

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

А. Д. Андреев, В. М. Жуков, С. А. Салль, Л. М. Черных

ФИЗИКА

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ

СПб ГУТ)))

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2017

УДК 537(076)
ББК 22.34я73
Ф 50

Рецензент
профессор кафедры физики СПбГУТ
Л. Н. Савушкин

*Рекомендовано к печати
редакционно-издательским советом СПбГУТ*

Ф 50 Физика. Электромагнетизм : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ / А. Д. Андреев, В. М. Жуков, С. А. Салль, Л. М. Черных ; СПбГУТ. – СПб., 2017. – 39 с.

Написано в соответствии с программой курса общей физики по разделу «Электромагнетизм». Методические указания к каждой лабораторной работе содержат теоретическое введение, описание лабораторной установки и метода измерения, а также задания к работе и контрольные вопросы.

Предназначено для студентов первого курса всех технических специальностей.

УДК 537(076)
ББК 22.33я73

© А. Д. Андреев, В. М. Жуков, С. А. Салль,
Л. М. Черных, 2017

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 4.1

Определение удельного заряда электрона методом отклонения пучка электронов в магнитном поле 4

Лабораторная работа 4.2

Определение удельного заряда электрона методом магнетрона 10

Лабораторная работа 4.3

Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли 16

Лабораторная работа 4.4

Определение взаимной индуктивности двух контуров 23

Лабораторная работа 4.5

Исследование магнитного поля соленоида 30

Список литературы 38

Лабораторная работа 4.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ ОТКЛОНЕНИЯ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Цель работы

Определение удельного заряда электрона (отношение заряда электрона к его массе) методом отклонения луча осциллографа в поперечном магнитном поле.

Введение

На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца [1]:

$$\vec{F} = q[\vec{v} \cdot \vec{B}], \quad (1)$$

где q – заряд частицы, \vec{v} – скорость частицы, \vec{B} – индукция магнитного поля. Направление силы Лоренца зависит от знака заряда и всегда перпендикулярно плоскости, содержащей вектора \vec{v} и \vec{B} . Сила Лоренца по модулю равна:

$$F = |q|vB \sin \alpha, \quad (2)$$

где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Сила Лоренца перпендикулярна вектору скорости. Поэтому работа, равная скалярному произведению силы Лоренца на элементарное перемещение, равна нулю. Следовательно, кинетическая энергия и скорость заряженной частицы при ее движении в магнитном поле остаются постоянными по своей величине. Тангенциальная составляющая ускорения равна нулю. Полное ускорение частицы совпадает с нормальной составляющей ускорения. Таким образом, сила Лоренца изменяет вектор скорости только по направлению. По второму закону Ньютона:

$$a = a_n = \frac{F}{m}, \quad (3)$$

где m – масса движущейся частицы.

При движении частицы в поперечном однородном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции, из соотношений (2) и (3) следует:

$$F = |q|vB \sin \pi/2 = ma_n. \quad (4)$$

В однородном поперечном магнитном поле нормальная составляющая ускорения постоянна по величине:

$$a_n = \frac{|q|}{m}vB = \text{const}. \quad (5)$$

Под действием силы Лоренца, являющейся центростремительной силой, происходит движение заряженной частицы с постоянной по величине скоростью по окружности, радиус которой R можно определить из соотношения:

$$a_n = \frac{v^2}{R}. \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) радиус окружности равен:

$$R = \frac{m v}{|q| B}. \quad (7)$$

Для удельного заряда частицы из формулы (7) следует:

$$\frac{|q|}{m} = \frac{v}{RB}. \quad (8)$$

Таким образом, в рамках настоящей работы, определение удельного заряда частицы по формуле (8) сводится к вычислению индукции магнитного поля, скорости заряженной частицы и радиуса окружности, по которой она движется.

Описание лабораторной установки

В настоящей лабораторной работе используется вакуумная электронно-лучевая трубка, в которой пучок электронов отклоняется магнитным полем соленоида.

Соленоид расположен перпендикулярно к оси электронно-лучевой трубки и пучку электронов. На рис. 1 изображены осциллограф с экраном и, находящиеся слева и справа от электронно-лучевой трубки, две части соленоида, соединенные последовательно с источником постоянного тока.

Амперметр для измерения тока в витках соленоида встроен в корпус источника. Силу тока можно изменять поворотом ручки. Ключ в электрической цепи установки имеет два положения, вверх или вниз, для изменения направления тока в соленоиде.

Измеряя ток I в витках соленоида, можно рассчитать магнитную индукцию по формуле для поля внутри длинного соленоида [2]:

$$B = \alpha \mu \mu_0 n I, \quad (9)$$

где α – коэффициент, учитывающий неоднородность магнитного поля соленоида (указан на рабочем месте); μ – магнитная проницаемость среды; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; n – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида (указано на рабочем месте).

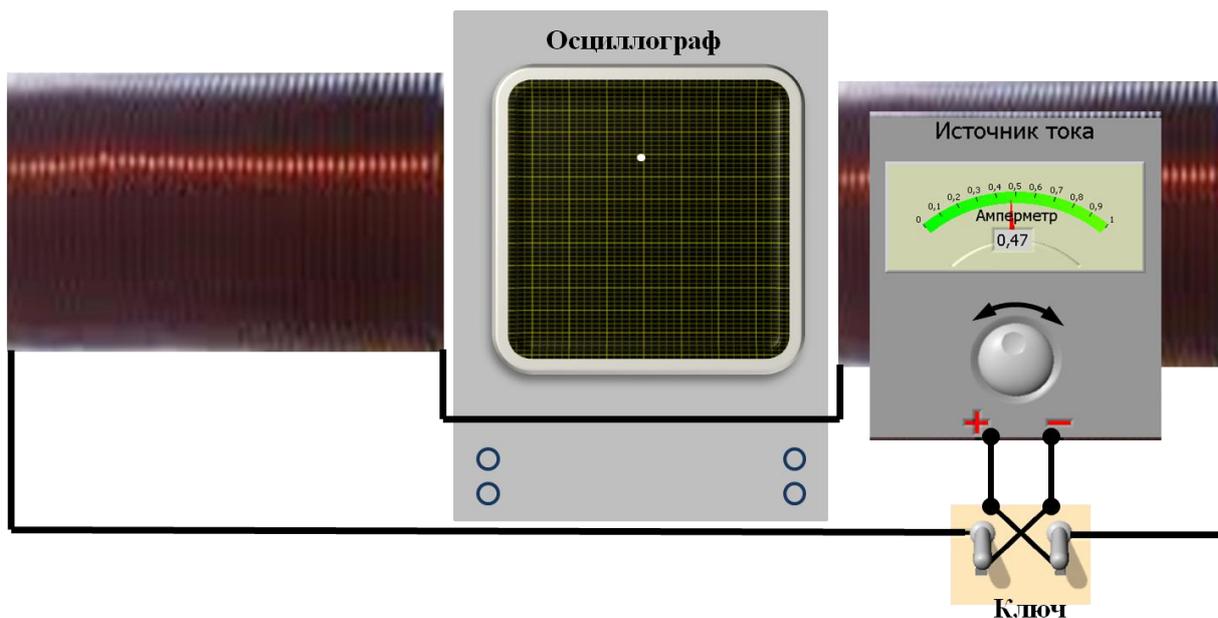


Рис. 1. Вид и схема установки

Источником электронов в электронно-лучевой трубке служит электронная пушка, состоящая из термоэмиссионного катода и ускоряющего анода [3]. Скорость электронов, вышедших из электронной пушки, определяется разностью потенциалов U между катодом и ускоряющим анодом. Кинетическая энергия, приобретаемая электроном, равна работе сил ускоряющего электрического поля. По закону сохранения энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = |q|U. \quad (10)$$

Таким образом, скорость электрона определяется разностью потенциалов между катодом и анодом:

$$v = \sqrt{\frac{2|q|U}{m}}. \quad (11)$$

Значение ускоряющей разности потенциалов U приведено на рабочем месте.

После подстановки полученного выражения для скорости (11) в формулу (8), возведения в квадрат обеих частей равенства и сокращений получим выражение для вычисления удельного заряда электрона в виде:

$$\frac{|q|}{m} = \frac{2U}{R^2 B^2}. \quad (12)$$

Остается определить радиус траектории, по которой движется электрон в магнитном поле.

За пределами электронной пушки электрическое поле отсутствует, поэтому электроны влетают в область поперечного магнитного поля, сохраняя величину своей скорости.

На рис. 2 расстояние b , равное отрезку MN , соответствует области однородного магнитного поля, в котором электроны движутся по дуге окружности до попадания на экран осциллографа в точке N . Точка O , в которую прилетают электроны в отсутствие магнитного поля, соответствует центру экрана. Следовательно, измеряемое расстояние a относительно середины экрана равно отклонению пучка электронов магнитным полем.

