

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

А.В. Новгородская, И.Н. Фетисов

**СИЛЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

*Методические указания  
к выполнению лабораторной работы Э-69  
по курсу общей физики*

Москва

2014

## ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле – силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды, а также на тела, обладающие магнитным моментом [1–4].

Силовое действие проводника с электрическим током на магнитную стрелку обнаружил Эрстед в 1820 г. Тем самым была открыта неизвестная до этого опыта связь между электрическими и магнитными явлениями.

А. Ампер в 1820 г. опытным путем установил законы силового взаимодействия рамок с токами.

В конце XIX в. Х.А. Лоренц обобщением опытных данных получил выражение для силы, действующей на электрический заряд, движущийся в магнитном поле.

Источниками магнитного поля являются намагниченные тела, проводники с током и движущиеся электрически заряженные частицы. Переменное магнитное поле возникает также в переменном электрическом поле. Полное описание электромагнитного поля дают уравнения Максвелла [1–4].

Магнитные силы играют большую роль в космических процессах, и нашли многочисленные практические применения.

*Цель работы* – ознакомление с магнитным полем; в экспериментальной части – измерение силы, действующей на проводник с током в магнитном поле (изучение закона Ампера).

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1. Силовое действие магнитного поля. Магнитная индукция

*Сила, действующая на заряд в магнитном поле.* В магнитном поле на точечный электрический заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $\mathbf{v}$ , действует магнитная сила

$$\mathbf{F}_m = q [\mathbf{v} \mathbf{B}]. \quad (1)$$

Векторная величина  $\mathbf{B}$ , характеризующая магнитное поле в данной точке поля, называется *магнитной индукцией*. Формула (1) справедлива для любой скорости, максимальное значение которой близко скорости света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Вектор  $\mathbf{F}_m$  перпендикулярен плоскости, образованной векторами  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$ , а направление силы для положительного заряда задается правилом правого винта или левой руки (рис.1); для отрицательного заряда направление силы – противоположное.

Модуль магнитной силы

$$F_m = q v B \sin \alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$ .

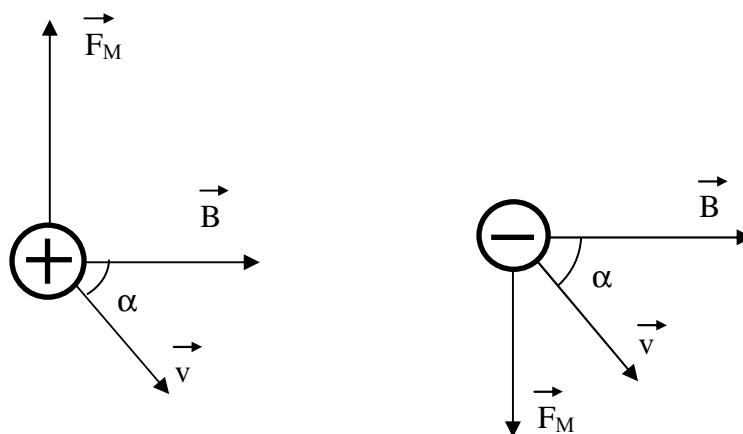


Рис. 1. Направление силы при движении зарядов в магнитном поле.

Магнитная индукция  $\mathbf{B}$  определяется формулой (1). Модуль магнитной индукции

$$B = \frac{F}{qv \sin \alpha}.$$

Единица магнитной индукции – *тесла* (Тл). В поле с индукцией 1 Тл на частицу с зарядом 1 Кл и скоростью 1 м/с действует максимальная (при  $\sin \alpha = 1$ ) сила 1 Н.

Магнитная сила  $\mathbf{F}_M$  (см. формулу (1)) перпендикулярна вектору скорости частицы, поэтому она не совершает работы; под действием силы  $\mathbf{F}_M$  кинетическая энергия частицы не изменяется, а изменяется только направление вектора скорости.

В вакууме в однородном магнитном поле заряженная частица движется в общем случае по спирали, а в частных случаях либо по окружности (когда векторы  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$  перпендикулярны), либо равномерно по прямой вдоль линии магнитной индукции.

В электрическом поле напряженностью  $\mathbf{E}$  на точечный положительный электрический заряд  $q$  действует сила

$$\mathbf{F}_э = q \mathbf{E}. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует определение *напряженности* электрического поля.

В электромагнитных полях движущаяся заряженная частица подвергается воздействию двух сил, одна из которых обусловлена электрическим, а вторая – магнитным полем (формулы (1) и (3)). Результирующая сила, называемая *силой Лоренца*, равна их сумме:

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + [\mathbf{v} \mathbf{B}]). \quad (4)$$

Часто силой Лоренца называют только магнитную составляющую этой силы.

**Сила, действующая на проводник с током.** На прямой отрезок проводника длиной  $\mathbf{l}$ , по которому протекает ток силой  $I$ , в однородном поле магнитной индукции  $\mathbf{B}$  действует *сила Ампера*:

$$\mathbf{F}_A = I [\mathbf{l} \mathbf{B}]. \quad (5)$$

Формула (5) выражает *закон Ампера*. Направление вектора  $\mathbf{l}$  совпадает с направлением тока, за которое принято направление движения положительных зарядов. Направление силы  $\mathbf{F}_A$  такое же, как силы  $\mathbf{F}_m$ , если заменить вектор  $\mathbf{v}$  на вектор  $\mathbf{l}$  (рис.2).

Модуль силы Ампера

$$F_A = I l B \sin \alpha. \quad (6)$$

В формулах (5), (6) мы рассматривали отрезок проводника с током. Если же рассматривать замкнутый проводник с током, то его характеризуют векторной величиной  $\mathbf{p}_m$ , называемой магнитным моментом контура с током. Например, ток силой  $I$  протекает по тонкому проводнику, который лежит в плоскости и ограничивает площадь  $S$  (рис.3). Для такого контура *магнитный момент*

$$\mathbf{p}_m = I S \mathbf{n}.$$

Направление магнитного момента совпадает с направлением единичного вектора  $\mathbf{n}$ , перпендикулярного плоскости контура; направление  $\mathbf{n}$  связано с направлением тока правилом правого винта. Единица магнитного момента – ампер на метр квадратный ( $\text{А}\cdot\text{м}^2$ ).

В однородном поле магнитной индукции  $\mathbf{B}$  на контур с током с магнитным моментом  $\mathbf{p}_m$  действует момент сил

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m \mathbf{B}]. \quad (7)$$

Отметим, что магнитная индукция  $\mathbf{B}$  определяется не только соотношением (1), но и вытекающими из него формулами (5) и (7).

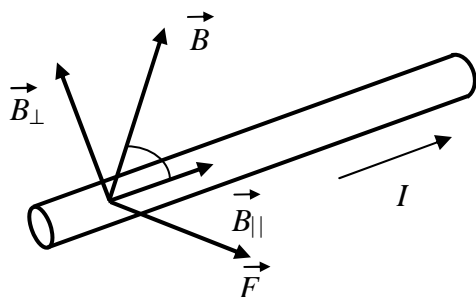


Рис.2. Направление силы Ампера

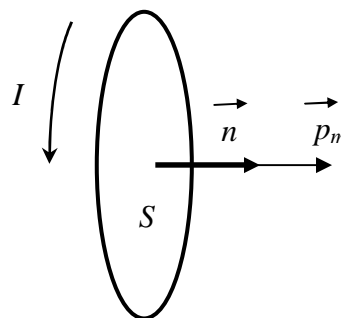


Рис.3. Магнитный момент контура с током.

