



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

## **Лабораторная работа Э-26** **«Контур с током в магнитном поле»** по дисциплине

### **«Физика»**

Авторы  
Шкиль Т. В.,  
Мардасова И. В.,  
Беликова Т. С.

Ростов-на-Дону, 2018

## Аннотация

Методические указания содержат краткую теорию по разделу физики «Магнетизм», описание рабочей установки и методику эксперимента.

Методические указания предназначены для студентов инженерных направлений подготовки всех форм обучения, в программу учебного курса которых входит выполнение лабораторных работ по физике (раздел «Электромагнетизм»).

## Авторы

к.ф.-м.н., доцент Шкиль Т. В.,	кафедры	«Физика»
к.ф.-м.н., доцент Мардасова И. В.,	кафедры	«Физика»
к.ф.-м.н., доцент Беликова Т. С.	кафедры	«Физика»





## Оглавление

<b>Лабораторная работа Э-26 .....</b>	<b>4</b>
Контур с током в магнитном поле .....	4

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Э-26

### Контур с током в магнитном поле

**Цель работы:** определение вращающего момента, действующего на контур с током в однородном магнитном поле.

**Приборы и принадлежности:** проводящий контур в виде круглой рамки с тремя витками, катушки Гуельмгольца, крутильные весы, два блока питания, два цифровых мультиметра, соединительные провода.

#### Краткая теория

**Магнитное поле** - форма существования материи, окружающей проводники с током, движущиеся электрические заряды и намагниченные тела.

Магнитное поле изображается графически с помощью магнитных силовых линий. **Магнитными силовыми линиями** называются линии, вдоль которых в магнитном поле располагаются железные опилки или оси маленьких магнитных стрелок. В каждой точке такой линии вектор  $\vec{B}$  направлен по касательной.

Магнитное поле называется однородным, если вектор  $\vec{B}$  в любой точке постоянен.

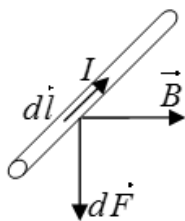


Рис. 1

Силу, с которой магнитное поле действует на проводник с током, определяет **закон Ампера**: сила  $d\vec{F}$ , с которой магнитное поле действует на элемент проводника  $d\vec{l}$  с током  $I$ , находящегося в магнитном поле, прямо пропорциональна силе тока  $I$  и векторному произведению элемента длины  $d\vec{l}$  на магнитную индукцию  $\vec{B}$ :

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}], \quad dF = IBdl \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между направлением тока в проводнике и вектором  $\vec{B}$ .

Направление вектора  $d\vec{F}$ , (рис. 1) может быть найдено согласно общим правилам векторного произведения, откуда следует правило левой руки: если ладонь левой руки расположить так, чтобы магнитные силовые линии входили в нее, а четыре вытянутых пальца направить по току, то отогнутый большой палец покажет направление силы.

Сила, действующая на провод конечной длины, найдется интегрированием по всей длине.

$$F = \int_0^l BI \sin \alpha \cdot dl.$$

Если  $I = const$  и  $B = const$ , то  $F = BIl \sin \alpha$ .

При  $\alpha = 90^\circ$ ,  $F = BIl$ ,

$$B = \frac{F}{I \cdot l}, [B] = 1 \frac{H}{A \cdot m} = 1 Tл.$$

*Индукция магнитного поля* - векторная физическая величина, численно равная силе, действующей в однородном магнитном поле на проводник единичной длины с единичной силой тока, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям.

$1 Tл$  - индукция однородного магнитного поля, в котором на проводник длиной  $1 м$  с током в  $1 A$ , расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям, действует сила  $1 H$ .

Рассмотрим действие магнитного поля на замкнутый проводник с током, который называют *контуром с током*. Контур с током характеризуют его магнитным моментом.

*Магнитный момент контура с током* - это векторная физическая величина, численно равная произведению силы тока на площадь контура.

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}, [p_m] = 1 A \cdot m^2.$$

$1 A \cdot m^2$  - это магнитный момент контура с током силой  $1 A$ , площадь которого равна  $1 m^2$ .

$\vec{n}$  - единичный вектор внешней нормали к поверхности  $S$ , ограниченной контуром с током.