Из прямоугольного треугольника MON по теореме Пифагора следует:

$$R^2 = (R - a)^2 + b^2. \quad (13)$$

Отсюда для радиуса траектории движения электрона получим выражение:

$$R = \frac{a^2 + b^2}{2a}. \quad (14)$$

Формулы (9), (14), (12) являются рабочими формулами для расчета магнитной индукции, радиуса траектории и удельного заряда электрона, соответственно.

Порядок выполнения лабораторной работы

В настоящее время данная работа представлена на ПК в виде виртуальной лабораторной работы.

Для выполнения работы ее надо запустить вместе с лаборантом. На экране появится изображение установки аналогичное рис. 1.

1. С помощью источника питания включить ток в цепи соленоида и измерить смещение a_1 пятна на экране осциллографа для трех значений тока, указанных преподавателем.

Таблица 1

2. Изменить направление тока в соленоиде. Наблюдать изменение направления отклонения луча. Повторить измерения a_2 при тех же трех значениях тока.

3. Результаты измерений I , a_1 , a_2

занести в табл. 1 и вычислить среднее значение смещения пятна:

Ед. изм.	I	a_1	a_2	\bar{a}
	А	см	см	см
1				
2				
3				

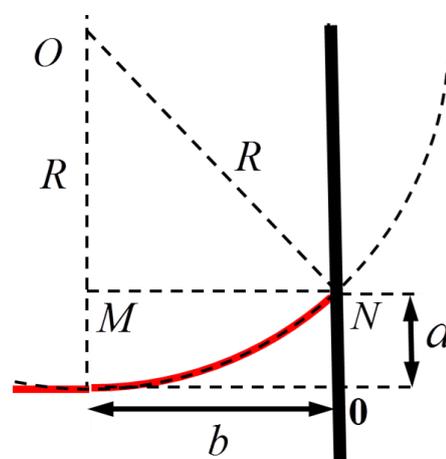


Рис. 2 Траектория электрона в однородном магнитном поле

$$\bar{a} = \frac{|a_1| + |a_2|}{2}. \quad (15)$$

4. Записать приведенные на рабочем месте значения величин α , n , U , b .

Обработка результатов измерений

1. Используя соотношения (9) и (14), вычислить B и R для каждого значения величины силы тока в соленоиде.

2. Используя соотношение (12), вычислить удельный заряд электрона для каждого значения величины силы тока в соленоиде.

3. Результаты вычислений занести в табл. 2.

Таблица 2

Ед.изм.	I	B	R	$ q /m$
	А	Тл	см	Кл/кг
1				
2				
3				

4. В отчете табл. 1 и 2 можно объединить, приведя по одному примеру расчета B , R и $|q|/m$ в системе СИ и сохраняя не более трех значащих цифр в ответе.

5. Если величины a_1 и a_2 для определенного значения тока равны, это означает, что случайная погрешность измерений мала, и в ее оценке достаточно учитывать только систематическую составляющую, ограничившись вычислением относительной погрешности косвенных измерений.

6. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности вычисления B для максимального значения тока в соленоиде:

$$\delta B = \frac{\Delta I}{I}; \quad \Delta B = B \cdot \delta B. \quad (16)$$

Запишите результат с указанием абсолютной погрешности.

7. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности вычисления R , для максимального значения тока в соленоиде по формуле приближенного вычисления:

$$\delta R = \sqrt{(\Delta a/a)^2 + (\Delta b/b)^2}; \quad \Delta R = R \cdot \delta R. \quad (17)$$

Запишите результат с указанием абсолютной погрешности.

8. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности вычисления удельного заряда электрона для максимального значения тока в соленоиде.

$$\delta(|q|/m) = \sqrt{(\Delta U/U)^2 + (2\Delta R/R)^2 + (2\Delta B/B)^2}. \quad (18)$$

Запишите результат с указанием абсолютной погрешности.

Дополнительное задание

1. Какой силы ток нужно пустить через витки соленоида, чтобы электроны не попали на экран осциллографа?
2. При одном из значений силы тока в соленоиде (по указанию преподавателя) определите следующие величины:
 - а) силу Лоренца, действующую на электрон в магнитном поле;
 - б) ускорение электрона при его движении в магнитном поле;
 - в) электрическое поле (по величине и направлению), которое нужно создать, чтобы электроны при прохождении магнитного поля не изменяли направление движения и попадали в центр экрана.

Контрольные вопросы

1. От чего зависит величина и направление силы Лоренца?
2. Почему при движении частицы в магнитном поле вектор скорости заряженной частицы меняется только по направлению, оставаясь неизменным по величине?
3. В каком случае траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле имеет вид окружности?
4. По какой траектории двигается заряженная частица в однородном магнитном поле в общем случае?

Лабораторная работа 4.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Цель работы

Определение удельного заряда электрона (отношения заряда электрона к его массе) методом измерения тока в вакуумном диоде, помещенном в однородное магнитное поле, перпендикулярное радиальному электрическому полю.

Введение

На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца [1]:

$$\vec{F} = q[\vec{v} \cdot \vec{B}], \quad (1)$$

где q – заряд частицы, \vec{v} – скорость частицы, \vec{B} – индукция магнитного поля. Сила Лоренца зависит от знака заряда и перпендикулярна плоскости, содержащей векторы \vec{v} и \vec{B} . Сила Лоренца по модулю равна:

$$F = |q|vB \sin \alpha, \quad (2)$$

где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Работа силы Лоренца, равная ее скалярному произведению на элементарное перемещение, равна нулю. Следовательно, кинетическая энергия и скорость заряженной частицы при ее движении в магнитном поле остаются постоянными по своей величине. Тангенциальная составляющая ускорения равна нулю. Полное ускорение частицы равно нормальной составляющей ускорения. Таким образом, сила Лоренца изменяет вектор скорости только по направлению. По второму закону Ньютона:

$$a = a_n = \frac{F}{m}, \quad (3)$$

где m – масса движущейся частицы.

При движении частицы в поперечном однородном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции, из соотношений (2) и (3) следует:

$$F = |q|vB \sin \frac{\pi}{2} = ma_n. \quad (4)$$

В однородном поперечном магнитном поле нормальная составляющая ускорения постоянна по величине:

$$a_n = \frac{|q|}{m} v B = \text{const} . \quad (5)$$

Под действием силы Лоренца, являющейся центростремительной силой, происходит движение заряженной частицы с постоянной по величине скоростью по окружности, радиус которой R можно определить из соотношения:

$$a_n = \frac{v^2}{R} . \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) радиус окружности равен:

$$R = \frac{m v}{|q| B} . \quad (7)$$

Для удельного заряда частицы из формулы (7) следует:

$$\frac{|q|}{m} = \frac{v}{RB} . \quad (8)$$

Увеличение индукции магнитного поля приводит к уменьшению радиуса кривизны траектории частицы. В стационарном однородном магнитном поле, чем больше скорость электрона, тем больше радиус и меньше кривизна траектории.

Описание лабораторной установки

Главным элементом лабораторной установки является вакуумная двухэлектродная лампа (диод) с такой же конфигурацией электрического и магнитного поля как в магнетроне – электровакуумном приборе, используемом в качестве генератора электромагнитных колебаний сверхвысоких частот [3]. Анод выполнен в виде цилиндра, а катодом служит нить накала, расположенная на его оси (рис. 1). Таким образом, в лампе создается радиальное электрическое поле. Лампа вставлена внутрь соленоида так, чтобы направление нити накала совпадало с осью соленоида, создающего поперечное магнитное поле (рис. 2).

Если в витках соленоида протекает ток I_C , а между катодом и анодом существует ускоряющее напряжение U_A , то внутри цилиндрического анода образуются радиальное электрическое и перпендикулярное ему однородное магнитное поле.

На рис. 2 изображены траектории движения электронов в плоскости, перпендикулярной катоду. При отсутствии магнитного поля ($I_C = 0$) электроны, вылетевшие из катода без начальной скорости, двигались бы в ускоряющем электрическом поле вдоль силовых линий от катода к аноду по траектории 1.

При включении магнитного поля ($I_C \neq 0$) траектория электронов под действием силы Лоренца начинает искривляться. Причем, чем дальше электрон удаляется от катода, тем больше его скорость из-за ускоряющего действия электрического поля и, следовательно, больше радиус кривизны траектории (траектория 2 на рис. 2).