**Линии магнитной индукции.** Магнитные поля изображают графически *линиями магнитной индукции*, касательные к которым указывают направление вектора  $\mathbf{B}$  в данной точке поля. Линии магнитной индукции – непрерывные, замкнутые. Векторные поля, обладающие замкнутыми линиями, называются *вихревыми* полями. Магнитное поле есть вихревое поле. В этом заключается существенное отличие магнитного поля от электростатического (потенциального), в котором линии напряженности – не замкнуты. Они

начинаются на положительных, а кончаются на отрицательных зарядах или уходят в бесконечность.

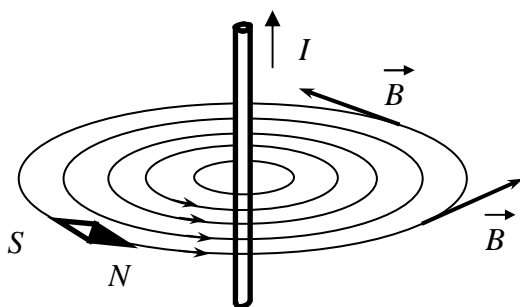


Рис. 4. Линии магнитной индукции прямого тока.

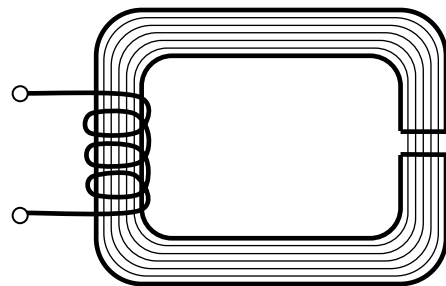


Рис. 5. Линии магнитной индукции электромагнита

Примеры линий магнитной индукции представлены на рис. 4 и 5. На рис.4 показаны линии магнитной индукции в электромагните, состоящем из железного сердечника с воздушным зазором. Магнитное поле создается током в катушке. Железо и другие ферромагнитные материалы применяют для увеличения магнитной индукции и сосредоточения магнитного поля в сердечнике. На рис. 5 показаны линии поля прямого тока, они представляют собой систему охватывающих провод concentрических окружностей, лежащих в плоскостях, перпендикулярных проводнику. Направление вектора  $\mathbf{B}$  и направление тока  $I$  связаны правилом правого винта.

## 2. Взаимная связь сил Ампера и Лоренца

В металлическом проводнике с током  $I$  электроны проводимости с зарядом  $q$  движутся не только хаотически во всех направлениях, но также в определенном направлении с некоторой средней скоростью (скоростью дрейфа)  $u$ . На каждый из этих электронов действует сила Лоренца (см. формулу (2)), которая через взаимодействие электронов с кристаллической решеткой металла передается проводнику в целом. Сумма всех сил от хаотического движения равна нулю, а сумма сил от направленного движения образует силу Ампера (см. формулу (6)).

Получим выражение для силы Ампера, суммируя все силы Лоренца

$$F_m = q u B \sin \alpha,$$

обусловленные направленным движением и действующие на  $N$  электронов проводимости в прямом отрезке проводника длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$ :

$$F_A = Nq u B \sin \alpha.$$

Полное число электронов  $N$  выразим через концентрацию  $n$  электронов проводимости и

объем проводника  $V = lS$ :

$$N = n lS.$$

Плотность тока

$$j = \frac{I}{S}$$

связана со скоростью дрейфа  $u$  соотношением:

$$j = n q u.$$

Объединяя последние четыре формулы, получаем выражение для силы Ампера:

$$F_A = I l B \sin \alpha.$$

### 3. Магнитное поле, создаваемое электрическими токами

Электрический ток создает магнитное поле, методика расчета которого опирается на экспериментально установленные закон Био-Савара и принцип суперпозиции магнитных полей.

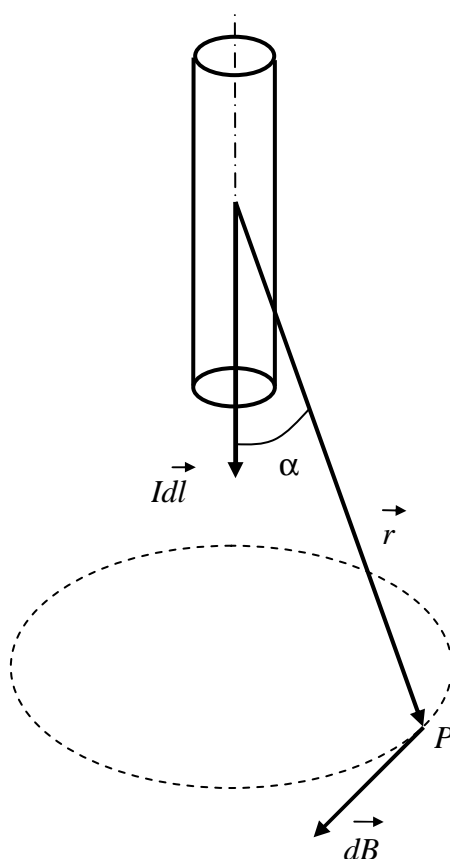


Рис. 6. К расчету магнитной индукции элемента тока

Рассмотрим случай тонкого произвольного проводника в вакууме, по которому протекает ток силой  $I$ . Разобьем провод на малые элементы длины  $d\mathbf{l}$ , направление которых совпадает с направлением тока ( $I d\mathbf{l}$  называют элементом тока). В точке  $P$ , положение

которой относительно элемента тока определяется радиусом-вектором  $\mathbf{r}$  (рис. 6), магнитная индукция  $d\mathbf{B}$  от элемента тока равна (закон Био-Савара в векторной и скалярной формах):

$$\begin{aligned} d\mathbf{B} &= \mu_0 I [d\mathbf{l} \times \mathbf{r}] / (4\pi r^3); \\ dB &= \mu_0 I dl \sin \alpha / (4\pi r^2). \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м (генри на метр),  $\alpha$  – угол между векторами  $d\mathbf{l}$  и  $\mathbf{r}$ .

Согласно *принципу суперпозиции* магнитных полей, полная магнитная индукция  $\mathbf{B}$  в данной точке поля равна векторной сумме полей  $d\mathbf{B}_i$  от всех элементов тока данного и других проводников:

$$\mathbf{B} = \Sigma d\mathbf{B}_i.$$

По данной схеме расчета получены следующие выражения для поля в вакууме, создаваемого током  $I$  в тонких проводниках:

- 1) на расстоянии  $r$  от бесконечно длинного прямого проводника

$$B = \mu_0 I / (2\pi r); \quad (9)$$

- 2) в центре кругового тока радиусом  $r$  индукция равна

$$B = \mu_0 I / (2r);$$

- 3) внутри длинного соленоида (катушки), в котором на единицу длины приходится  $n$  витков,

$$B = \mu_0 I n.$$

#### 4. Единица силы тока – ампер

В системе единиц СИ основной электрической величиной является *ампер*. Определение ампера основано на силовом взаимодействии двух длинных параллельных проводников с токами, расположенных в вакууме на расстоянии  $r$  друг от друга. Согласно формуле (9), проводник 1 с силой тока  $I_1$  создает в месте расположения проводника 2 магнитное поле с индукцией  $B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Вектор магнитной индукции перпендикулярен ко второму проводнику, по которому протекает ток силой  $I_2$ . На отрезок второго проводника длиной  $l$  действует сила Ампера:

$$F = I_2 B l = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}.$$

Если токи протекают в одном направлении, то сила имеет характер притяжения.

