

## Лабораторная работа № 2-03

### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРЯМОГО ПРОВОДНИКА

#### С ТОКОМ

*В.А. Степанова*

#### Цель работы

Исследование зависимости магнитного поля прямого проводника с током от расстояния до проводника и величины магнитной индукции поля от тока.

#### Теоретическое введение

Подобно тому, как в пространстве, окружающем электрические заряды, возникает электрическое поле, так и в пространстве, которое окружает токи и постоянные магниты, возникает *поле*, называемое *магнитным*. Магнитное поле является составной частью электромагнитного поля. *Магнитное поле характеризуют силовой характеристикой – вектором магнитной индукции  $\vec{B}$* .

Наличие магнитного поля обнаруживается по силовому действию на внесенные в него проводники с током или постоянные магниты. Название *магнитное поле* связывают с ориентацией магнитной стрелки под действием поля, создаваемого током: если поменять направление тока, то стрелка повернется в противоположную сторону. Важнейшая особенность магнитного поля состоит в том, что оно *действует только на движущиеся в нем электрические заряды*. Следовательно, чтобы охарактеризовать магнитное поле, надо рассмотреть его действие на определенный ток. Обобщая результаты исследования действия магнитного поля на различные проводники с током, А. Ампер установил, что сила, с которой магнитное поле действует на проводник длиной  $\ell$ , по которому протекает ток силой  $I$ , находящийся в магнитном поле, равна

$$\vec{F} = I [\vec{l} \vec{B}], \quad (3.1)$$

где  $\vec{l}$  – вектор, по модулю равный  $\ell$  и совпадающий по направлению с током,  $\vec{B}$  – вектор индукции магнитного поля, в котором находится проводник.

*Индукция магнитного поля* – это физическая величина, равная отношению максимальной силы Ампера, действующей на проводник с током в магнитном поле, к произведению силы тока, протекающей по проводнику, и длины проводника в магнитном поле

$$|\vec{B}| = \frac{|\vec{F}|_{\max}}{I \ell} \quad (3.2)$$

Таким образом, индукция магнитного поля  $\vec{B}$  – это силовая характеристика магнитного поля.

Единица измерения магнитной индукции в СИ – тесла (Тл). *Тесла* – магнитная индукция такого однородного магнитного поля, которое действует с силой в 1 Н на каждый метр длины прямолинейного проводника, расположенного перпендикулярно к направлению поля, при силе тока

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

Магнитное поле, как и электрическое, невидимо и оно не действует на наши органы чувств, но его можно изобразить графически посредством *силовых магнитных линий*. Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты (не имеют начала и конца), поэтому магнитное поле является *вихревым полем*, в отличие от электростатического поля, силовые линии которого всегда разомкнуты и начинаются или оканчиваются на зарядах, или уходят в бесконечность. Замкнутость силовых магнитных линий свидетельствует о том, что «магнитных зарядов», подобных электрическим, в природе не существует. Силовые линии магнитного поля охватывают траектории движущихся электрических зарядов и проводники с током. Поднеся к проводнику магнитную стрелку, можно обнаружить, что ее ось располагается перпендикулярно направлению тока в проводнике и по касательной к магнитной линии, охватывающей этот проводник.

На рис. 3.1 показаны силовые линии магнитной индукции прямолинейного проводника с током: они имеют вид окружностей с центром на оси проводника, вектор

индукции магнитного поля  $\vec{B}$  направлен по касательной к силовой линии в каждой её точке. Стоит отметить, что такое расположение и направление силовые линии магнитного поля данного тока будут иметь в любой плоскости рассмотрения.

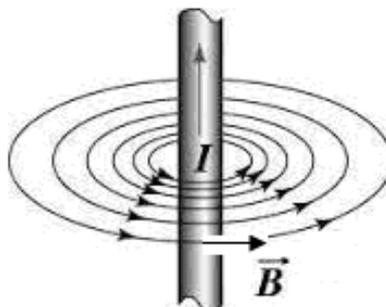


Рис. 3.1. Силовые линии магнитного поля прямого тока.

Направление силовых линий магнитного поля прямого тока определяется **правилом векторного произведения** (правилом правого винта): если поступательное движение винта соответствует направлению тока в проводнике, то направление вращения винта задает направление линий магнитной индукции (силовых линий магнитного поля).