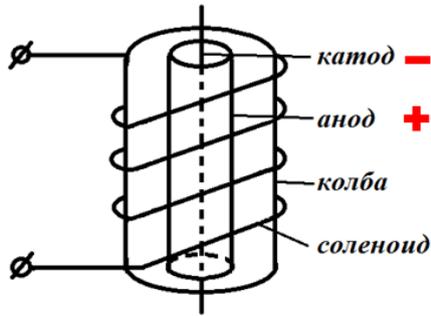


Рис. 1. Устройство магнетрона

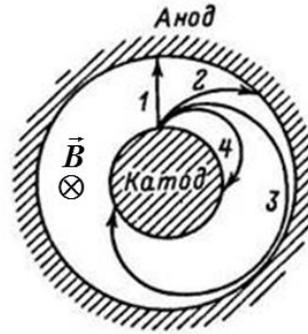


Рис. 2. Траектории электронов в магнитном поле

Увеличение силы тока в соленоиде, т. е. увеличение индукции магнитного поля согласно (7), приводит к уменьшению радиуса кривизны траектории, и при некотором критическом значении индукции магнитного поля (B_{KP}) траектория движения электрона пойдет по касательной к поверхности анода (траектория 3 на рис. 2). Дальнейшее увеличение индукции магнитного поля ($B > B_{KP}$) приводит к исчезновению анодного тока, так как электроны не достигают анода (траектория 4 на рис. 2).

Если допустить, что магнитное поле однородно, электрическое поле является полем цилиндрического конденсатора, а начальная скорость вылетающих с катода электронов равна нулю, то для критического значения магнитной индукции можно получить выражение [3]:

$$B_{KP} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{e/m}} \frac{\sqrt{U_A}}{R_A(1 - R_K^2/R_A^2)}, \quad (8)$$

где R_A – радиус анода, R_K – радиус катода, e/m – удельный заряд электрона. Для лампы, используемой в установке, можно считать, что $R_A \gg R_K$. Тогда из соотношения (8) можно получить выражение для удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \gamma \frac{8U_A}{B_{KP}^2 R_A^2}. \quad (9)$$

Поправочный коэффициент γ учитывает искажения электрического и магнитного полей, которые связаны с отклонением формы анода и катода

от цилиндрической, неоднородностью магнитного поля и другими факторами. Следует отметить также, что значение $B_{кр}$ не изменяется под действием пространственного заряда, образующегося в области катода, и имеет одно и то же значение, как в режиме тока насыщения, так и в режиме пространственного заряда. Величину магнитного поля будем определять по формуле для индукции поля внутри длинного соленоида

$$B = \mu\mu_0 n I_C, \quad (10)$$

где I_C – величина силы тока в витках соленоида, $n = N/l$ – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида, μ_0 – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость среды ($\mu \approx 1$).

На рис. 3 приведена принципиальная электрическая схема установки, содержащая источник постоянного тока

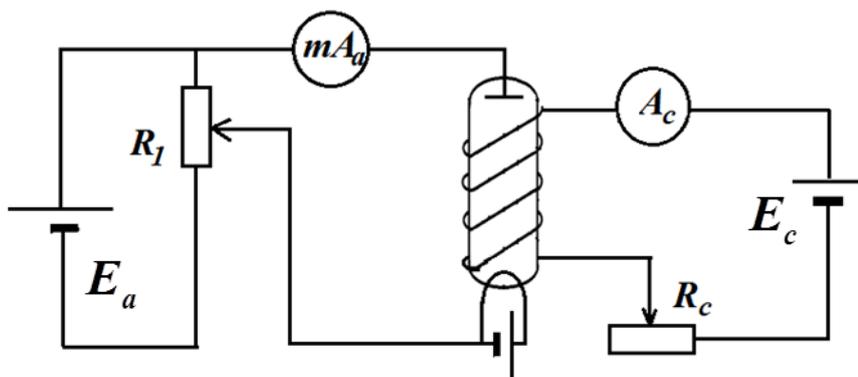


Рис. 3. Электрическая схема установки

E_C , амперметр A_C и потенциометр R_C в цепи питания соленоида; источник постоянного напряжения E_a , миллиамперметр mA_a , и потенциометр R_1 для регулировки анодного напряжения.

На рис. 4 изображена ожидаемая зависимость величины анодного тока I_a от величины тока в соленоиде I_C . Критическому значению магнитной индукции $B_{кр}$ соответствует критическое значение силы тока $I_{C кр}$, когда происходит уменьшение анодного тока I_a . При этом вместо резкого падения анодного тока наблюдается его постепенное уменьшение, что объясняется, в основном, двумя причинами. Во-первых,

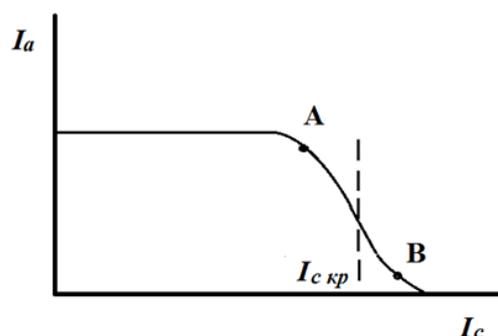


Рис. 4. Определение величины критического значения магнитной индукции

наличием некоторой начальной скорости у электронов, вылетающих с катода, и, во-вторых, искажениями радиальности электрического поля и однородности магнитного. Для определения величины $I_{C\text{ КР}}$ следует взять середину участка графика на рис. 4 между точками A и B , где график имеет наибольшую крутизну.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Собрать схему установки (рис. 3).
2. После проверки схемы установки включить источники напряжения.
3. Установить значение анодного напряжения U_{a1} , указанное на рабочем месте. Снять зависимость $I_a(I_C)$, увеличивая ток в соленоиде I_C с помощью потенциометра R_C . Измерения следует проводить таким образом, чтобы не менее пяти точек оказалось на спадающей части графика (участок AB на рис. 4) зависимости $I_a(I_C)$. Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

№	$U_{a1} =$		$U_{a2} =$		$U_{a3} =$	
	I_C	I_a	I_C	I_a	I_C	I_a
1.						
2.						
3.						
...						

4. Повторить измерения п. 3 для других значений анодного напряжения U_{a2} и U_{a3} , указанных на рабочем месте. Результаты измерений занести в табл. 1.

Обработка результатов измерений

1. Для каждого значения анодного напряжения U_a построить график зависимости $I_a(I_C)$ на одном листе миллиметровки.
2. Для каждого из графиков определить критическое значение тока соленоида $I_{C\text{ КР}}$. Оценку погрешности измерения $I_{C\text{ КР}}$ следует определять из графика зависимости $I_a(I_C)$.
3. Используя соотношения (9) и (10), для каждого значения анодного напряжения определить критическое значение магнитной индукции и удельного заряда электрона e/m .
4. Вычислить среднее значение удельного заряда электрона и оценить погрешность результата, исходя из соотношения (9), определенной погрешности измерения $I_{C\text{ КР}}$ и соответствующей ей погрешности $B_{\text{КР}}$.

Дополнительное задание

1. Используя данные работы, вычислите скорости электронов, с которыми они достигают анода, полагая их начальную скорость равной нулю.
2. Вычислите значение напряженности электрического поля на поверхности анода при одном из значений U_a .
3. Оцените максимальный радиус кривизны траектории, по которой двигаются электроны для случая, когда индукция магнитного поля достигает своего критического значения.

Контрольные вопросы

1. По какой траектории движется заряженная частица в однородном электрическом поле?
2. По какой траектории движется заряженная частица в однородном магнитном поле?
3. Что такое критическая величина индукции магнитного поля?
4. Что изменится, если поменять направление тока в витках соленоида?
5. Предложите другие методы измерения величины удельного заряда электрона.

Лабораторная работа 4.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы

Измерение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра.

Введение

Магнитное поле Земли на расстоянии до 19000 км от ее поверхности близко к полю обычного постоянного магнита (рис. 1).

На больших расстояниях магнитное поле Земли несимметрично. Под действием исходящего от Солнца потока плазмы (солнечного ветра) магнитное поле Земли искажается и приобретает «шлейф» в направлении от Солнца, который простирается на сотни тысяч километров, выходя за орбиту Луны.

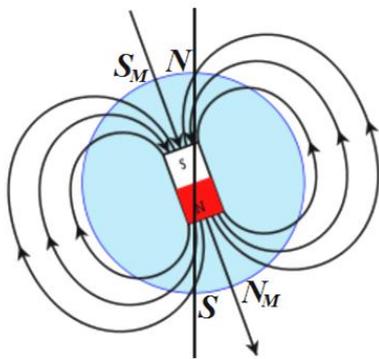


Рис. 1. Магнитные и географические полюса

Магнитные силовые линии сходятся в двух точках на поверхности Земли, которые называются ее магнитными полюсами N_M и S_M . С физической точки зрения северный магнитный полюс N_M находится вблизи южного географического полюса S , поскольку притягивает северный полюс стрелки компаса. И наоборот, южный магнитный полюс находится вблизи северного географического полюса. Положение магнитных полюсов Земли не постоянно, и они смещаются за год на десятки километров [4].