В Физической энциклопедии [5] дано следующее определение ампера, основанное на приведенной выше формуле. «Ампер – единица силы электрического тока СИ, равная

силе неизменяющегося тока  $I$  ( $I = I_1 = I_2$ ), который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии  $r = 1$  м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной  $l = 1$  м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н».

## 5. Магнитный поток

Определение потока поясним на наглядном примере: струя воздуха проходит со скоростью  $\mathbf{u}$  через отверстие площади  $S$  в пластине (рис. 7).

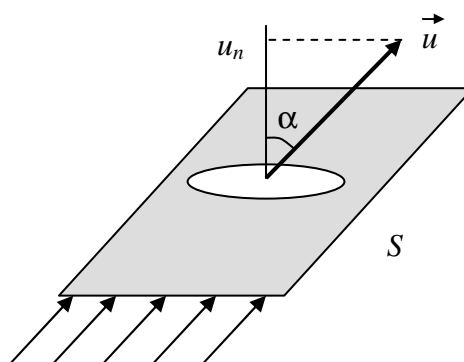


Рис. 7. К определению потока векторной величины.

Объем воздуха, проходящего через отверстие за единицу времени, равен

$$\Phi = u_n S,$$

где  $u_n = u \cos \alpha$  – проекция вектора  $\mathbf{u}$  на направление нормали к площадке отверстия,  $\alpha$  – угол между вектором  $\mathbf{u}$  и нормалью. Величина  $\Phi$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , есть *поток* вектора скорости.

Аналогично определяют потоки других векторных величин – напряженности электрического поля, магнитной индукции и т.д. *Магнитный поток*, или поток вектора магнитной индукции, через плоскую площадку  $S$  в однородном поле равен

$$\Phi = B_n S. \quad (10)$$

Единица магнитного потока – *вебер*:  $\text{Вб} = \text{Тл} \cdot \text{м}^2$ .

## 6. Работа проводника с током в магнитном поле

Рассмотрим плоский контур с током силой  $I$ , расположенный в однородном магнитном поле индукции  $B$  (рис. 8).

Линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости контура. Прямой отрезок проводника  $ab$  длиной  $l$  может скользить вдоль контура, образуя замкнутую цепь.



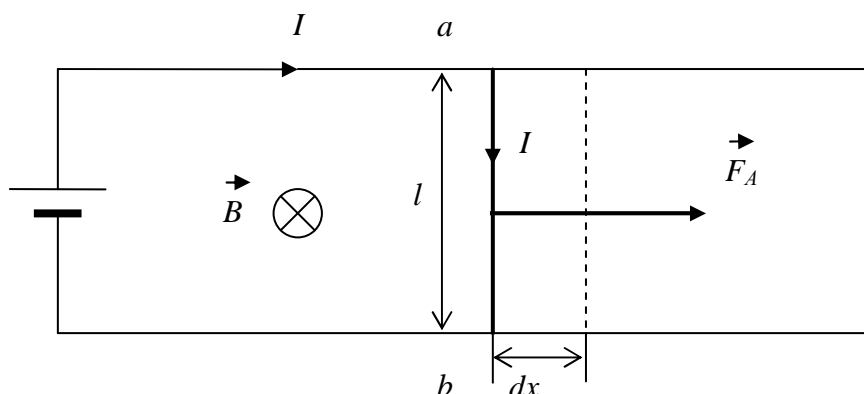


Рис.8. Работа при перемещении проводника с током в магнитном поле.

На проводник  $ab$  действует сила Ампера (см. формулу (6)):

$$F_A = I l B.$$

При перемещении проводника  $ab$  на величину  $dx$  сила совершает элементарную работу

$$\delta A = F_A dx = I l B dx. \quad (11)$$

Величина  $d\Phi = l B dx$  есть приращение магнитного потока через контур при перемещении проводника на величину  $dx$ . Следовательно, элементарная работа

$$\delta A = I d\Phi.$$

Если проводник совершает конечное перемещение, то работа

$$A = I (\Phi_2 - \Phi_1), \quad (12)$$

где  $\Phi_2$  – магнитный поток сквозь контур в конце перемещения, а  $\Phi_1$  – магнитный поток сквозь контур в начале перемещения. Формула (12), выведенная здесь для поступательного движения, справедлива для любого перемещения проводника.

## 7. Магнитные силы в природе и технических устройствах

Магнитные поля и заряженные микрочастицы (ионы, электроны) распространены в космосе – около звезд и планет, а также в межзвездном пространстве. Например, магнитное поле Земли отклоняет поток быстрых заряженных частиц, испускаемых Солнцем, защищая тем самым Землю от радиации. Кроме того, земное магнитное поле захватывает и длительное время удерживает испущенные Солнцем электроны и протоны, образуя *радиационные пояса* вокруг Земли.

Сила Ампера (см. формулу (5)) «работает» в электрических моторах, электроизмерительных приборах, излучателях звука (динамиках) и многих других устройствах.

Магнитная сила Лоренца  $\mathbf{F}_m = q [\mathbf{v}\mathbf{B}]$  нашла широкое практическое применение во многих приборах, в которых электроны (или другие заряженные элементарные частицы) движутся в магнитном поле в вакууме. Примеры таких устройств многочисленны: электронно-лучевые трубки телевизоров с магнитным отклонением луча; приборы для генерации электромагнитных колебаний высокой частоты – магнетроны, используемые в радиолокации и бытовых микроволновых печах; циклические ускорители элементарных частиц; приборы для измерения масс атомов (масс спектрографы); электронные микроскопы, в которых магнитные поля особой конфигурации выполняют роль, аналогичную стеклянным линзам в оптике.

В следующем разделе рассматривается применение силы Лоренца для измерения магнитной индукции.

### 8. Датчик Холла для измерения магнитного поля

Рассмотрим пластинку из полупроводника (или металла), через которую пропускают постоянный ток (рис. 9).