Если во всех точках пространства вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  имеет одинаковое по модулю значение и одинаковое направление, то такое магнитное поле называют *однородным*. В случае однородного магнитного поля вектор  $\vec{B}$  направлен вдоль линий магнитной индукции. Для однородной изотропной среды вектор магнитной индукции связан с вектором напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  следующим соотношением

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (3.3)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{Гн/м}$ ),  $\mu$  – безразмерная величина – *магнитная проницаемость среды*, показывающая, во сколько раз магнитное поле в среде больше, чем в вакууме (воздухе); *магнитная проницаемость* в вакууме (воздухе) равна единице. *Единица напряженности магнитного поля* – ампер на метр – А/м.

Магнитное поле постоянных токов различной формы экспериментально изучалось французскими учеными Ж. Био и Ф. Саваром. П. Лаплас проанализировал экспериментальные данные, полученные Ж. Био и Ф. Саваром, и установил зависимость, которая получила название **закона Био-Савара-Лапласа**.

**Закон Био-Савара-Лапласа** для проводника с током  $I$ , элемент длины  $d\ell$  которого создает в некоторой точке (точка  $O$  на рис. 3.2) индукцию поля  $d\vec{B}$ , записывается в виде

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{\ell}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (3.4)$$

где  $d\vec{\ell}$  – вектор, совпадающий с элементарным участком тока и направленный в ту сторону, в какую течет ток,  $\vec{r}$  – радиус-вектор, проведенный от элемента тока в ту точку пространства, в которой определяется  $d\vec{B}$ ,  $r$  – модуль этого вектора  $\vec{r}$ .

Направление  $d\vec{B}$  перпендикулярно  $d\vec{\ell}$  и  $\vec{r}$ , т.е. перпендикулярно плоскости, в которой они лежат, и совпадает с касательной к линии магнитной индукции. Модуль вектора  $d\vec{B}$  для магнитного поля в воздухе определяется выражением

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}, \quad (3.5)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $d\vec{\ell}$  и  $\vec{r}$ .

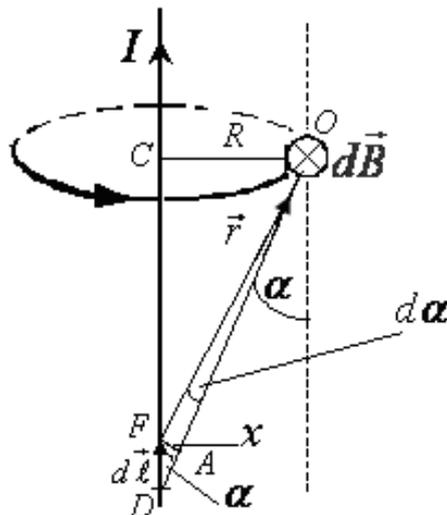


Рис. 3.2. Расчет индукции магнитного поля прямого проводника с током.

Расчет индукции магнитного поля по формуле (3.5) в общем случае довольно сложен. Однако, если распределение тока имеет определенную симметрию, то применение закона Био-Савара-Лапласа совместно с принципом суперпозиции позволяет просто рассчитать конкретные поля.

**Принцип суперпозиции магнитных полей:** вектор магнитной индукции результирующего поля  $\vec{B}$ , создаваемого несколькими движущимися зарядами (токами), равен векторной сумме магнитных индукций полей  $\vec{B}_i$ , создаваемых каждым движущимся зарядом (током) в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i. \quad (3.6)$$

### Магнитное поле прямого проводника с током

Для расчета индукции магнитного поля прямого проводника с током используем рис. 3.2. Через точку  $O$ , расположенную на расстоянии  $R$  от проводника (положение точки  $O$  определено радиус-вектором  $\vec{r}$ ), проведем силовую линию магнитного поля – окружность радиусом  $R$ , центром которой является проводник с током. Вектор магнитной индукции  $d\vec{B}$  направлен перпендикулярно плоскости рис. 3.2 «от нас». Из прямоугольных треугольников  $COF$  и  $FDA$  следует:

$$\left. \begin{aligned} \sin \alpha &= \frac{R}{r}, \\ x &= dl \cdot \sin \alpha, \\ x &= r \cdot d\alpha, \\ r &= \frac{dl \cdot \sin \alpha}{d\alpha}, \\ \sin \alpha &= \frac{R}{r} = \frac{R \cdot d\alpha}{dl \cdot \sin \alpha} \Rightarrow dl = \frac{R \cdot d\alpha}{\sin^2 \alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