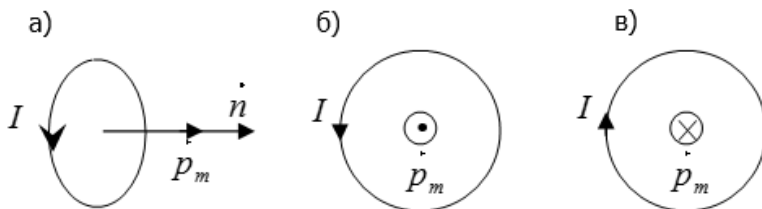


Рис. 2

Внешней (положительной) называется нормаль, которая связана с направлением тока в контуре правилом правого винта

(рис. 2, а). Таким образом, направление  $\vec{P}_m$  определяется правилом правого винта: если рукоятку винта вращать по току в контуре, поступательное движение винта совпадет с направлением  $\vec{P}_m$  (рис. 2, а, б, в).

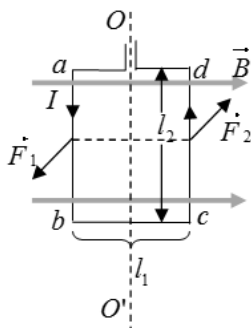


Рис. 3

Поместим в однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  контур в виде прямоугольной рамки с током  $I$  так, чтобы плоскость рамки была параллельна магнитным силовым линиям (рис. 3). При этом на стороны рамки, перпендикулярные силовым линиям ( $ab$  и  $cd$ ), будут действовать силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ , создающие вращающие

моменты сил  $\vec{M}_1$  и  $\vec{M}_2$  относительно закрепленной оси вращения  $OO'$ . Каждый из моментов равен произведению соответствующей силы  $F_1 = F_2 = IBl_2$  на плечо  $\frac{l_1}{2}$ , оба момента вращают рамку в одном направлении, поэтому результирующий вращающий момент, действующий на рамку, равен их сумме:

$$M = M_1 + M_2 = F_1 \frac{l_1}{2} + F_2 \frac{l_1}{2} = \frac{l_1}{2} (IBl_2 + IBl_2) = IBl_1 l_2 = ISB = p_m B,$$

где  $S = l_1 l_2$  – площадь рамки,  $p_m$  – магнитный момент рамки с током.

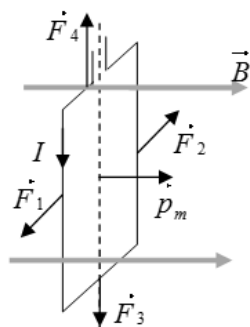


Рис. 4

В векторном виде  $\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}]$ .

$\vec{p}_m$  был в сонаправлен с вектором  $\vec{B}$  внешнего магнитного поля.

Если поле неоднородно, под действием силы незакрепленный контур с током втягивается в область более сильного магнитного поля.

### Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 5.

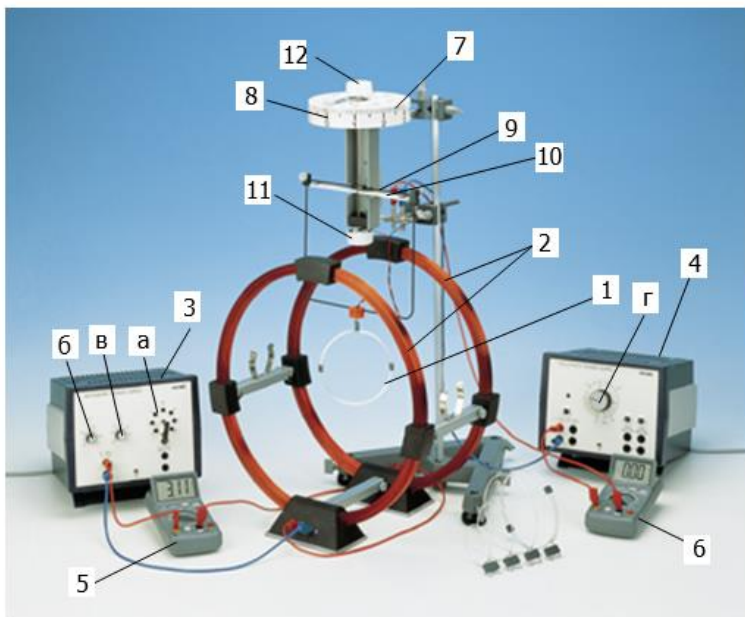


Рис. 5

Контур с током 1 помещается в однородное магнитное поле, создаваемое катушками Гельмгольца 2. Питание катушек и контура осуществляется блоками питания 3 и 4 и контролируется мультиметрами 5 и 6. Ток в катушках Гельмгольца устанавливается с помощью переключателя "POWER" (а) и ручек установки напряжения (б) и тока (в) на блоке питания 3; ток контура – ручкой г блока питания 4. Крутильные весы 7, укрепленные на штативе, позволяют определить вращающий момент сил  $\vec{M}$ , действующий на контур с током в магнитном поле.