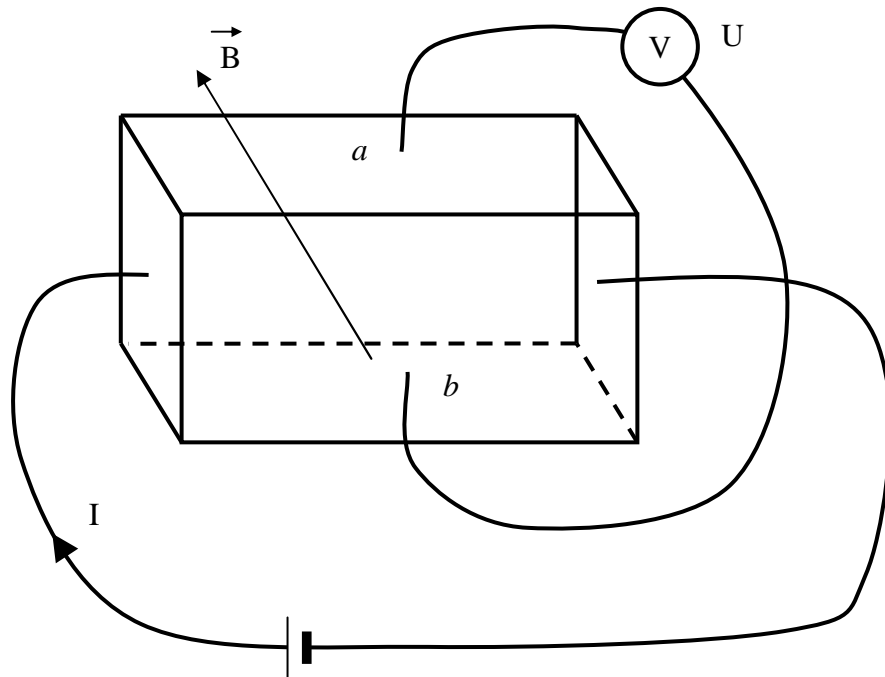


Рис. 9. Датчик магнитной индукции на эффекте Холла.

К контактам  $ab$ , расположенным точно напротив друг друга, подключен вольтметр  $V$ . Поскольку точки  $ab$  лежат в плоскости равного потенциала, то напряжение между ними отсутствует. Но если пластинку поместить в магнитное поле индукции  $B$ , направленной

как показано на рис. 9, то между контактами  $ab$  появится напряжение  $U_x$ , пропорциональное магнитной индукции:

$$U_x = kB. \quad (13)$$

Описанное явление открыто Э.Г. Холлом (1879 г.) и получило название *эффекта Холла*. Эффект Холла нашел различные практические применения, в частности, для измерения магнитного поля. При измерении магнитного поля пластинку (*датчик Холла*) помещают в магнитное поле и измеряют *напряжение Холла*  $U_x$ . По результатам измерения напряжения  $U_x$  вычисляют по формуле (13) магнитную индукцию. Коэффициент пропорциональности  $k$  находят по результатам измерений в поле известной магнитной индукции. В специально изготовленных приборах (магнетометры, тесламетры) индикатор прибора проградуирован в единицах магнитной индукции – *тесла* (Тл).

Поясним принцип действия датчика Холла (рис. 10). Предположим, что носители тока имеют положительный заряд  $q$  (дырки в полупроводнике  $p$ -типа) и дрейфуют со скоростью  $u$  вдоль оси  $x$ . На заряженные частицы действует сила Лоренца  $F = q u B$ , отклоняющая их к верхней грани датчика Холла (см. рис. 10). Накопление положительного заряда на одной стороне датчика и недостаток его на противоположной стороне приводят к образованию поперечного электрического поля напряженностью  $E_z$ . Поле  $E_z$  препятствует накоплению зарядов, так как возникающая электрическая сила  $F_3 = q E_z$ , направлена против силы Лоренца. Разделение зарядов прекратится, когда силы станут равными:  $q E_z = q u B$ . При этом напряженность электрического поля достигнет величины  $E_z = u B$ , а напряжение Холла между гранями пластинки толщиной  $d$ :

$$U_x = E_z d = u B d. \quad (14)$$

Скорость дрейфа  $u$  носителей тока связана с концентрацией носителей  $n$  и плотностью тока  $j$  через датчик Холла соотношением:

$$j = n q u.$$

Подстановкой выражения  $u = \frac{j}{nq}$  в формулу (14) получим:

$$U_x = \frac{jd}{nq} B = kB. \quad (15)$$

Таким образом, формула (13) выведена. Коэффициент пропорциональности  $k$

$$k = \frac{jd}{nq}$$

для данного датчика Холла остается постоянным, если поддерживать неизменными плотность тока  $j$  через датчик и температуру, от которой зависит концентрация носителей  $n$  в полупроводнике.

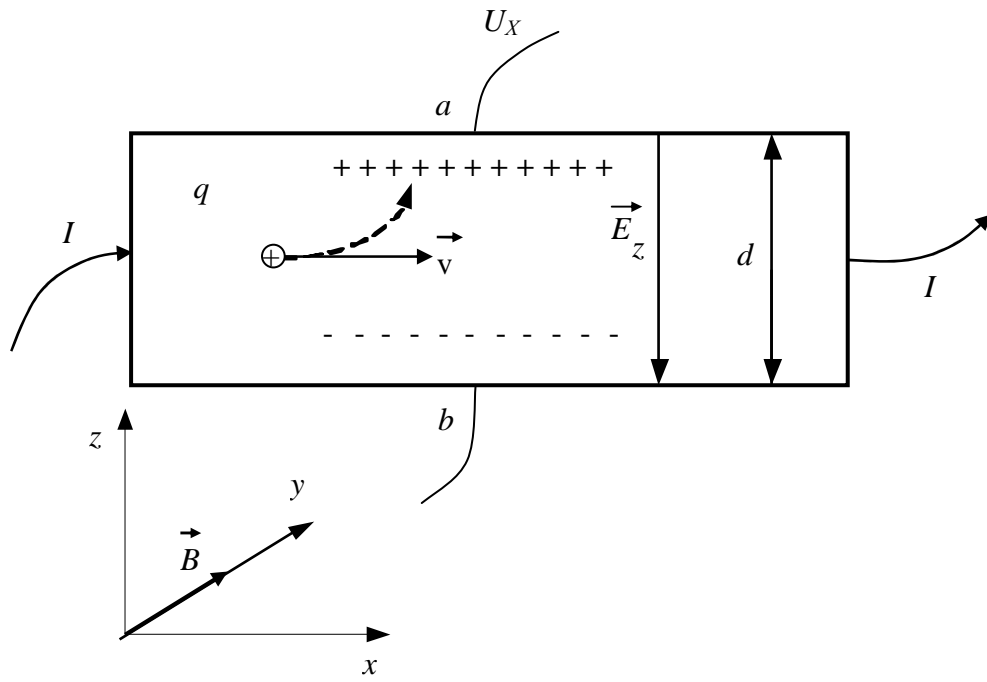


Рис. 10. Эффект Холла

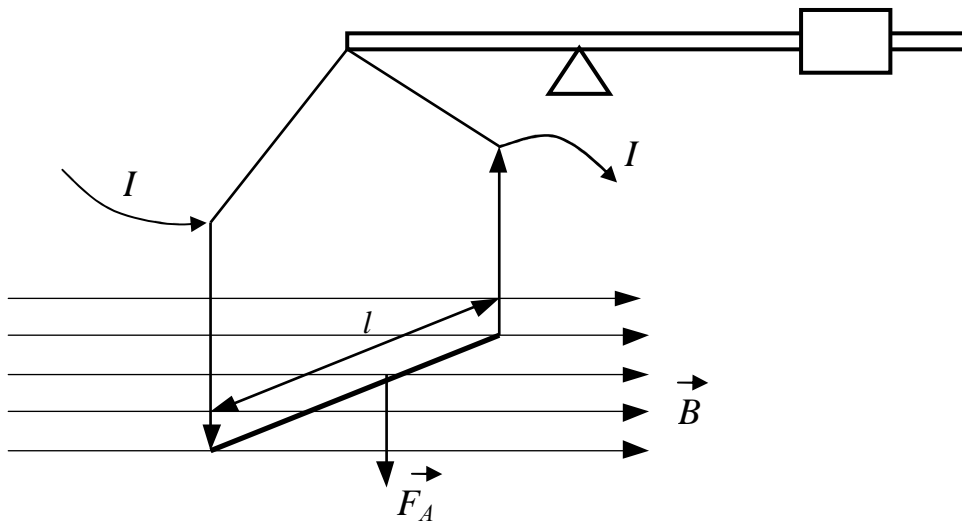


Рис. 11. Схема опыта для измерения силы Ампера с помощью весов

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 1. Методика опыта

Методика опыта по изучению закона Ампера схематически представлена на рис. 11. В горизонтальном магнитном поле индукции  $B$  расположена П-образная проволочная рамка, через которую можно пропускать постоянный ток. Горизонтальная часть рамки направлена перпендикулярно линиям магнитной индукции. Рамка подвешена к коромыслу балансовых весов для измерения силы Ампера. Рамку взвешивают, когда в рамке ток отсутствует, и находят ее массу  $m_1$ .