После подстановки в формулу (3.5) значений соответствующих величин из равенств (3.7), получим:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \sin \alpha d\alpha}{R}. \quad (3.8)$$

Проинтегрировав полученное выражение по углу  $\alpha$ , получим формулу для расчета магнитной индукции в воздухе проводника с током *конечной* длины:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{R} \cdot (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (3.9)$$

Для *бесконечного* длинного прямого проводника с током угол  $\alpha$  изменяется в пределах от 0 до  $\pi$ , тогда магнитная индукция поля в воздухе на расстоянии  $b$  от него в воздухе вычисляется по формуле:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{b}. \quad (3.10)$$

*Индукция магнитного поля прямого тока в некоторой точке прямо пропорциональна силе этого тока и обратно пропорциональна расстоянию от этой точки до проводника с током.*

Если вокруг прямого проводника с током посыпать на гладкую перпендикулярную к проводнику поверхность металлические опилки и постучать пальцем по поверхности так, чтобы они, слегка подпрыгнув, расположились в воздухе по силовым линиям магнитного поля этого тока (иначе сила трения между опилками и поверхностью может оказаться слишком велика и они не смогут сориентироваться в магнитном поле), то опилки расположатся по концентрическим окружностям, охватывающим этот проводник. Силовые линии магнитного поля имеют вид концентрических окружностей, центром которых является проводник с током (источник магнитного поля), и по силовым линиям в магнитном поле располагаются железные опилки или оси маленьких магнитных стрелок. Поясним это с использованием *теоремы о циркуляции вектора*  $\vec{B}$ .

Метод определения полей систем движущихся зарядов или токов основан на введении математической характеристики векторных полей – циркуляции вектора  $\vec{B}$ . *Элементарная циркуляция вектора  $\vec{B}$  вдоль элемента контура  $d\vec{l}$*  – это величина, определяемая произведением

$$\left( \overset{\text{I}}{B} d\overset{\text{I}}{l} \right) = B \cdot \cos \varphi \cdot dl = B_{\lambda} dl , \quad (3.11)$$

где  $d\overset{\text{P}}{\lambda}$  – вектор элементарной длины контура, направленной вдоль обхода контура,  $B_{\lambda} = B \cos \alpha$  – составляющая вектора  $\overset{\text{P}}{B}$  в направлении касательной к контуру (с учетом выбранного направления),  $\alpha$  – угол между векторами  $\overset{\text{P}}{B}$  и  $d\overset{\text{P}}{\lambda}$  (рис. 3.3).

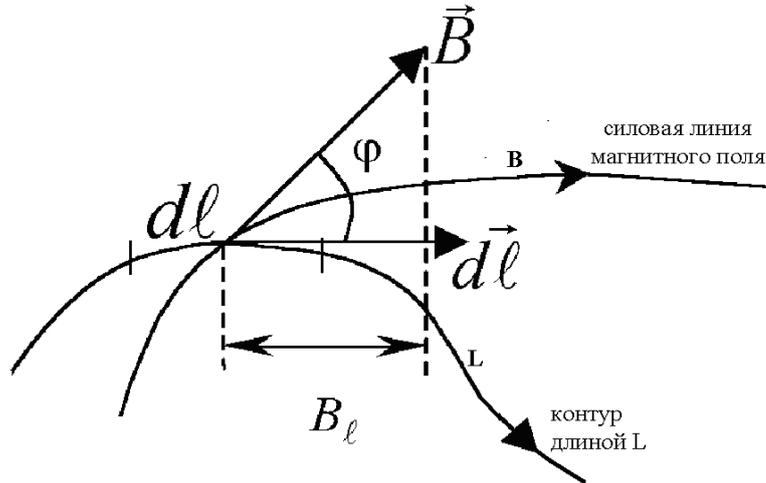


Рис. 3.3. К понятию циркуляции вектора  $\overset{\text{P}}{B}$ .

Циркуляцией вектора  $\overset{\omega}{B}$  по заданному замкнутому контуру длиной  $L$  называется интеграл

$$\oint_L \overset{\text{P}}{B} d\overset{\text{P}}{\lambda} = \oint_L B_{\lambda} d\lambda . \quad (3.11)$$

**Теорема о циркуляции вектора  $\overset{\omega}{B}$ :** циркуляция вектора  $\overset{\omega}{B}$  по произвольному замкнутому контуру  $L$  равна произведению магнитной постоянной  $\mu_0$  на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром

$$\oint_L \overset{\text{P}}{B} d\overset{\text{P}}{\lambda} = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i , \quad (3.12)$$

где  $n$  – число проводников с токами, охватываемых контуром. При этом положительным считается ток, направление которого образует с направлением обхода по контуру правовинтовую систему; ток противоположного направления считается отрицательным.