Крутильные весы – физический прибор, предназначенный для измерения малых сил или моментов сил. Принцип его действия заключается в следующем: на длинной тонкой проволоке (или упругой нити) подвешен легкий уравновешенный рычаг. Под действием измеряемых сил рычаг начинает поворачиваться в горизонтальной плоскости до тех пор, пока момент этих сил не станет равным моменту сил упругости закручиваемой нити. По углу поворота рычага можно судить о вращающем моменте измеряемых сил.

Шкала отсчета 8 крутильных весов проградуирована в единицах момента силы. При отсутствии вращающего момента «0» указателя шкалы должен соответствовать положению верхней стороны 9 квадратного проволочного подвеса вдоль установочной линейки 10, что можно откорректировать винтом 11. Контур укреплен таким образом, что линии магнитного поля лежат в его плоскости. При пропускании через контур тока под действием вращающего момента  $\vec{M}$  он повернется, закручивая при этом упругую нить. Для определения закручивающего момента контур надо вернуть в начальное положение с помощью винта 12. При этом указатель круговой шкалы покажет  $n$  делений, а экспериментальное определение вращающего момента осуществляется в соответствии с формулой

$$M = kn, \quad (1)$$

где  $k$  - цена деления шкалы.

Следует иметь в виду, что со временем в процессе эксплуатации упругие свойства нити и, следовательно, цена деления шкалы могут изменяться.

Согласно теории, вращающий момент  $\vec{M}$ , действующий на контур с током  $I$  в магнитном поле, зависит от индукции поля  $\vec{B}$  в данной точке и магнитного момента контура  $\vec{p}_m$ :



$$\vec{M}_{\text{теор}} = [\vec{p}_m, \vec{B}], \quad M_{\text{теор}} = p_m B \sin \alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{p}_m$  и  $\vec{B}$ . Индукция магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца, в центре установки рассчитывается по формуле

$$B = cI_k, \quad (3)$$

где  $c = 6,92 \cdot 10^{-4} \text{ Тл/А}$  – постоянная для данной установки величина,

$I_k$  – ток в катушках.

Модуль магнитного момента контура с током  $I$  определяется формулой

$$p_m = mIS = mI \cdot \pi r^2, \quad (4)$$

где  $m$  – число витков контура,  $S$  – площадь контура,  $r$  – радиус витка.

Для небольших токов  $\alpha \approx 90^\circ$ ,  $\sin \alpha \approx 1$  и в соответствии с формулами (2)-(4)

$$M_{\text{теор}} = p_m \cdot B = mI \cdot \pi r^2 \cdot cI_k = c\pi r^2 I \cdot I_k. \quad (5)$$

**Задание 1.** *Определение цены деления крутильных весов*

*k*

1. С помощью винта 11 установить нулевое положение указателя по шкале 8 крутильных весов.
2. Включить блок питания катушек Гельмгольца и соответствующий мультиметр (диапазон измерений 20 А). При этом центр переключателя "POWER" (а) должен быть соединен перемычкой с отметкой «8». Рукояткой (б) на блоке питания установить по указанию преподавателя ток в катушках  $I_k$ .
3. Включить блок питания контура и соответствующий мультиметр (диапазон измерений 20 А). Рукояткой (г) на блоке питания установить ток в контуре  $I = 1,5 \text{ А}$  (величина тока контролируется по мультиметру и в ходе задания 1 не изменяется).

**Таблица 1**

$m = 3, r = 0,06 \text{ м}, c = 6,92 \cdot 10^{-4} \text{ Тл/А}, I = 1,5 \text{ А}$						
№	$I_k, \text{ А}$	$n, \text{ дел}$	$M_{теор}, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	$k, \frac{\text{Н} \cdot \text{ м}}{\text{дел}}$	$\Delta k, \frac{\text{Н} \cdot \text{ м}}{\text{дел}}$	$\mathcal{K}, \%$
1	1					X
2	1,5					
3	2					
4	2,5					
5	3					
Среднее значение						