Затем через рамку пропускают ток силой  $I$ , который вызывает вертикальную силу Ампера  $F_A$ , действующую на горизонтальную часть рамки длиной  $l$  и направленную вниз. Согласно закону Ампера (см. формулу (6)), сила Ампера:

$$F_A = I B l n, \quad (16)$$

где  $n$  – число витков рамки ( $n = 1$  или  $2$ ). Рамку с током взвешивают и получают новое значение массы  $m_2$ .

Из разности масс находят силу Ампера:

$$F_A = (m_2 - m_1) g, \quad (17)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

### 2. Описание лабораторной установки

Общий вид лабораторной установки показан на рис. 12. Установка содержит: электромагнит 1 с железным сердечником и воздушным зазором; П-образную рамку 2, расположенную в воздушном зазоре электромагнита; балансовые весы 3 для измерения силы Ампера; два амперметра 4 для измерения силы тока магнита и рамки; блок питания 5 магнита и рамки; выпрямитель переменного тока 6; выключатель 7 тока магнита; набор рамок различной длины 8, штатив 9 для закрепления токоподводящих проводников к рамке; набор соединительных проводников с вилками.

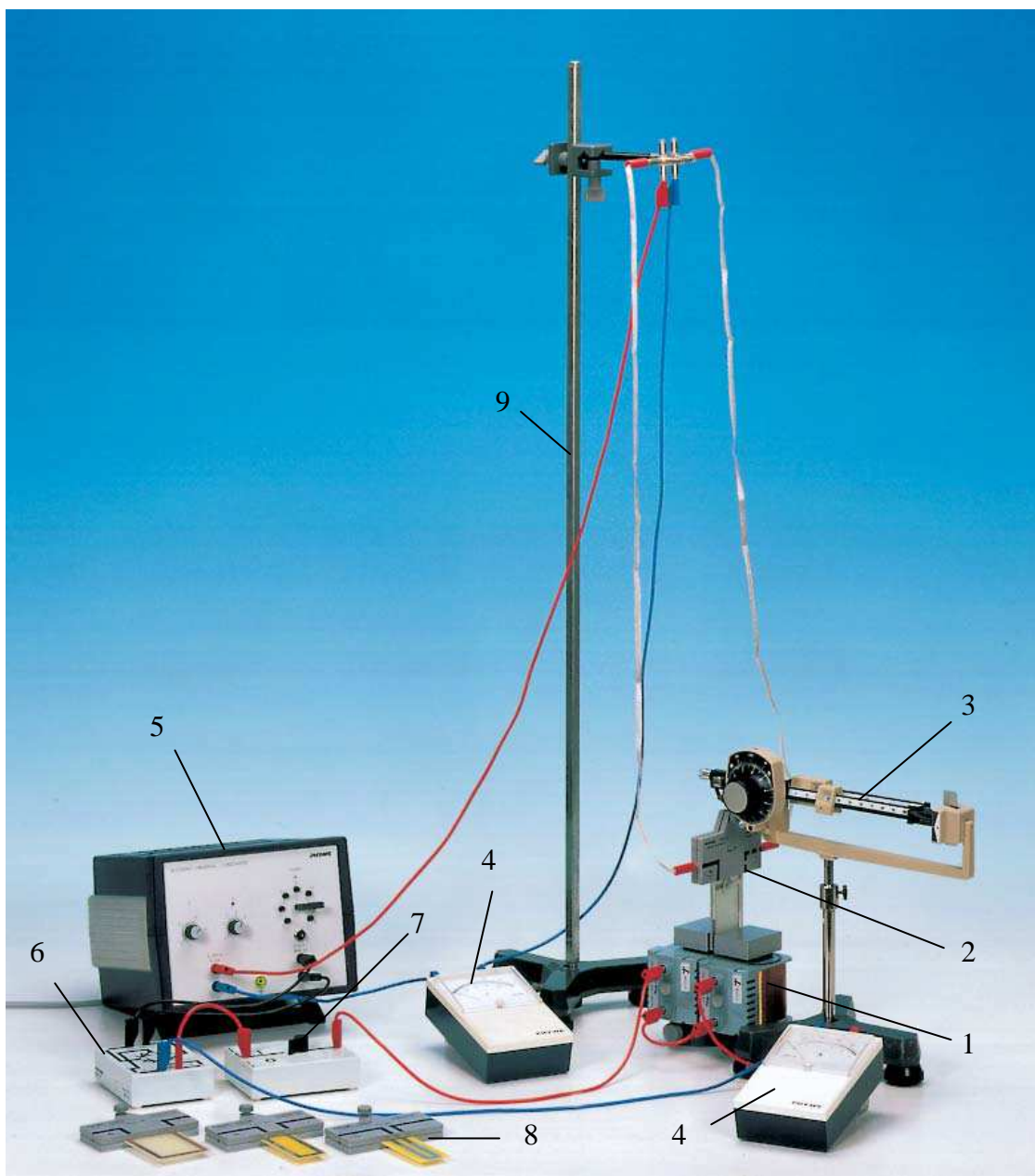


Рис. 12. Общий вид лабораторной установки:  
 1-электромагнит; 2-рамка; 3-весы; 4-два амперметра; 5- блок питания электромагнита рамки; 6-выпрямитель переменного тока; 7-выключатель тока магнита; 8-набор рамок; 9-штатив для проводников к рамке.

Электрическая схема установки представлена на рис. 13. Блок питания 2 имеет два выходных напряжения – постоянное (левая половина блока) для питания рамки и переменное (правая половина блока) для питания магнита после выпрямления тока..

Источник постоянного напряжения имеет две ручки регулировки – напряжения (ручка «V») и тока (ручка «A»). Вокруг каждой ручки регулировки имеется шкала для грубого отсчета, соответственно, напряжения или тока. Постоянное напряжение можно изменять в пределах 0...18 В, а ток – от нуля до 5 А.