Если подвесить магнитную стрелку так, чтобы точка подвеса совпала с центром тяжести стрелки, то стрелка установится по направлению касательной к силовой линии магнитного поля Земли. Вертикальная плоскость, в которой расположится стрелка, называется плоскостью магнитного меридиана.

Магнитная стрелка компаса, свободно вращающаяся на вертикальной оси в горизонтальной плоскости, отклонена от плоскости географического меридиана на угол, который называют магнитным склонением φ . Магнитное склонение считается положительным, если северный конец магнитной стрелки компаса отклонен к востоку от географического меридиана (рис. 2, а), и отрицательным – если к западу (рис. 2, б).

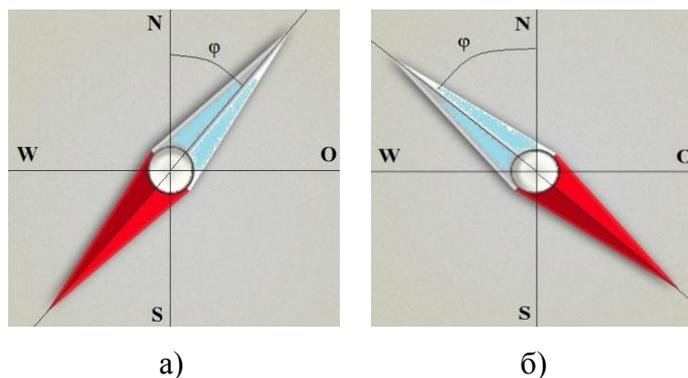


Рис. 2. Магнитное склонение:
а) положительное; б) отрицательное

Магнитным наклонением называют угол i , на который северный конец магнитной стрелки, свободно вращающейся на горизонтальной оси в вертикальной плоскости магнитного меридиана P , под действием магнитного поля Земли отклоняется от горизонтального положения вниз или вверх (рис. 3). Линия пересечения плоскости магнитного меридиана с поверхностью Земли называется магнитным меридианом. Лежащий в плоскости P магнитного меридиана вектор напряженности земного магнитного поля \vec{H} можно разложить на две составляющие: горизонтальную \vec{H}_0 и вертикальную \vec{H}_z (рис. 3).

На магнитном экваторе линии магнитного поля параллельны поверхности Земли, и наклонение равно нулю; на южном магнитном полюсе равно 90° , а в районе Санкт-Петербурга, находящемся на 60-й географической параллели, в начале XXI в. эта величина составляла немногим более 70° .

Величины φ , i и горизонтальная составляющая магнитного поля H_0 (рис. 3) полностью определяют величину и направление магнитного поля Земли в данном месте. Эти три величины, изменяющиеся с течением времени вследствие движения магнитных полюсов, называют элементами земного магнетизма.

Величину напряженности земного магнитного поля в том или ином месте Земли чаще всего характеризуют ее горизонтальной составляющей H_0 , так как ее можно легко измерить.

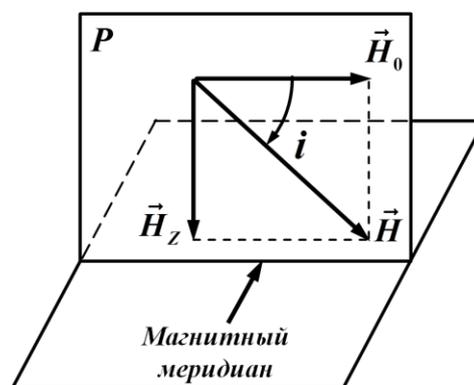


Рис. 3. Составляющие магнитного поля Земли и магнитное наклонение

Описание лабораторной установки

В данной работе для нахождения величины горизонтальной составляющей магнитного поля Земли \vec{H}_0 используется тангенс-гальванометр, состоящий из кругового проводника радиуса R в виде катушки с намотанными плотно друг к другу витками провода (N – число витков) и расположенной в вертикальной плоскости. В центре кругового проводника находится магнитная стрелка компаса, вращающаяся относительно вертикальной оси в горизонтальной плоскости. Эту систему называют тангенс-гальванометром.

Круговой проводник тангенс-гальванометра, укрепленный на вращающейся подставке, располагают при помощи компаса в вертикальной плоскости магнитного меридиана. На рис. 4, а изображено сечение катушки горизонтальной плоскостью, когда тока в катушке нет.

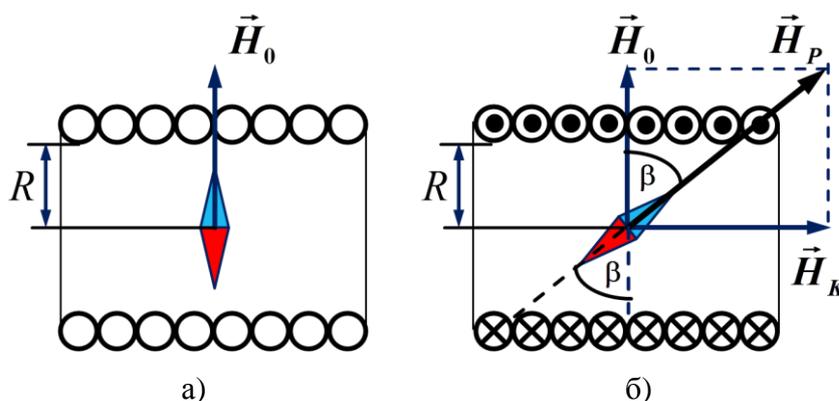


Рис. 4. Стрелка компаса в катушке:
а) без тока; б) с током

Если по катушке пропустить ток I , то возникает магнитное поле кругового тока с напряженностью \vec{H}_K , направленное вдоль оси катушки (рис. 4, б). Таким образом, на стрелку будут действовать два взаимно перпендикулярных магнитных поля: магнитное поле Земли и магнитное поле тока. Магнитная стрелка установится в направлении результирующего вектора напряженности поля \vec{H}_P , созданного круговым током \vec{H}_K и горизонтальной составляющей магнитного поля Земли \vec{H}_0 , которые связаны соотношением:

$$H_K = H_0 \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (1)$$

С другой стороны, напряженность магнитного поля в центре катушки тангенс-гальванометра в системе СИ равна [1], [2], [3]:

$$H_K = IN/2R. \quad (2)$$

Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли, как следует из формул (1) и (2), равна:

$$H_0 = \frac{IN}{2R \cdot \operatorname{tg} \beta} = \frac{N}{2R} \cdot C. \quad (3)$$

Величина

$$C = I / \operatorname{tg} \beta \quad (4)$$

для данного прибора в месте его расположения на Земле называется постоянной тангенс-гальванометра. В таком случае формулу (4) можно переписать в виде

$$I = C \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (5)$$

Отсюда следует, что постоянная C численно равна силе тока в катушке, для которого $\operatorname{tg} \beta = 1$, т. е. $\beta = 45^\circ$.

Таким образом, круговой проводник с магнитной стрелкой в центре может быть использован для измерения силы тока, текущего по цепи (измеряя угол β , определить по формуле (5) силу тока). Отсюда и название прибора – тангенс-гальванометр.

Угол поворота магнитной стрелки определяется по лимбу прибора. Так как формула (3) верна только для точки, находящейся в центре окружности, то используется магнитная стрелка малого размера по сравнению с радиусом витков катушки.

Как следует из выражения (3), относительная погрешность вычисления горизонтальной составляющей магнитного поля Земли равна

$$\delta H_0 = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta\beta}{\sin 2\beta}\right)^2}. \quad (6)$$

Погрешность минимальна, когда $\beta = 45^\circ$. Таким образом, становится ясным, что для более точного определения постоянной тангенс-гальванометра, необходимо подбирать такую силу тока в цепи, чтобы отклонение стрелки было близко к 45° .

Схема установки изображена на рис. 5, и состоит из последовательно соединенных низковольтного источника питания И, резистора R, катушки тангенс-гальванометра, миллиамперметра и ключа К. Двухпозиционный переключатель П служит для изменения направления тока в катушке тангенс-гальванометра.

В данной работе с помощью тангенс-гальванометра решаются две задачи: во-первых, определяется величина горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли (3), во-вторых, производится градуировка шкалы гальванометра (5).