Если токи текут во всем пространстве, где расположен контур, то алгебраическую сумму токов, охватываемых контуром, можно представить в виде

$$\sum_{i=1}^n I_i = \int_S \mathbf{j}^I dS, \quad (3.13)$$

где  $\mathbf{j}^I$  – плотность тока в той точке, где расположен векторный элемент  $dS^I$  поверхности  $S$ , ограниченной контуром длиной  $L$ .

Преобразовав левую часть теоремы о циркуляции вектора  $\mathbf{B}^{\omega}$  (3.12) по теореме Стокса, получаем равенство

$$\int_S [\nabla \mathbf{B}^I] dS = \mu_0 \int_S \mathbf{j}^I dS, \quad (3.14)$$

из которого следует, что ротор вектора магнитной индукции пропорционален вектору плотности тока в данной точке

$$\text{rot} \mathbf{B}^{\omega} = \mu_0 \cdot \mathbf{j}^{\omega}, \quad (3.15)$$

где  $\text{rot} \mathbf{B}^{\omega} = [\nabla \mathbf{B}^{\omega}]$  – это величина, которая называется *ротор* (вихрь) вектора магнитной индукции.

Равенство (3.15) – это *теорема о циркуляции вектора  $\mathbf{B}^I$  в дифференциальной форме*. Отметим, что *формулы (3.12) и (3.15) записи теоремы о циркуляции вектора  $\mathbf{B}^I$  справедливы только для поля в вакууме* в отсутствие меняющихся во времени электрических полей, а для магнитного поля в веществе необходимо учитывать молекулярные токи, умножая правую часть этих формул на  $\mu$  – *магнитную проницаемость среды*.

Из теоремы о циркуляции следует, что *поскольку циркуляция и ротор вектора  $\mathbf{B}^{\omega}$  магнитного поля не равны нулю, такое поле является вихревым*.

Теорема о циркуляции вектора  $\mathbf{B}^I$  имеет в учении о магнитном поле такое же значение, как теорема Гаусса в электростатике, так как позволяет находить магнитную индукцию поля. Продemonстрируем справедливость этого на примере магнитного поля прямого тока  $I$ .

## Магнитное поле бесконечно длинного прямого проводника с током

Выберем контур, совпадающий с силовой линией магнитного поля прямого тока – окружность радиуса  $r$  (рис. 3.4). В каждой точке этого контура вектор  $\vec{B}$  одинаков по величине и совпадает по направлению с касательной компонентой  $d\vec{l}$  к контуру,  $B_1 = B = \text{const}$ . Следовательно, циркуляция равна произведению  $|\vec{B}|$  на длину окружности  $2\pi r$  и равенство (3.12) имеет вид

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \cdot 2\pi r = \mu_0 \cdot I, \quad (3.16)$$

откуда модуль вектора магнитной индукции

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r}. \quad (3.17)$$

Таким образом, исходя из теоремы о циркуляции вектора  $\vec{B}$ , получили выражение для магнитной индукции поля прямого проводника тока, выведенное ранее (3.10), где  $b=r$ .

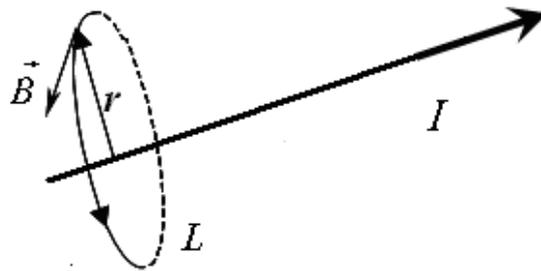


Рис. 3.4. К расчету индукции магнитного поля прямого тока на основе теоремы о циркуляции

## Суперпозиция магнитных полей токов, текущих в параллельных проводниках

Рассмотрим суперпозицию магнитных полей на примере двух прямолинейных длинных проводников, расположенных параллельно друг другу на расстоянии  $d$  друг от друга (рис. 3.5). По проводникам текут токи  $I_1$  и  $I_2$  в противоположных направлениях. Токи  $I_1$  и  $I_2$ , текущие в

проводниках, создают магнитные поля, силовые линии которых представляют собой окружности, охватывающие токи. Направления силовых линий определяются правилом правого винта. Векторы магнитной индукции  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  являются касательными к соответствующим силовым линиям, и поэтому перпендикулярны к радиус- векторам  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$ .