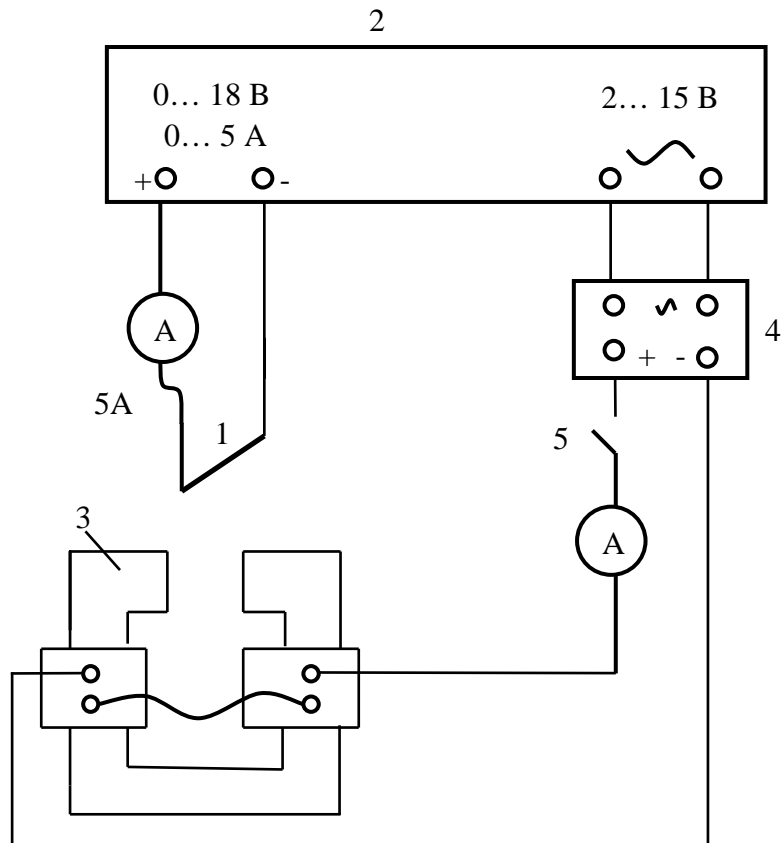


Рис. 13. Электрическая схема лабораторной установки:  
 1 – рамка; 2 – блок питания рамки и электромагнита; 3 –  
 электромагнит; 4 – выпрямитель переменного тока; 5 –  
 выключатель тока магнита

Источник постоянного напряжения имеет два режима электронной стабилизации: либо выходного напряжения, либо тока. В данной лабораторной работе используется режим стабилизации тока. Поясним характер работы стабилизатора тока. Установим ручку «V» на достаточно большое для данного опыта напряжение, например, на 10 В. Тогда установка требуемого тока производится только ручкой «А». Причем, установленный ток будет автоматически поддерживаться неизменным, как при сильных колебаниях сетевого напряжения, так и при изменении сопротивления нагрузки вследствие ее нагрева. Ток рамки (1) измеряют амперметром А на 5 А (см. рис. 13).

Переменное напряжение используется после выпрямления (т.е. превращения в постоянное напряжение) для питания электромагнита. С помощью переключателя переменное напряжение можно изменять ступенчато от 2 В до 15 В.

Схема питания электромагнита 3 включает в себя выпрямитель переменного тока 4, выключатель 5 и амперметр А на 1 А. Электромагнит имеет две обмотки, которые включают последовательно, как показано на рис. 13.

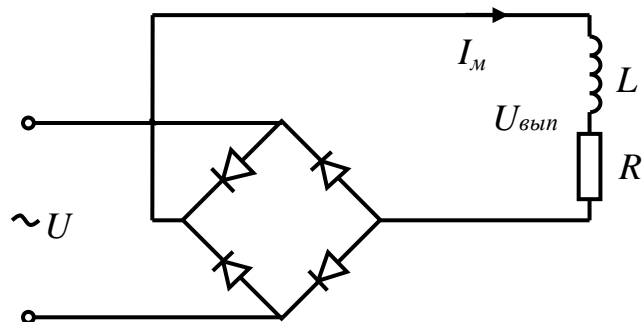


Рис. 14. Схема выпрямителя переменного тока для питания электромагнита:  $L$  – индуктивность электромагнита;  $R$  – активное сопротивление обмоток электромагнита.

Поясним работу выпрямителя, работающего по двухполупериодной схеме (рис. 14). Выпрямитель имеет четыре полупроводниковых диода, которые пропускают ток практически в одном направлении. Сопротивление диода для тока, протекающего в направлении острия на условном изображении диода, очень мало, а в обратном направлении – очень большое. На вход выпрямителя подают переменное напряжение  $U_{\sim}$  от понижающего трансформатора в блоке питания 2 (см. рис. 13). Переменное напряжение изменяется по гармоническому закону с частотой 50 Гц (рис. 15, а). Выпрямленное напряжение  $U_{\text{выпр}}$ , показанное на рис. 15, б, изменяется от нуля до максимального значения, при этом его полярность не изменяется. Выпрямленное напряжение можно представить как сумму постоянного напряжения  $U_{\sim}$  и наложенного на него переменного напряжения с частотой 100 Гц (см. рис. 15, в).

Обмотки электромагнита характеризуются активным сопротивлением  $R=12$  Ом и индуктивностью  $L$  (см. рис. 14). Индуктивность оказывает сопротивление только переменному току, причем индуктивное сопротивление, равное  $X_L = \omega L$  (здесь  $\omega$  – циклическая частота) много больше активного сопротивления  $R$ . Поэтому через обмотки электромагнита протекает практический постоянный ток со средним значением  $I_m$ , показанный на рис. 15, в. Пульсации тока электромагнита составляют всего 1,5% от его среднего значения.