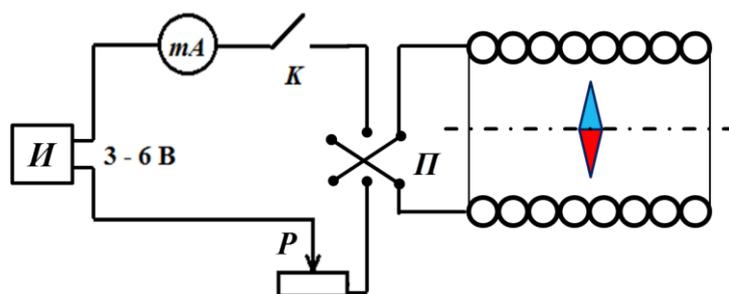


Рис. 5. Схема установки

Порядок выполнения лабораторной работы

Часть 1. Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли

1. Собрать электрическую схему (рис. 5).
2. Установить плоскость рамки катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана. Для этого магнитная стрелка должна оказаться в вертикальной плоскости витков катушки. Зафиксировать рамку катушки в этом положении винтом. Повернуть лимб так, чтобы стрелка указывала на ноль.
3. Включить ток в цепи катушки и установить минимальную величину постоянного тока в витках при помощи резистора P , чтобы отклонение магнитной стрелки составляло около 30° . Записать точное значение β_1 и силы тока I в табл. 1.
4. При той же величине силы тока поменять его направление на противоположное переключателем Π и произвести отсчет угла β_2 . Записать β_2 и среднее арифметическое значений β_1 и β_2 в табл. 1.
5. Увеличивая силу тока, повторить измерения п. 2 и 3 для отклонений магнитной стрелки на 40° , 50° , 60° . Значения β_1 , β_2 для противоположных направлений тока и их средние значения $\bar{\beta}$ записать в табл. 1.

Таблица 1

№	I	β_1	β_2	$\bar{\beta}$
	мА	град	град	град
1				
2				

6. Выключить источник питания.

Часть 2. Градуировка гальванометра

7. Заменить в электрической схеме установки миллиамперметр (рис. 5) на прибор, градуировку которого необходимо произвести. При этом магнитная стрелка должна остаться в вертикальной плоскости витков катушки.

Таблица 2

№	β_1	β_2	$\bar{\beta}$	X
	град	град	град	дел
1				
2				
...				

8. Включить ток в цепи катушки тангенс-гальванометра и установить при помощи резистора R ток, соответствующий максимальному отклонению стрелки гальванометра. Произвести измерения β_1, β_2 для противоположных направлений тока записать в табл. 2 среднее значение $\bar{\beta}$ и соответствующее отклонение стрелки гальванометра X в делениях шкалы.

9. Повторить измерения п. 8 еще для четырех меньших по величине отклонений стрелки гальванометра. Результаты записать в табл. 2.

Обработка результатов измерений

1. Результаты работы по первой части представить в отчете в виде табл. 3, используя для расчета постоянной тангенс-гальванометра выражение (4) и данные табл. 1.

Таблица 3

№	I	$\bar{\beta}$	$tg\beta$	C
	дел	град	–	мА
1				
2				
...				

2. Вычислить среднее значение постоянной C и записать результат с абсолютной погрешностью.

3. Вычислить горизонтальную составляющую магнитного поля Земли, используя соотношение (3).

4. Определить относительную (6) и абсолютную погрешность и окончательно записать результат первой части настоящей лабораторной работы.

5. Результаты работы по второй части представить в отчете в виде табл. 4, используя для расчета силы тока выражение (5) и данные табл. 2.

Таблица 4

№	X	$\bar{\beta}$	$tg\beta$	I
	мА	град	–	мА
1				
2				
...				

6. По результатам табл. 4 построить на миллиметровке градуировочную кривую гальванометра, т. е. зависимость $I(X)$.

Контрольные вопросы

1. Как устанавливается магнитная стрелка в магнитном поле?
2. Как определяется направление напряженности магнитного поля Земли?
3. Определите элементы земного магнетизма.
4. Чему равна напряженность магнитного поля в центре кругового тока?
5. Каков физический смысл постоянной тангенс-гальванометра C ?
6. Почему следует ориентировать катушку тангенс-гальванометра в направлении магнитного меридиана?
7. При каком положении стрелки тангенс-гальванометра систематическая погрешность величины H_0 будет иметь минимальное значение?

Лабораторная работа 4.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ ДВУХ КОНТУРОВ

Цель работы

Исследование зависимости коэффициента взаимной индукции двух связанных контуров от их расположения относительно друг друга, от силы тока и от числа витков в контурах.

Введение

Рассмотрим два контура 1 и 2 (рис. 1), расположенные на достаточно близком расстоянии друг от друга так, что один контур оказывается в области магнитного поля другого. Такие контуры называются связанными.

Поток магнитной индукции через площадь S , ограниченную замкнутым контуром, равен [2]:

$$\Phi = \int_{(S)} B_n dS. \quad (1)$$

Магнитная индукция B , согласно закону Био–Савара–Лапласа, пропорциональна силе тока в проводнике. Если контур состоит из N последовательно соединенных витков, то следует говорить о потокосцеплении $\Psi = N \cdot \Phi$, величине также пропорциональной силе тока. Таким образом, полный магнитный поток, или потокосцепление, создаваемое током I_1 равно:

$$\Psi_1 = L_1 I_1, \quad (2)$$

где L_1 – индуктивность 1-го контура.

Часть потокосцепления Ψ_1 , проходящую через поверхность, ограниченную контуром 2, обозначим как Ψ_{21} . Потокосцепление Ψ_{21} также пропорционально току I_1 :

$$\Psi_{21} = L_{21} I_1. \quad (3)$$

Аналогично, при наличии тока в контуре 2 полный магнитный поток или потокосцепление, создаваемое током I_2 , равно:

$$\Psi_2 = L_2 I_2, \quad (4)$$

где L_2 – индуктивность 2-го контура.

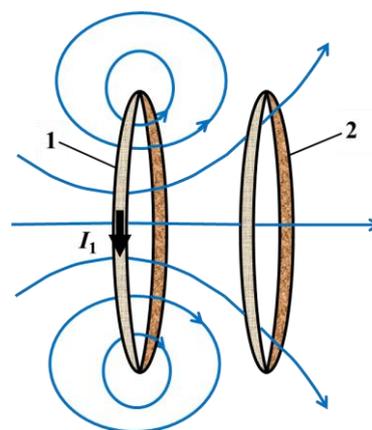


Рис. 1. Два связанных проводящих контура

Часть потокосцепления Ψ_2 , проходящую через поверхность, ограниченную контуром 1, обозначим как Ψ_{12} . Потокосцепление Ψ_{12} пропорционально току I_2 :

$$\Psi_{12} = L_{12}I_2. \quad (5)$$

Коэффициенты пропорциональности L_{21} и L_{12} являются характеристикой системы, состоящей из двух контуров, зависят от их формы, числа витков, взаимного расположения и магнитной проницаемости среды [5]. Для связанных контуров в случае отсутствия ферромагнетиков:

$$L_{12} = L_{21} = M. \quad (6)$$

Коэффициент пропорциональности M между силой тока в одном контуре и потокосцеплением, которое этот ток создает в другом контуре, называется взаимной индуктивностью (коэффициентом взаимной индукции) контуров.

Если потокосцепление контура Ψ изменяется, то в нем возникает электродвижущая сила, равная по величине скорости изменения потокосцепления контура, взятой со знаком минус:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (7)$$

Это равенство выражает закон электромагнитной индукции (закон Фарадея).

Частным случаем явления электромагнитной индукции является взаимная индукция. Она заключается в возникновении электродвижущей силы (э. д. с.) индукции в одном из проводящих контуров при изменении силы тока в другом [1]. Если ток в одном из связанных контуров изменяется, в другом контуре по закону Фарадея возникает э. д. с. взаимной индукции – ε_{i1} в контуре 1 и ε_{i2} в контуре 2, равные скоростям изменения потокосцепления Ψ_{12} и Ψ_{21} соответственно:

$$\varepsilon_{i1} = -\frac{d\Psi_{12}}{dt}; \quad \varepsilon_{i2} = -\frac{d\Psi_{21}}{dt}. \quad (8)$$

Если нет ферромагнетиков, формулы (8) с учетом (3), (5) и (6) для ЭДС взаимной индукции можно переписать в виде:

$$\varepsilon_{i1} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt} = -M \frac{dI_2}{dt}; \quad \varepsilon_{i2} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt} = -M \frac{dI_1}{dt}. \quad (9)$$

Согласно закону Ома индукционный ток I_i , возникающий, например, в контуре 2 из-за изменения тока в контуре 1 равен:

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}, \quad (10)$$

где R – сопротивление контура 2. Заряд, проходящий через поперечное сечение проводника контура 2, связан с индукционным током I_i соотношением:

$$q_i = \int_{t_1}^{t_2} I_i(t) dt. \quad (11)$$

Подставляя в равенство (11) закон Ома (10), затем применяя закон электромагнитной индукции (7), и переходя от переменной t к переменной Ψ , получим:

$$q_i = \frac{1}{R} \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon_i(t) dt = -\frac{1}{R} \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\Psi}{dt} dt = -\frac{1}{R} \int_{\Psi(t_1)}^{\Psi(t_2)} d\Psi, \quad (12)$$

где $\Psi(t_1)$ и $\Psi(t_2)$ – обозначения потокосцеплений, создаваемых током I_1 в моменты времени t_1 и t_2 соответственно. Окончательно выражение для заряда, прошедшего по контуру 2 за промежуток времени от t_1 до t_2 , в процессе электромагнитной индукции, можно записать в виде:

$$q_i = \frac{\Psi(t_1) - \Psi(t_2)}{R}. \quad (13)$$

Таким образом, измерение заряда, протекающего в цепи контура, позволяет определить величину изменения потокосцепления. При включении или выключении цепи одно из потокосцеплений равно нулю. В этом случае измерение заряда позволяет определить величину потокосцепления.

