



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

Практикум

Лабораторная работа № Э27.
«Определение индукции магнитного поля
соленоида»
по дисциплине

«Физика»

Авторы
Егорова С. И.,
Жданова Т. П.,
Лемешко Г. Ф.,
Лещева О. А.

Ростов-на-Дону, 2019

Аннотация

Методические указания содержат краткое описание рабочей установки и методику определения индукции магнитного поля соленоида. Указания предназначены для студентов инженерных специальностей всех форм обучения в лабораторном практикуме по физике (раздел «Электричество и магнетизм»).

Авторы

д.т.н., профессор кафедры «Физика»
Егорова С.И.,
к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»
Жданова Т.П.,
к.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика»
Лемешко Г.Ф.,
доцент кафедры «Физика» Лещева О.А.



Оглавление

Цель работы:	4
Приборы и принадлежности:	4
Краткая теория	4
Теория метода и описание установки	6
Экспериментальная часть	8
Контрольные вопросы	10
Литература	10

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Измерить индукцию магнитного поля соленоида при различных значениях силы тока, протекающего по соленоиду.
2. Построить график зависимости индукции магнитного поля соленоида от силы тока.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

источник тока, выпрямитель, реостат, амперметр, компас, переключатель направления тока, соленоид с подвешенным внутри постоянным магнитом, секундомер.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Магнитное поле – это форма материи, окружающей движущиеся электрические заряды и намагниченные тела. Силовую характеристику магнитного поля называют индукцией магнитного поля \vec{B} .

Графически магнитное поле принято изображать с помощью линий магнитной индукции. *Линии магнитной индукции (силовые линии магнитного поля)* – воображаемые линии, в каждой точке которой вектор магнитной индукции \vec{B} направлен по касательной.

Линии индукции магнитного поля всегда замкнуты, т. е. не имеют ни начала, ни конца и всегда охватывают проводники с током. Замкнутость линий индукции свидетельствует об отсутствии в природе магнитных зарядов. Поле, силовые линии которого всегда замкнуты, называется *вихревым*. Замкнутость линий магнитной индукции представляет собой фундаментальное свойство магнитного поля: магнитное поле не имеет микроскопических источников. Магнитных зарядов, подобных электрическим, в природе не существует.

Магнитное поле называется *однородным*, если вектор индукции \vec{B} во всех точках поля одинаков по модулю и направлению.

Для магнитного поля справедлив *принцип суперпозиции*: вектор индукции \vec{B} магнитного поля, порождаемого несколькими движущимися зарядами (или токами), равен векторной сумме векторов индукции \vec{B}_i полей, порождаемых каждым зарядом (током) в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i .$$

Закон Био-Савара-Лапласа позволяет определить вектор ин-

дукции магнитного поля $d\vec{B}$, создаваемого элементарным проводником $d\vec{\ell}$ с током I в некоторой произвольной точке:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I [d\vec{\ell}, \vec{r}]}{r^3},$$

где $d\vec{\ell}$ – вектор, численно равный длине $d\ell$ элемента проводника и совпадающий по направлению с током I ; \vec{r} – радиус-вектор, проведенный из элемента проводника $d\ell$ в рассматриваемую точку поля.

Если учесть, что $[[d\vec{\ell}, \vec{r}]] = d\ell \cdot r \cdot \sin \alpha$, то модуль вектора $d\vec{B}$,

т.е. его числовое значение, будет равен:

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{Id\ell \sin \alpha}{r^2}.$$

Сила, с которой магнитное поле действует на элемент проводника $d\vec{\ell}$ с током I , находящегося в магнитном поле, определяется законом Ампера.

Закон Ампера в векторной форме: сила $d\vec{F}_A$, с которой магнитное поле действует на элемент проводника $d\vec{\ell}$ с током I , находящегося в магнитном поле, прямо пропорциональна силе тока I и векторному произведению элемента $d\vec{\ell}$ на магнитную индукцию \vec{B}

$$d\vec{F}_A = I [d\vec{\ell}, \vec{B}].$$

Направление силы Ампера можно определить по *правилу левой руки*: если ладонь левой руки расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в неё, а четыре вытянутых пальца направить по току, то отогнутый большой палец укажет направление силы.

Для прямолинейного проводника длиной ℓ с постоянным током I , помещённого в однородное магнитное поле индукции B , сила Ампера выражается формулой:

$$F_A = BI\ell \sin \alpha,$$

где α – угол между направлением тока и вектором \vec{B} .