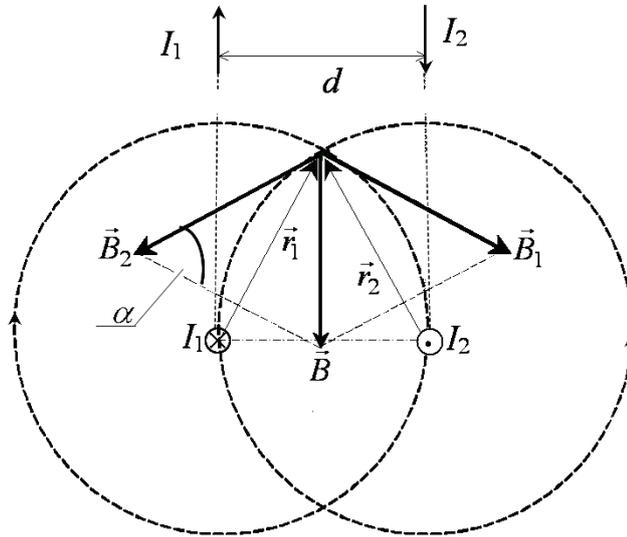


Рис. 3.5. К расчету магнитного поля двух параллельных проводников.

Для определения численного значения и направления вектора индукции  $\vec{B}$  магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии  $r_1$  от первого проводника и на расстоянии  $r_2$  от второго проводника, запишем принцип суперпозиции магнитных полей

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2. \quad (3.18)$$

Модули векторов магнитной индукции  $B_1$  и  $B_2$  вычисляются по формулам

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi r_1} \quad \text{и} \quad B_2 = \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2\pi r_2}, \quad (3.19)$$

численное значение вектора индукции результирующего магнитного поля определяют по теореме косинусов

$$B^2 = B_1^2 + B_2^2 - 2B_1 \cdot B_2 \cdot \cos \alpha, \quad (3.20)$$

косинус угла  $\alpha$  может быть определен из треугольника расстояний

$$d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 \cdot r_2 \cdot \cos \alpha, \quad (3.21)$$

где  $\alpha$  – это угол между векторами  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$ .

### Магнитное поле рамки из проводника с протекающим по ней током

На рис. 3.6 представлена иллюстрация магнитного поля, создаваемого внутри рамки токами, текущими по сторонам рамки.

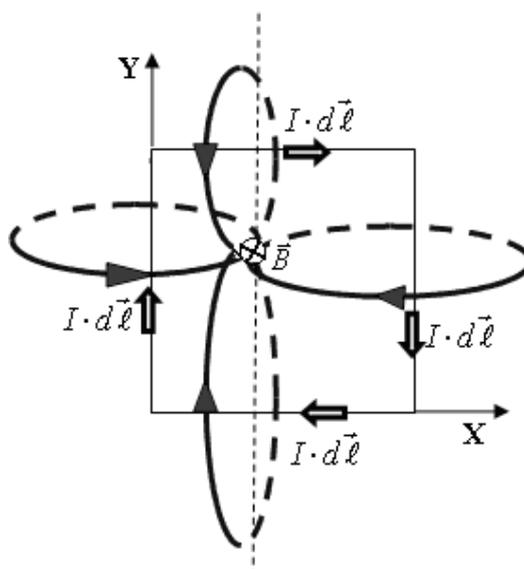


Рис. 3.6. Направления магнитных силовых линий полей, возникающих вокруг каждой стороны рамки с током  $I$  и длиной  $\ell$

Как видно из рисунка, все силовые линии имеют одинаковое направление в исследуемой точке. Касательные к силовым линиям – векторы  $\vec{B}_i$  магнитной индукции поля, создаваемого каждой стороной рамки. Каждый вектор  $\vec{B}_i$  направлен перпендикулярно плоскости рамки «от нас». Применяя принцип суперпозиции полей (3.22), делаем вывод, что вектор результирующего магнитного поля будет направлен так же «от нас».