Описание лабораторной установки

В лабораторной работе для измерения заряда применяется баллистический гальванометр, главным свойством которого является прямая пропорциональность между отклонением n светового «зайчика» относительно нуля шкалы гальванометра и величиной заряда в кратковременном импульсе тока, прошедшего по его цепи:

$$q = B_0 \cdot n, \quad (14)$$

где B_0 – баллистическая постоянная гальванометра (приведена на рабочем месте).

Так как ток I_1 в данной лабораторной работе меняется путем его включения или выключения в контуре 1, то возникающая при этом э. д. с. взаимной индукции и вызванный ею индукционный ток I_i в измерительном контуре 2 являются очень кратковременными и выполняется условие применимости формулы (14).

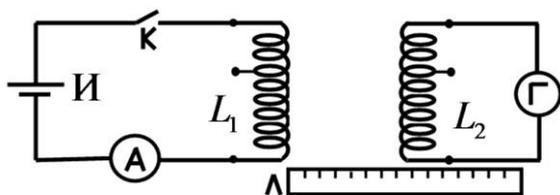


Рис. 2. Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки, показанная на рис. 2, состоит из двух цепей. Первая цепь служит для создания магнитного поля и включает в себя: регулируемый источник постоянного тока И, ключ К для включения и выключения тока, амперметр А для измерения силы тока, и катушку L_1 , создающую магнитное поле.

Вторая цепь служит для регистрации э. д. с. электромагнитной индукции, возникающей в измерительной катушке L_2 , соединенной с баллистическим гальванометром Г.

Взаимная индуктивность контуров зависит от целого ряда факторов – взаимного расположения контуров, числа витков и т. п. Данная установка позволяет исследовать эти закономерности.

Вторая катушка L_2 может перемещаться относительно первой катушки L_1 . Для измерения расстояния между катушками имеется линейка Л. Таким образом можно исследовать зависимость взаимной индуктивности от взаимного расположения катушек.

Для исследования зависимости взаимной индуктивности от числа витков в контурах у катушек L_1 и L_2 имеются соответствующие клеммы с указанием числа витков.

Источник тока И позволяет регулировать ток в цепи. Тем самым можно проверить, действительно ли взаимная индуктивность не зависит от силы тока в контуре.

При выполнении работы обратите внимание, что при включении и выключении тока I_1 световой «зайчик» гальванометра отклоняется в противоположные стороны на шкале. Это связано с тем, что при включении тока I_1 индукционный ток I_i в измерительной цепи имеет одно направление, а при выключении тока – другое направление. Согласно правилу Ленца индукционный ток направлен так, чтобы своим магнитным полем противодействовать изменению магнитного потока через контур, в котором течет этот ток. При включении тока I_1 индукционный ток будет противодействовать нарастанию потокосцепления Ψ_2 в контуре 2, вследствие чего поток нарастает постепенно (рис. 3). При выключении тока I_1 индукционный ток будет препятствовать уменьшению этого потока (рис. 3).

Так как и при включении тока I_1 и при его выключении полное изменение модуля потокосцепления второго контура равно $M \cdot I_1$ (рис. 3), то формула (12) для заряда, прошедшего по этому контуру в обоих случаях примет вид:

$$q_i = \frac{M \cdot I_1}{R_2}, \quad (15)$$

где R_2 – сопротивление цепи второго контура. Если в цепь контура 2 включен гальванометр, то прошедший через гальванометр заряд q вызовет отклонение n «зайчика» гальванометра в соответствии с формулой (14). Приравнивая правые части (14) и (15), и выражая из полученного равенства взаимную индуктивность, получим:

$$M = \frac{B_0 \cdot R_2 \cdot n}{I_1}. \quad (16)$$

Сопротивление R_2 складывается из сопротивления гальванометра R_g и сопротивления самого контура (катушки) R_k :

$$R_2 = R_g + R_k. \quad (17)$$

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, показанную на рис. 2, подключив максимальное число витков катушек, записав значения N_1 и N_2 в табл. 1 и 2.
2. Заполнить таблицу измерительных приборов.
3. Установить световой «зайчик» гальванометра на середину шкалы. Установить минимальное расстояние между катушками $x = 0$ и силу тока I_1 .
4. Замыкая и размыкая ключ К, подобрать значение силы тока I_1 , при котором отклонения светового «зайчика» близки к концам шкалы гальванометра.
5. Записать в табл. 1 значение силы установленного тока I_1 .
6. Замыкая и размыкая ключ К, измерить 5 раз отклонение n «зайчика» баллистического гальванометра и записать в табл. 1 полученные значения.
7. Повторить измерения п. 6 для других 6–7 значений расстояния x между катушками. Расстояния менять примерно через 1 см.

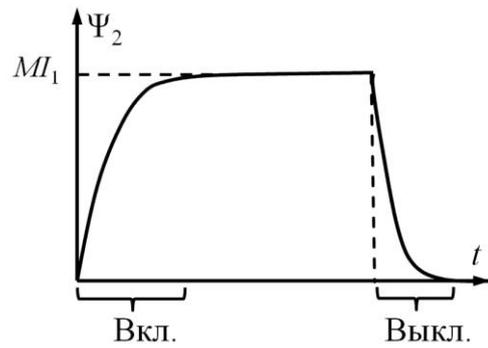


Рис. 3. Изменение магнитного потока в контуре 2 при включении и выключении тока в контуре 1

8. Установить фиксированное значение x расстояния между катушками, например, $x = 1$ см, и определенное значение силы тока I_1 , (например, оставить такое же значение I_1 как в табл. 1). Замыкая и размыкая ключ К, измерить 5 раз отклонение «зайчика» гальванометра и записать в табл. 2 полученные значения.

Таблица 1

$I_1 = , N_1 = , N_2 =$							
$x,$ см	$n,$ делений					$\bar{n},$ делений	$M,$ Гн.
	1	2	3	4	5		
0							
.							
.							
.							

Таблица 2

$x = , N_1 = , N_2 =$							
$I_1,$ мА	$n,$ делений					$\bar{n},$ делений	$M,$ Гн
	1	2	3	4	5		

9. Повторить измерения п. 8 при других трех-четырех значениях силы тока I_1 (меньших). Значения силы тока равномерно распределить по всему интервалу изменения.

10. Установить фиксированные значения x и I_1 (например, взять $x = 1$ см, I_1 взять из табл. 1) и повторить измерения п. 8 при трех значениях числа витков N катушки L_1 или катушки L_2 , записывая отклонения n в табл. 3.

Таблица 3

$x = , I_1 = , N_2$ (или N_1) =							
N_1 (или N_2)	$n,$ делений					$\bar{n},$ делений	$M,$ Гн
	1	2	3	4	5		

11. Записать значения задаваемых величин B_0, R_g, L_2 и значения погрешностей этих величин. Обратите внимание, что величина L_2 зависит от числа витков N_2 катушки L_2 .

12. Подписать результаты измерений у преподавателя.

Обработка результатов измерений

1. Найти средние значения отклонений \bar{n} «зайчика» гальванометра по результатам пяти измерений в табл. 4.1–4.3.

2. По формулам (16) и (17) рассчитать значения взаимной индуктивности M катушек в табл. 4.1–4.3.

3. По результатам этих расчетов построить графики зависимости взаимной индуктивности M от расстояния x между катушками, силы тока I_1 в первой катушке и от числа витков N катушки.

4. Написать в отчете выводы о характере зависимостей $M(x)$, $M(I_1)$, $M(N)$.

5. Привести пример расчета относительной δM и абсолютной ΔM погрешностей взаимной индуктивности для одного из измерений. Записать доверительный интервал $M \pm \Delta M$, выбрав значение доверительной вероятности α (например, взяв $\alpha = 0,7$). Формула погрешности имеет вид:

$$\delta M = \sqrt{\left(\frac{\Delta B_0}{B_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_g}{R_g + R_k}\right)^2 \left(\frac{\Delta R_k}{R_g + R_k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_1}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2}.$$

Контрольные вопросы

1. Что называется взаимной индуктивностью двух контуров?
2. От чего зависит взаимная индуктивность?
3. В каких единицах измеряется взаимная индуктивность?
4. В чем состоит явление электромагнитной индукции?
5. Напишите и сформулируйте закон электромагнитной индукции.
6. Что такое индукционный ток?
7. Какие частные случаи явления электромагнитной индукции вы знаете? В чем они заключаются?
8. Почему происходит отклонение «зайчика» гальванометра?
9. От чего зависит заряд, прошедший по измерительной цепи в данной установке?
10. Что такое баллистическая постоянная гальванометра?
11. Почему отклонения «зайчика» гальванометра при замыкании и размыкании ключа происходят в разные стороны?