4. Определить показания  $n$  (в делениях) измерительной круговой шкалы, для чего винт 12 необходимо повернуть до установления верхней горизонтальной стороны 9 проволочного подвеса вдоль установочной линейки 10.
5. Изменяя значения тока в катушках Гельмгольца  $I_k$  с определённым шагом, определять соответствующие значения  $n$ ; результаты занести в табл. 1.
6. Медленно уменьшить силы токов  $I$  и  $I_k$  до нуля.
7. Рассчитать теоретические значения вращающего момента сил:  $M_{теор} = c m \pi r^2 I \cdot I_k$ .
8. Рассчитать значения цены деления  $k = \frac{M_{теор}}{n}$ .
9. Рассчитать и занести в таб. 1:
  - а) среднее значение

$$\langle k \rangle = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 k_i ;$$

- б) абсолютную погрешность каждого измерения

$$\Delta k_i = \left| \langle k \rangle - k_i \right| ;$$

- в) среднюю абсолютную погрешность

$$\langle \Delta k \rangle = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta k_i ;$$

- г) относительную погрешность

$$\mathcal{K} = \frac{\langle \Delta k \rangle}{\langle k \rangle} \cdot 100\% .$$

10. Записать окончательный результат в виде:  
 $k = \langle k \rangle \pm \langle \Delta k \rangle$ .

**Задание 2.** Экспериментальное определение индукции  $B$  однородного магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца.

1. С помощью винта 11 установить нулевое положение указателя шкалы.
2. Рукояткой (б) на блоке питания катушек установить по указанию преподавателя ток в катушках  $I_k = 1,5 \text{ A}$  (в ходе задания 2 величина тока не изменяется).
3. Рукояткой (г) на блоке питания контура установить по указанию преподавателя ток в контуре  $I = 1,5 \text{ A}$ .
4. Определить показания  $n$  (в делениях) измерительной круговой шкалы.
5. Изменяя с определённым шагом значение тока в контуре  $I$ , определять соответствующие значения  $n$ ; результаты занести в табл.2.
6. Медленно уменьшить силы токов  $I$  и  $I_k$  до нуля.
7. Выключить блоки питания.
8. Рассчитать экспериментальные значения вращающего момента сил  $M = \langle k \rangle \cdot n$ .

**Таблица 2**

$m = 3, r = 0,06 \text{ м}, c = 6,92 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Тл}}{\text{А}}, I_k = 1,5 \text{ А}, \langle k \rangle = \frac{H \cdot \text{м}}{\text{дел}}$							
$I, \text{ А}$	$n, \text{ дел}$	$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$P_m, \text{ А} \cdot \text{м}^2$	$M_{\text{теор}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$B, \text{ Тл}$	$\Delta B, \text{ Тл}$	$\delta B$
1							X
1,5							
2							
2,5							
3							
Среднее значение							

9. Рассчитать значения магнитного момента контура с током

$$P_m = mI \cdot \pi r^2.$$

10. Определить значения  $B$

$$B = \frac{M}{p_m}.$$

11. Рассчитать и занести в таблицу 2:

а) среднее значение

$$\langle B \rangle = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 B_i;$$

б) абсолютную погрешность каждого измерения

$$\Delta B_i = |\langle B \rangle - B_i|;$$

в) среднюю абсолютную погрешность

$$\langle \Delta B \rangle = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta B_i;$$

г) относительную погрешность

$$\delta B = \frac{\langle \Delta B \rangle}{\langle B \rangle}.$$

12. Записать окончательный результат в виде:

$$B = \langle B \rangle \pm \langle \Delta B \rangle.$$

13. Рассчитать значение магнитной индукции теоретически в соответствии с формулой (3):

$$B_{теор} = c I_k.$$

14. Сравнить результаты эксперимента и теоретического расчета:

$$\delta B_T = \frac{|B_{теор} - \langle B \rangle|}{B_{теор}} \cdot 100\%.$$

**Задание 3.** Изучение зависимости вращающего момента  $M$  от величины магнитного момента контура,  $M = f(p_m)$ .

1. По данным табл. 2 рассчитать и занести в табл. 2 теоретическое значение вращающего момента

$$M_{теор} = c m \pi r^2 I \cdot I_k.$$

2. Построить в одних координатных осях графики зависимости  $M = f(p_m)$  и  $M_{теор} = f(p_m)$ .

3. Сделать выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что называется магнитным полем?
2. Что называется линией магнитной индукции?
3. Какое магнитное поле называется однородным?
4. Что называется индукцией магнитного поля? В каких единицах она измеряется?
5. Сформулировать закон Ампера.
6. Как определить направление силы Ампера? Ответ пояснить рисунком.
7. Чему равен магнитный момент контура стоком? Как он направлен? Ответ поясните рисунком.
8. Запишите формулу вращающего момента, действующего на контур с током в магнитном поле.