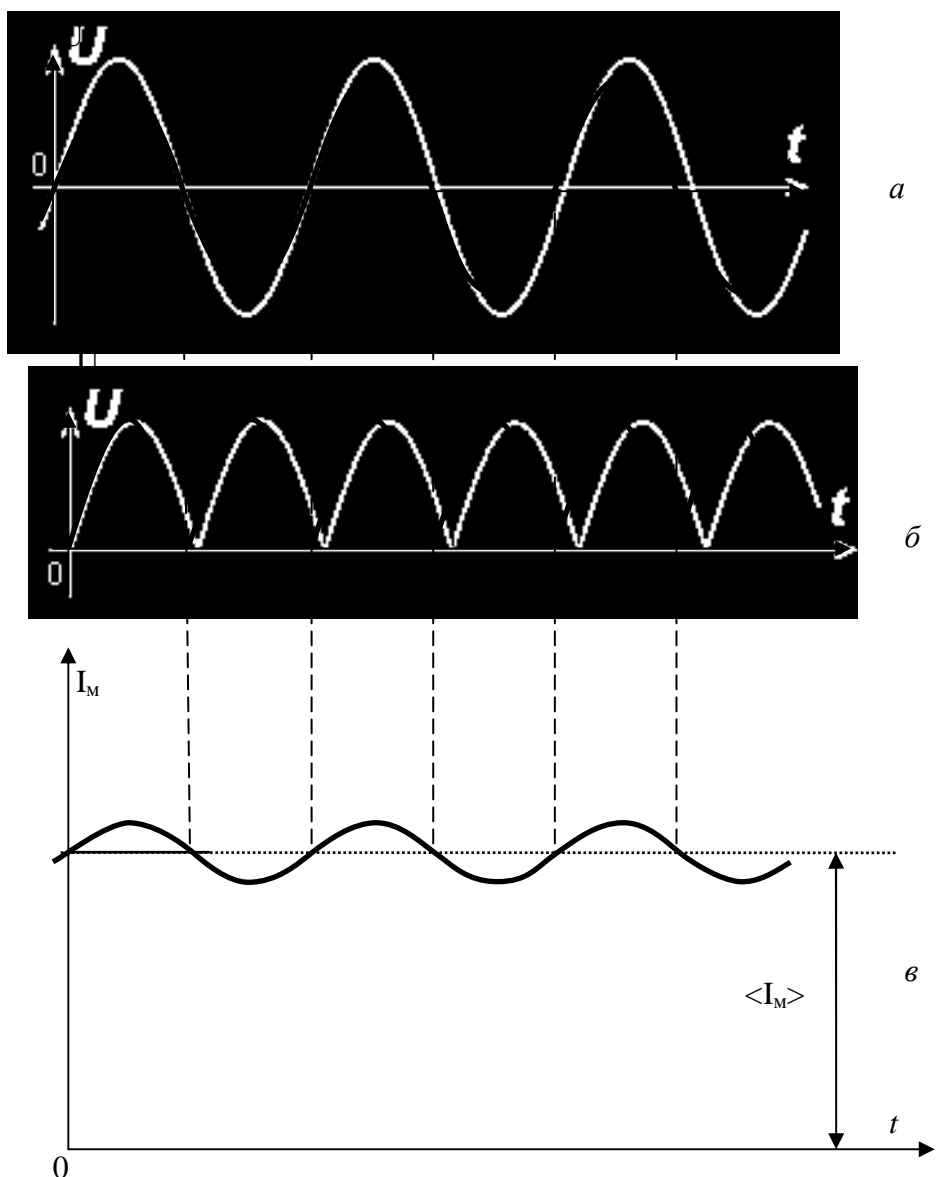


Рис. 15. Осциллограммы, характеризующие схему питания электромагнита: *a* – переменное напряжение на входе выпрямителя в зависимости от времени; *б* – выпрямленное напряжение; *в* – ток электромагнита (на рисунке пульсации тока преувеличены)

Магнитное поле в воздушном зазоре электромагнита было измерено магнетометром (тесламетром фирмы РНУВЕ) с датчиком Холла (описание датчика см. в разделе 8 Теоретической части). Поле в зазоре практически однородное, а вектор  $\vec{B}$  направлен перпендикулярно плоскости железных наконечников (см. линии магнитной индукции на рис. 4). Магнитная индукция  $B$  в воздушном зазоре магнита примерно пропорциональна силе тока  $I_M$  в обмотках магнита:

$$B = \gamma I_M, \quad (18)$$

где  $\gamma \approx 0,2$  Тл/А.

### 3. Порядок выполнения работы

**Задание 1.** Ознакомиться с установкой и подготовить установку к работе.

Масса рамки в отсутствие тока ( $m_1$ ) составляет несколько десятков грамм, а с наибольшими токами рамки и магнита – примерно на 10 г больше.

При взвешивании рамки равновесие (баланс) весов устанавливаются двумя последовательными способами: сначала перемещением грузиков по двум горизонтальным линейкам, а затем с помощью пружинного компенсатора (ручка с круглой шкалой). Одна линейка имеет три фиксированных положения для грузика: 0; 100 и 200 г.; (грузик на этой линейке должен находиться в положении «0»). Вторая линейка имеет 11 фиксированных положений для грузика (в граммах): 0; 10; 20; 30 и т.д. до 100. Круглая шкала компенсатора имеет отсчеты: 1; 2; 3 и т.д. до 10 грамм. Шкала между соседними цифрами компенсатора разбита на 10 делений, цена каждого деления составляет 0,1 г. Таким образом, на данных весах нетрудно взвешивать с ценой отсчета 0,1 г. Точность отсчета можно увеличить до 0,01 г, если воспользоваться нониусной шкалой компенсатора (вверху).

**Внимание!** Не подносить часы близко к магниту.

Порядок выполнения задания.

1. Зарисовать в рабочей тетради схему лабораторной установки (см. рис. 13).
2. Закрепить на весах рамку с длиной рабочей стороны  $l = 50$  мм и содержащую  $n = 2$  витка. С помощью этой рамки (из имеющегося набора рамок) получают наибольшую силу Ампера.
3. Проверить расположение рабочей стороны рамки (медной проводящей полоски на пластмассе) в воздушном зазоре магнита. В условиях равновесия весов проводящая полоска должна находиться в середине зазора по высоте. При необходимости, положение рамки отрегулировать, изменяя высоту весов на штативе. Кроме того, рамка не должна выходить за пределы зазора по горизонтали и не должна касаться полюсов магнита для исключения силы трения.
4. Установить выключатель тока магнита (в отдельной коробке) в положение «0» (выключено).
5. Переключатель выходного переменного напряжения блока питания (справа на блоке) установить в положение «12» для получения максимального тока магнита (примерно 0,9 А).
6. Включить сеть блока питания. Для этого вставить вилку в сетевую розетку, а затем включить тумблер на задней стороне блока питания. При этом должен загореться зеленый индикатор «Power» на блоке питания.
7. Добиться точного баланса весов.

8. Установить ток рамки. Для этого ручку «V» регулировки напряжения (слева на блоке питания) установить на значение «10» и в дальнейшем положение этой ручки не изменять. Ток рамки регулировать только ручкой «A». Ток измерять амперметром на 5 А. Установить максимальный ток рамки 5 А.
9. В установке, собранной правильно, сила Ампера должна быть направлена вниз. Для проверки выполнения этого условия включить ток магнита выключателем в отдельном коробе и обратить внимание на направление движения рамки. Если при этом рамка сместилась вверх, изменить направление тока рамки на обратное. Удобнее всего это сделать перекоммутацией проводников в колодке на верхней части штатива (см. 9 на рис. 12).
10. Выключить ток магнита выключателем. Уменьшить ток рамки до нуля с помощью ручки «A» блока питания. *Внимание!* Во избежание перегрева обмоток магнита и проводников рамки токи следует выключать, если не проводится измерение.

**Задание 2.** Изучить закон Ампера.

Задание включает две серии измерений: а) зависимости силы Ампера  $F_A$  от силы тока  $I$  в рамке при неизменном магнитном поле; б) зависимость силы Ампера  $F_A$  от магнитной индукции при неизменном токе  $I$  рамки.

Порядок выполнения задания.

1. Подготовить табл. 1 для записи результатов измерений.

*Таблица 1*

**Зависимость силы Ампера  $F_A$  от силы тока  $I$  в рамке**

Условия измерений:  $l = 50$  мм,  $n = 2$  витка, сила тока магнита  $I_M = \dots$  А

Сила тока рамки $I$ , А	$m_1$ , г	$m_2$ , г	$F_A = (m_2 - m_1)$ г, мН

*Примечание.* В таблице должно быть примерно 8 строк

2. Установить переключатель переменного напряжения в гнездо «12».
3. Измерить силу тока магнита  $I_M$ , результат измерения записать в заголовок табл. 1. Выключить ток магнита.
4. Уменьшить ток рамки до нуля с помощью ручки «A» блока питания.
5. Определить массу рамки  $m_1$ , результат измерения записать в табл. 1.
6. Установить максимальный ток рамки (примерно 5 А), измерить силу тока  $I$  рамки, результат измерения записать в табл. 1.
7. Включить ток магнита и измерить массу рамки  $m_2$ , результат измерения записать в табл. 1. Выключить ток магнита и уменьшить ток рамки до нуля.
8. Повторить измерения масс рамки ( $m_1$  и  $m_2$ ) для различных токов рамки. Ток рамки уменьшать с шагом 0,7...0,8 А до минимального тока примерно 1 А. Результаты измере-

ний записать в табл. 1. *Примечание.* Каждый раз необходимо измерять также массу рамки  $m_1$  для оценки погрешности измерения массы.