Индукция магнитного поля – физическая векторная величина, численно равная силе, действующей в однородном магнитном поле на проводник единичной длины с единичной силой тока, расположенный перпендикулярно линиям индукции :

$$B = \frac{F_A}{I \cdot \ell}.$$

Единицей индукции магнитного поля является тесла:

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

1 Тл – магнитная индукция такого однородного поля, в котором на проводник длиной 1 м с током 1 А , помещённый перпендикулярно магнитным силовым линиям, действует сила 1 Н .

ТЕОРИЯ МЕТОДА И ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В данной работе измерение индукции магнитного поля внутри соленоида проводится с помощью магнитометра, представляющего собой небольшой постоянный магнит (магнитная стрелка), подвешенный на нити (рис.1). Магнитная стрелка, которая может вращаться лишь около вертикальной оси, располагается в центре соленоида, где поле можно считать однородным. Соленоид устанавливается вдоль горизонтальной составляющей вектора магнитной индукции \vec{B} магнитного поля Земли с помощью компаса. В этом положении соленоида магнитная стрелка, следовательно, и вектор магнитного момента \vec{P}_m , будут направлены вдоль его оси.

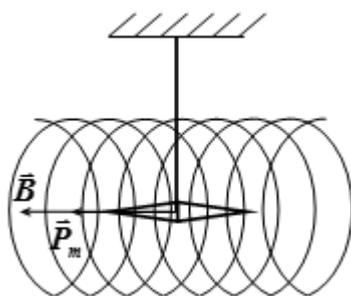


Рис. 1

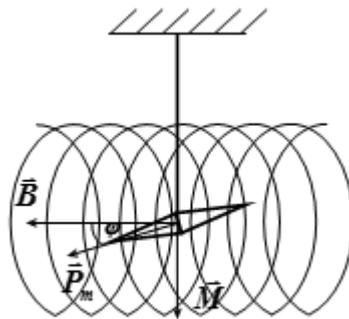


Рис. 2

При отклонении стрелки на небольшой угол φ от положения равновесия (рис. 2) возникает крутящий момент нити (им можно пренебречь) и вращающий момент силы \vec{M} со стороны магнитного поля, под действием которого стрелка будет совершать свободные незатухающие крутильные колебания (сопротивлением воздуха и трением в подвесе пренебрегаем).

Модуль момента силы равен $M = P_m B \sin \varphi$. Учитывая, что при

Физика

малых углах закручивания $\sin \varphi \approx \varphi$, а вектор вращающего момента \vec{M} и вектор углового перемещения $\vec{\varphi}$ направлены в противоположные стороны, можно записать

$$M = -P_m B \varphi \quad (1)$$

где M – вращающий момент, P_m – магнитный момент стрелки, φ – угол поворота стрелки.

Согласно основному уравнению динамики вращательного движения

$$M = J \frac{d^2 \varphi}{dt^2}. \quad (2)$$

Сравнивая (1) и (2), получаем:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -P_m B \varphi, \quad (3)$$

где J – момент инерции магнита. Разделив уравнение (3) на J получаем:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{P_m B}{J} \varphi = 0. \quad (4)$$

Вводим обозначение: $\frac{P_m B}{J} = \omega^2$. Тогда уравнение (4)

примет вид

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \omega^2 \varphi = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) представляет собой дифференциальное уравнение свободных незатухающих колебаний стрелки с частотой

$\omega = \sqrt{\frac{P_m B}{J}}$. Период колебаний $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{P_m B}}$, откуда

$$B = \frac{4\pi^2 J}{T^2 P_m} \quad \text{или} \quad B = \frac{k}{T^2}, \quad (6)$$

где $k = \frac{4\pi^2 J}{P_m}$ – постоянная величина для данного магнитометра.

Согласно принципу суперпозиции индукция результирующего поля равна **векторной** сумме индукций магнитных полей Земли \vec{B}_3 и соленоида \vec{B}_C : $\vec{B} = \vec{B}_C + \vec{B}_3$.

Чтобы исключить влияние магнитного поля Земли на определение величины индукции магнитного поля соленоида, измеряют время n колебаний магнитной стрелки в двух случаях: при одинаковом направлении векторов индукции поля Земли \vec{B}_3 и

соленоида \vec{B}_C и противоположном. Изменения направления вектора \vec{B}_C добиваются переключением направления тока I в соленоиде на противоположное.