Лабораторная работа 4.5

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА

Цель работы

Исследование магнитного поля длинного соленоида и сопоставление экспериментальных результатов с теоретически рассчитанными значениями магнитной индукции на оси соленоида.

Введение

Силовой характеристикой магнитного поля является магнитная индукция \vec{B} . Единицей измерения магнитной индукции в системе СИ является Тесла (Тл). Другая характеристика, напряженность магнитного поля, связана с магнитной индукцией соотношением: $H = \frac{B}{\mu\mu_0}$, где μ – магнитная

проницаемость среды, безразмерная физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе отличается от индукции магнитного поля в вакууме; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная. В системе СИ напряженность измеряется в А/м.

Магнитное поле можно изобразить графически при помощи линий индукции, которые всегда замкнуты. Это линии, касательная к которым в каждой точке совпадает с направлением вектора \vec{B} в этой же точке.

Если величина и направление \vec{B} в каждой точке поля одинаковы, то поле называется однородным. Линии индукции однородного магнитного поля представляют собой параллельные прямые, расположенные на одинаковых расстояниях друг от друга, как в случае с магнитным полем соленоида [1].

Соленоид представляет собой провод, навитый плотно и равномерно, виток к витку, на каркас, имеющий форму цилиндра. Величина индукции магнитного поля бесконечно длинного соленоида, сосредоточенного внутри соленоида, рассчитывается по формуле:

$$B = \mu\mu_0 nI, \quad (1)$$

где n – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида $n = N/l$ (N – число витков на длине l соленоида); I – сила тока, протекающего по виткам соленоида.

Вычислим магнитную индукцию на оси соленоида конечной длины, поле которого существует как внутри, так и вне соленоида.

Ток в соленоиде I идет по винтовой цилиндрической спирали, но если витков много, и они расположены плотно друг к другу, соленоид можно

рассматривать как совокупность колец с током. И для вычисления поля в любой точке на оси соленоида исходить из известной в литературе [2], [3] формулы для магнитной индукции на оси кругового тока:

$$B = \frac{\mu\mu_0 IR^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

где R – радиус витка, а z – расстояние от центра кругового тока до точки, лежащей на его оси.

На рис. 1 изображено сечение соленоида длиной l . В верхних сечениях витков ток направлен к наблюдателю, в нижних сечениях витков – от наблюдателя. В соответствии с законом Био–Савара–Лапласа вектор магнитной индукции \vec{B} направлен на рис. 1 направо. Таким образом, направление вектора индукции магнитного поля связано с направлением тока в соленоиде правилом правого винта.

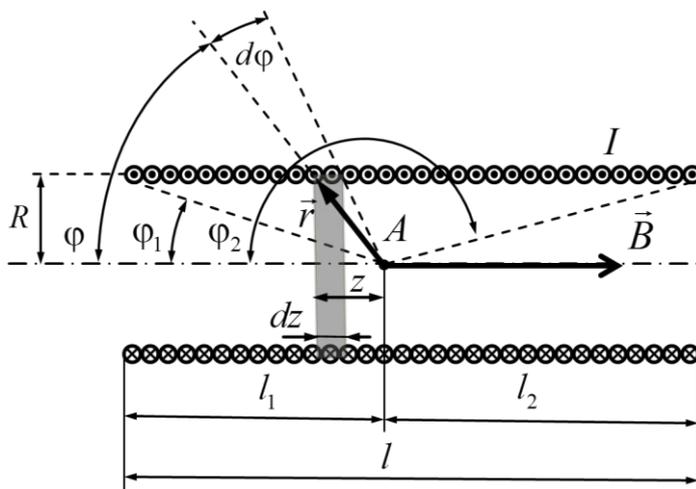


Рис. 1. К вычислению магнитной индукции в точках на оси соленоида

Из всей совокупности колец рассмотрим одно, выделенное на рис. 1 тональной заливкой серого цвета с дифференциально малой шириной dz и радиусом R , по которому течет ток dI :

$$dI = \frac{IN}{l} dz = nI dz, \quad (3)$$

где N – полное число витков соленоида на длине соленоида l .

В рассматриваемой точке A на оси соленоида, расположенной на расстоянии l_1 и l_2 от краев соленоида и отстоящей на расстоянии z от центра кольца, ток dI создает поле, магнитная индукция dB которого в соответствии с (2) и (3) равна:

$$dB = \frac{\mu\mu_0 n I R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} dz. \quad (4)$$

Преобразуем формулу (4) с учетом соотношений, соответствующих обозначениям рис. 1:

$$(R^2 + z^2)^{3/2} = r^3; \quad \frac{R}{r} = \sin \varphi; \quad dz = \frac{rd\varphi}{\sin \varphi}. \quad (5)$$

В результате получаем зависимость dB от положения точки A относительно кольца:

$$dB = \frac{\mu\mu_0 n I}{2} \sin \varphi d\varphi. \quad (6)$$

Осевая симметрия дает основание утверждать, что все $d\vec{B}$ от всей совокупности колец будут иметь одинаковое направление, и по принципу суперпозиции вычисление индукции результирующего поля сводится к интегрированию выражения (6) в пределах от φ_1 до φ_2 (углы между осью соленоида и прямыми, направленными из точки A к его крайним виткам:

$$B = \frac{\mu\mu_0 n I}{2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi = \frac{\mu\mu_0 n I}{2} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2). \quad (7)$$

Для бесконечно длинного соленоида $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \pi$ и формула (7) переходит в формулу (1).

Полученное выражение (7) служит для теоретического расчета зависимости величины магнитной индукции от положения рассматриваемой точки на оси соленоида. Значения косинусов для точек, лежащих на оси внутри соленоида можно определить по формулам:

$$\cos \varphi_1 = + \frac{l_1}{\sqrt{R^2 + l_1^2}}, \quad (8)$$

$$\cos \varphi_2 = - \frac{l_2}{\sqrt{R^2 + l_2^2}}. \quad (9)$$

Если точка A на оси находится вне соленоида справа, то оба угла, φ_1 и φ_2 , будут острыми, и в формуле (9) знак «минус» надо заменить на «плюс». Если точка A на оси находится вне соленоида слева, то оба угла, φ_1 и φ_2 , будут тупыми и в формуле (8) знак «плюс» надо заменить на «минус».

Для экспериментального исследования магнитной индукции соленоида в данной работе используется явление электромагнитной индукции – при выключении тока в витках соленоида в витках измерительной катушки, находящейся снаружи соленоида на одной оси с ним (рис. 2), возникает ЭДС индукции, величина которой определяется законом Фарадея [5]:

$$\varepsilon_i = -N_K \frac{d\Phi}{dt}, \quad (10)$$

где N_K – число витков измерительной катушки, а Φ – магнитный поток внутри соленоида, величина которого в месте расположения измерительной катушки, из-за ее небольшого размера, можно считать однородным и рассчитывать по формуле:

$$\Phi = B \cdot S, \quad (11)$$

где B – индукция магнитного поля внутри соленоида, S – площадь поперечного сечения соленоида. При этом в цепи измерительной катушки, подключенной к баллистическому гальванометру, возникает индукционный ток I_i , величина которого по закону Ома равна:

$$I_i = \varepsilon_i / R_K, \quad (12)$$

где R_K – суммарное сопротивление цепи измерительной катушки.

За время dt по цепи измерительной катушки, как следует из (10) и (12), проходит заряд

$$dq = I_i dt = -N_K \frac{d\Phi}{R_K}. \quad (13)$$

Весь заряд, проходящий по цепи при выключении тока в соленоиде, т. е., при изменении потока от начальной величины Φ до нуля, как следует из формул (13) и (11), равен

$$q = - \int_{\Phi}^0 N_K \frac{d\Phi}{R_K} = N_K \frac{\Phi}{R_K} = N_K \frac{BS}{R_K} = N_K \frac{B\pi d^2}{R_K 4}, \quad (14)$$

где $d = 2R$ – внутренний диаметр соленоида.