9. Выключить ток магнита и уменьшить ток рамки до нуля.

10. Подготовить табл. 2 для записи результатов второй серии измерений – зависимости силы Ампера от магнитной индукции (силы тока магнита) при постоянном токе рамки.

Таблица 2

**Зависимость силы Ампера  $F_A$  от силы тока  $I_M$  магнита**

Условия измерений:  $l = 50$  мм,  $n = 2$  витка, сила тока рамки  $I = \dots$ , А

Ток магнита $I_M$ , А	$m_1$ , г	$m_2$ , г	$F_A = (m_2 - m_1) g$ , мН

*Примечание.* В таблице должно быть 6 строк

11. Определить массу рамки  $m_1$ , результат измерения записать в табл. 2.

12. Установить переключатель переменного напряжения в гнездо «12».

13. Установить ток рамки 5 А. Измерить силу тока  $I$  рамки, результат измерения записать в заголовок табл. 2.

14. Включить ток магнита и измерить силу тока магнита  $I_M$ , результат измерения записать в табл. 2.

15. При включенном токе рамки и магнита измерить массу рамки  $m_2$ , Результат измерения записать в табл. 2.

16. Повторить измерения масс рамки ( $m_1$  и  $m_2$ ) при различном токе магнита. Ток магнита (предварительно выключенный) уменьшать каждый раз на одну ступень с помощью переключателя переменного напряжения блока питания до минимального напряжения 2 В. Ток рамки поддерживать неизменным. Результаты измерений записать в табл. 2.

17. Выключить ток магнита. Выключить сеть блока питания тумблером на задней стенке блока.

**Задание 3.** Демонстрация силы Лоренца и определение знака заряда электрона.

*Примечание.* Данное задание выполнять при наличии осциллографа в данной лаборатории.

С помощью электронного осциллографа и постоянного магнита наблюдать отклоняющее действие силы Лоренца на электроны, летящие в электронно-лучевой трубке. Трубка осциллографа схематически показана на рис.16.

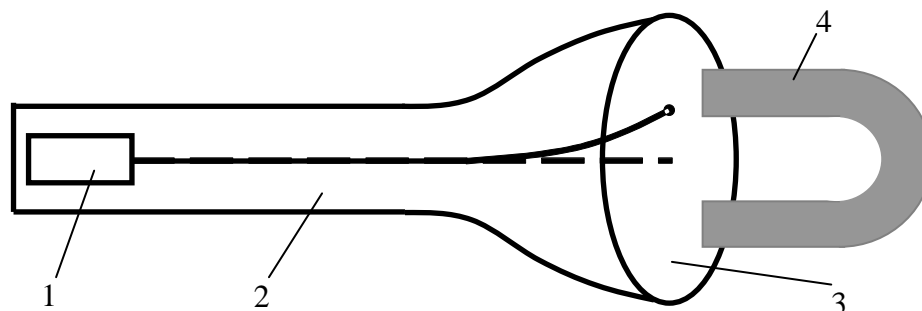


Рис. 16. Демонстрация силы Лоренца с помощью электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) осциллографа: 1–электронно-лучевая пушка; 2–ЭЛТ; 3–люминесцентный экран; 4–подковообразный постоянный магнит

Электронная пушка 1 испускает узкий пучок 2 быстрых электронов, которые в месте падения на люминесцентный экран 3 вызывают его свечение. Поднеся к экрану подковообразный магнит 4, можно наблюдать отклонение электронов.

Проделать данный опыт с осциллографом, имеющимся в лаборатории. При затруднениях обратиться к дежурному по лаборатории.

С помощью правила левой руки определить знак заряда электрона (вектор **V** направлен от северного полюса магнита, обозначенного буквой *N*). Результаты представить в отчете.

**Внимание!** Подобный опыт нельзя проводить с цветной трубкой телевизора или монитора, так как при этом можно намагнитить детали трубки и вывести ее из строя.

#### 4. Обработка результатов измерений

1. По результатам измерений масс ( $m_2$  и  $m_1$ ) вычислить силу Ампера по формуле:

$$F_A = (m_2 - m_1) g.$$

Ускорение свободного падения принять равным  $g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ . Если массы выражать в граммах, то получим силу в мН. Результаты вычислений записать в табл. 1 и 2.

2. По результатам измерений (см. табл. 1) построить на миллиметровой бумаге графическую зависимость силы Ампера от силы тока рамки. Нанести на график экспериментальные точки. Через начало координат и экспериментальные точки провести наилучшую прямую линию. Сравнить полученный результат с законом Ампера (см. формулу (6)) и сделать выводы. Выводы привести в рабочей тетради.

3. Используя полученный график и формулу (16), определить магнитную индукцию в воздушном зазоре магнита по формуле:

$$B = \frac{F_A}{Il}$$

Численные значения  $F_A$  и силы тока  $I$  взять на проведенной прямой в верхней части графика. Если силу Ампера выразить в ньютонах, ток  $I$  – в амперах, а длину рамки  $l$  – в метрах, получим магнитную индукцию  $B$  – в теслах (Тл). Полученное значение магнитной индукции записать в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты определения магнитной индукции двумя способами**

Магнитная индукция $B$ по результатам измерений силы Ампера	Магнитная индукция $B$ по результатам измерений тесламетром

4. Вычислить магнитную индукцию по формуле (18), полученной по результатам измерения магнитного поля с помощью тесламетра на основе эффекта Холла. Результат вычисления записать в табл. 3. Сравнить полученные двумя способами значения магнитной индукции и сделать выводы.

5. По результатам измерений (см. табл. 2) построить на миллиметровой бумаге графическую зависимость силы Ампера от силы тока магнита, которая пропорциональна магнитной индукции в зазоре магнита. Нанести на график экспериментальные точки. Через начало координат и экспериментальные точки провести наилучшую прямую. Сравнить полученный результат с законом Ампера (см. формулу (6)) и сделать выводы. Выводы привести в рабочей тетради.

**Контрольные вопросы**

1. Что такое магнитное поле?
2. Что является источниками магнитного поля?
3. Что понимают под магнитной индукцией в данной точке поля?
4. Чему равны силы Лоренца и Ампера?
5. Что такое линии магнитной индукции и каким свойством они обладают?
6. Как можно рассчитать магнитную индукцию по известным токам в проводках?
7. Каков принцип действия датчика Холла для измерения магнитного поля?
8. В каких устройствах используются силы в магнитном поле?

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Мартинсон Л.К., Морозов А.Н., Смирнов Е.В.* Электромагнитное поле: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 422 с.
2. *Калашиников С.Г.* Электричество. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 624 с.
3. *Савельев И.В.* Курс общей физики: В 3 т. Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. М.: Наука, 1982. 496 с.
4. *Иродов И.Е.* Электромагнетизм. Основные законы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 319 с.
5. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Большая Российская энциклопедия. Т. 1. 1998. 704 с.