В первом случае модуль индукции результирующего поля $B_1 = B_C + B_3$, где $B_1 = k/T_1^2$, а во втором $B_2 = B_C - B_3$, где $B_2 = k/T_2^2$.

Получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} B_C + B_3 = \frac{k}{T_1^2} \\ B_C - B_3 = \frac{k}{T_2^2} \end{cases}.$$

Из системы находим индукцию магнитного поля соленоида:

$$B_C = \frac{k}{2} \left(\frac{1}{T_1^2} + \frac{1}{T_2^2} \right), \quad (7)$$

где k – постоянная величина, указанная на установке, T_1 и T_2 – периоды колебаний магнитной стрелки при противоположных направлениях тока в соленоиде.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Собрать электрическую цепь из соленоида C , амперметра A , реостата R , ключа переключателя \mathcal{L} , выпрямителя, согласно схеме, приведенной на рис.3.
2. Установить соленоид вдоль магнитного поля Земли с помощью компаса.
3. Включить выпрямитель в сеть. Изменяя положение движка реостата R , установить силу тока I в соленоиде от 1А до 5А через 1А, измерить период колебаний T_i для каждого значения силы тока. Для этого необходимо:
 - а) лёгким толчком вывести магнитную стрелку из положения равновесия;
 - б) отсчитать по секундомеру время t_i $n = 10$ полных колебаний стрелки;
 - в) вычислить по формуле $T_i = t_i / n$ период колебаний для

каждого значения силы тока. Результаты занести в таблицу.

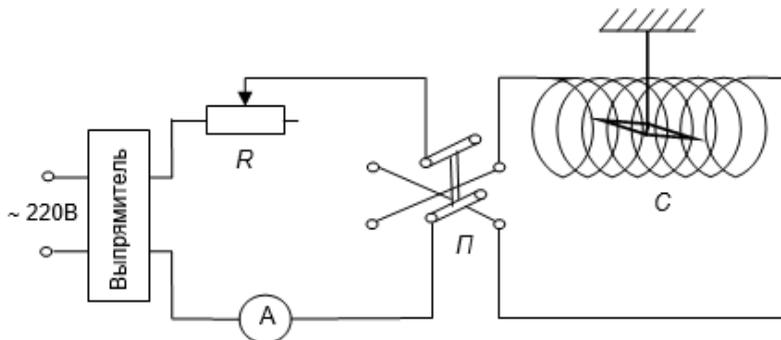


Рис. 3

- Изменить направление силы тока в соленоиде с помощью ключа переключателя Π . При этом магнитная стрелка в соленоиде поменяет свое направление на противоположное.
- Повторить пункт 3 (а, б, в) для определения периода колебаний T_2 . Результаты занести в таблицу.
- По формуле (7) вычислить индукцию магнитного поля соленоида для каждой пары T_1 и T_2 , т.е. при одном и том же значении прямого и обратного тока.
- Построить график зависимости $B = f(I)$.

$n = 10$ Таблица

№/№ п/п	I	t_1	T_1	t_2	T_2	B	δB	ΔB
	A	c	c	c	c	$Tл$	%	$Tл$
1	1							
2	2							
3	3							
4	4							
5	5							

- Рассчитать относительную δB и абсолютную ΔB погрешности для всех измерений по формулам:

$$\delta B = \frac{t_1 \Delta t_1 + t_2 \Delta t_2}{t_1^2 + t_2^2} + 2 \frac{\Delta t_1}{t_1} + 2 \frac{\Delta t_2}{t_2};$$

$$\Delta B = B \cdot \delta B,$$

где $\Delta t_1 = \Delta t_2 = 0,01 c$ - погрешность секундомера.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение индукции магнитного поля. Единица измерения.
2. Как определяется направление вектора \vec{B} ?
3. Принцип суперпозиции магнитных полей.
4. Сформулировать закон Ампера.
5. Как определяется направление силы, действующей на проводник с током?
6. Сформулировать закон Био-Савара-Лапласа.
7. Вывести рабочую формулу индукции магнитного поля на оси соленоида.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т. И. Курс физики.- М.: Высш. шк., 2018
2. Кунаков В.В. Магнетизм: учеб. пособие / В.В. Кунаков, О.А. Лещёва, И.В. Мардасова, О.М. Холодова. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2011.