Таким образом, экспериментально определить индукцию магнитного поля на оси соленоида можно, измерив каким-либо способом заряд, протекающий в цепи измерительной катушки при выключении тока в соленоиде. Тогда

$$B = \frac{4qR_K}{\pi N_K d^2}. \quad (15)$$

Описание лабораторной установки

На рис. 2 приведена принципиальная схема экспериментальной установки с обозначениями: 1 – соленоид; 2 – измерительная катушка, перемещающаяся вдоль оси соленоида; 3 – линейка со шкалой для определения положения измерительной катушки относительно середины соленоида ($x_{Л}$ – слева от 0, $x_{П}$ – справа от 0); 4 – источник питания постоянного тока I_1 ; 5 – амперметр А, измеряющий силу тока в цепи соленоида; 6 – ключ; 7 – баллистический гальванометр Γ для измерения протекающего заряда; 8 – источник питания лампочки подсветки в баллистическом гальванометре I_2 .

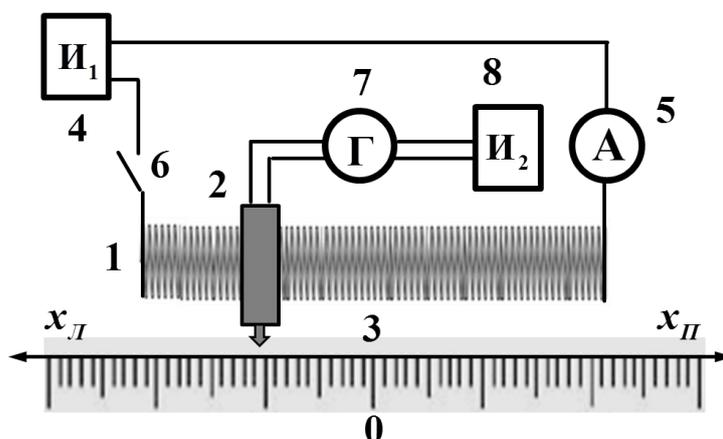


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Кратковременный импульс тока, возникающий в цепи баллистического гальванометра при размыкании или замыкании ключа (6), вызывает отброс светового «зайчика» гальванометра n_0 , пропорциональный величине протекшего в измерительной катушке заряда:

$$q = b_0 n_0. \quad (16)$$

Баллистическая постоянная гальванометра b_0 измеряется в Кл/дел и численно равна заряду, который вызывает отброс светового «зайчика» на одно деление шкалы.

Из выражений (15) и (16) получаем рабочую формулу для определения индукции магнитного поля соленоида

$$B = \frac{4b_0 n_0 R_K}{\pi d^2 N_K}. \quad (17)$$

Значения всех констант b_0 , R_K , d , N_K даны на рабочем месте.

Порядок выполнения работы

1. Оформить протокол к работе, в котором указать цель работы, привести схему установки, рабочие формулы (7), (8), (9), (17); формулу для расчета относительной погрешности вычисления B по формуле (7) в середине соленоида:

$$\delta B_{\text{теор.}} = \frac{\Delta I}{I}, \quad (18)$$

ограничившись погрешностью измерения силы тока; формулу для расчета относительной погрешности вычисления B по формуле (17), ограничившись погрешностями измерения n_0 и d ,

$$\delta B_{\text{эксп.}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \bar{n}_0}{n_0}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2}. \quad (19)$$

2. Начертить табл. 1 и 2 для записи отклонений светового «зайчика» в зависимости от положения измерительной катушки.

Таблица 1

№	$x_{\text{Л}}, \text{ см}$	$n_0, \text{ дел.}$		
		1	2	3
1	0			
2	3,0			
3	6,0			
...	...			

Таблица 2

№	$x_{\text{П}}, \text{ см}$	$n_0, \text{ дел.}$		
		1	2	3
1	0			
2	3,0			
3	6,0			
...	...			

3. После получения допуска к выполнению работы записать в протокол значения l , N , d , b_0 , N_K , R_K , приведенные на рабочем месте.

4. Собрать схему, изображенную на рис. 2.

5. Замкнув ключ, установить указанную на рабочем месте величину силы тока в соленоиде и записать ее в протокол.

6. Установить измерительную катушку посередине соленоида ($x = 0$), ($l_1 = l_2 = 0,5l$). Разомкнуть ключ и записать в табл. 1 значение n_0 первого отброса светового «зайчика» гальванометра. Повторить еще 2 раза с занесением результатов измерений в табл. 1 и 2.

7. Повторить по 3 раза измерения при других положениях измерительной катушки: в средней левой половине соленоида через каждые 3 см, и сделать 3 измерения через 1 см на левом крае соленоида. Результаты записать в табл. 1.

8. Измерения п. 5 проделать для правой половины соленоида и записать результаты в табл. 2.

9. По согласованию с преподавателем можно ограничиться измерениями для одной из половин соленоида (из соображений симметрии поля слева и справа относительно середины соленоида должны быть одинаковыми).

Обработка результатов измерений

1. При составлении отчета результаты измерений и расчетов представить в виде табл. 3 для левой половины соленоида ($x_{Л}$) и табл. 4 для правой половины соленоида ($x_{П}$) или для одной из них.

2. Рассчитать теоретические значения магнитной индукции, используя соотношения (7), (8), (9). Результаты вычислений записать в табл. 3 и 4.

3. Привести пример расчета $B_{\text{теор.}}$ для значения $x = 0$; вычислить относительную погрешность, используя выражение (18); вычислить абсолютную погрешность и записать результат в стандартном виде с погрешностью.

Таблица 3

$l_1 = 0,5l - x_{Л}, \quad l_2 = 0,5l + x_{Л}$								
$x_{Л}, \text{ см}$	$l_1, \text{ см}$	$l_2, \text{ см}$	$\cos \alpha_1$	$\cos \alpha_2$	$B_{\text{теор.}}, \text{ Тл}$	$\bar{n}_0, \text{ дел.}$	$\Delta \bar{n}_0, \text{ дел.}$	$B_{\text{эксп.}}, \text{ Тл}$
0								
3,0								
6,0								
...								

4. По результатам измерений (табл. 1 и 2) определить и записать в табл. 3 и 4 среднеарифметическое (из трех) значение отброса светового «зайчика» гальванометра \bar{n}_0 и абсолютную погрешность $\Delta \bar{n}_0$, равную среднему отклонению от \bar{n}_0 .

Таблица 4

$l_1 = 0,5l + x_{П}, \quad l_2 = 0,5l - x_{П}$								
$x_{П}, \text{ см}$	$l_1, \text{ см}$	$l_2, \text{ см}$	$\cos \alpha_1$	$\cos \alpha_2$	$B_{\text{теор.}}, \text{ Тл}$	$\bar{n}_0, \text{ дел.}$	$\Delta \bar{n}_0, \text{ дел.}$	$B_{\text{эксп.}}, \text{ Тл}$
0								
3,0								
6,0								
...								

5. Рассчитать экспериментальные значения магнитной индукции, используя рабочую формулу (17) с подстановкой в нее \bar{n}_0 и величин, приведенных на рабочем месте. Результаты вычислений записать в табл. 3 и 4.

6. Привести пример расчета $B_{\text{эксп}}$ для значения $x = 0$; вычислить относительную погрешность, используя выражение (19); вычислить абсолютную погрешность и записать результат в стандартном виде с погрешностью.

7. По данным табл. 3 и 4 построить вместе графики зависимостей $B_{\text{теор}}$ и $B_{\text{эксп}}$ от расстояния x , отсчитанного от середины соленоида.

Контрольные вопросы

1. Какая величина является силовой характеристикой магнитного поля?
2. Что представляет собой соленоид?
3. По какой формуле рассчитывается индукция магнитного поля:
 - а) на оси бесконечно длинного соленоида?
 - б) соленоида конечной длины?
4. Как рассчитывается поток вектора магнитной индукции?
5. Какое явление используется при выполнении данной работы? В чем оно заключается?

Список литературы

1. *Савельев, И. В.* Курс общей физики. Книга 2 / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1998.
2. *Андреев, А. Д.* Физика. Магнетизм : конспект лекций / А. Д. Андреев, Л. М. Черных; СПбГУТ. – СПб, 2009.
3. *Калашников, С. Г.* Электричество : учебник / С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977.
4. *Дьяченко, А. И.* Магнитные полюса Земли / А. И. Дьяченко. – М. : МЦНМО, 2003. – 48 с.
5. *Андреев, А. Д.* Физика. Электромагнетизм: конспект лекций / А. Д. Андреев, Л. М. Черных ; СПбГУТ. – СПб, 2012.

**Андреев Александр Давидович
Жуков Владимир Михайлович
Салль Сергей Альбертович
Черных Леонид Михайлович**

**ФИЗИКА
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

**Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ**

Ответственный редактор
профессор *С. Н. Колгатин*

Редактор *Л. К. Паршина*

План издания 2017 г., п. 125

Подписано к печати 27.11.2017
Объем 2,5 усл.-печ. л. Тираж 16 экз. Заказ 810

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ
191186 СПб., наб. р. Мойки, 61

Отпечатано в СПбГУТ

