, а I_2 - ток в контуре при $R_2 = 100 \text{ Ом}$, I_3 - ток в контуре при $R_3 = 500 \text{ Ом}$.

3. Отложите на графике, соответствующем $R_1 = 10 \text{ Ом}$, (рис. 8.5) величину $I_1 = \frac{I_{1\max}}{\sqrt{2}}$ и определите значение частот ν_1 и ν_2 .

4. Рассчитайте добротность контура по формуле $\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = \frac{1}{Q_1^*}$.

5. Используя теоретическое значение величины добротности $Q_2^* = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$

и экспериментальное значение добротности ($Q_1^* = Q_2^*$), определите сопротивление контура R . Величина емкости составляет $C = 0,1$ мкФ, а индуктивность катушки $L = 1,35$ Гн.

6. Постройте графики зависимости $U_C = f(\nu)$ для случаев $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 100$ Ом и $R_3 = 500$ Ом (аналогично рис. 8.3).

7. Рассчитайте по формуле $\nu_{c_1} = \frac{\sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}}{2\pi}$ значение частоты, при которой напряжение на конденсаторе достигает максимальной величины (при резонансе) и сравнить с частотой ν_{c_1} , полученной экспериментально. При проведении вычислений необходимо принять $\beta = R/2L$.

Контрольные вопросы

1. Какие колебания называются вынужденными? Запишите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение.
2. Что называется резонансом?
3. В чем состоит особенность резонансные кривые при разных активных сопротивлениях контура?
4. Каков физический смысл добротности колебательного контура?
5. Поясните, как рассчитывается по резонансной кривой добротность контура?
6. Как построить векторную диаграмму напряжений по результатам их измерений на элементах контура?
7. Как используется явления резонанса в радиотехнике?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст]: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. - 560 с.
2. Детлаф, А.А. Курс физики [Текст]: учеб. пособие для втузов / А.А. Детлаф, Б. М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст]: в 5 кн.: учеб. пособие для втузов / И.В. Савельев. - М.: АСТ: Астрель, 2005.
4. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов [Текст]: учеб. пособие / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. - М.: Оникс, 2006. – 1056 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ № 1, 2, 3	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛОСКОЙ КАТУШКИ.....	4
Контрольные вопросы.....	9
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2	
ИЗМЕРЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА РАМКИ С ТОКОМ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ.....	10
Контрольные вопросы.....	12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА БИО-САВАРА- ЛАПЛАСА ДЛЯ КРУГОВОГО КОНТУРА С ТОКОМ.....	13
Контрольные вопросы.....	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ.....	16
Контрольные вопросы.....	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРОМАГНЕТИКА.....	20
Контрольные вопросы.....	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6	
ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА	24
Контрольные вопросы.....	29
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ.....	29
Контрольные вопросы.....	32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8	
ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ.....	32
Контрольные вопросы.....	39
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	39

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторных работ
по дисциплине «ФИЗИКА»
для студентов всех направлений и специальностей
всех форм обучения

Составители:

Касаткина Татьяна Игоревна
Санников Владимир Геннадьевич
Абрамов Александр Владимирович
Алексеева Елена Валерьевна

В авторской редакции

Подписано к изданию 03.06. 2021.

Объем данных 1,85 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский проспект 14