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4. \quad (3.22)$$

Численное значение вектора индукции результирующего магнитного поля равно сумме модулей всех  $\left| \vec{B}_i \right|$ , магнитной индукции поля, создаваемого каждой стороной рамки. Так как ток на всех участках рамки одинаков по величине, то численное значение магнитной индукции зависит только от расстояния от стороны рамки до исследуемой точки, а направление индукции результирующего магнитного поля остается неизменным при перемещении в горизонтальном направлении (вдоль оси  $OX$ ).

### Описание экспериментальной установки

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 3.7.

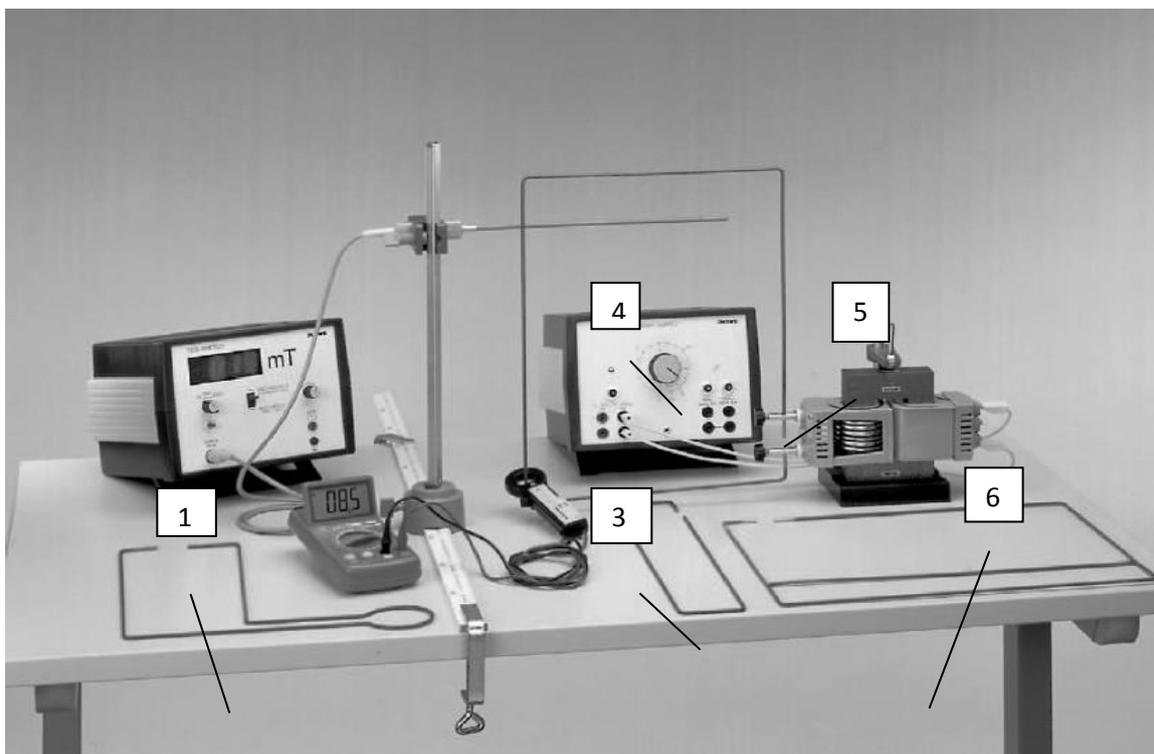


Рис. 3.7. Общий вид установки:

1 – тесламетр, 2 – вольтметр (мультиметр), 3 – источник питания, 4 – датчик Холла (щуп), 5 – образец (металлическая рамка), 6 – трансформатор.

В данной работе моделируется магнитное поле прямого тока с использованием рамки с током 5, закрепленной в вертикальной плоскости. Поскольку длина вертикальной стороны рамки много больше расстояний до точек, в которых проводится измерение величины индукции магнитного поля  $B$ , то её условно можно считать бесконечно длинным прямым проводником с током. Измерение результирующей индукции магнитного поля производится линейным датчиком Холла (щупом) 4 для различных взаимных расположений источника поля и самого датчика, подключенного к цифровому прибору измерения величины магнитного поля – тесламетру 1. Датчик (щуп) можно перемещать в горизонтальном направлении, измеряя скрепленной с ним линейкой расстояние от вертикальной стороны рамки. Для проведения работы используется трансформатор 6, питаемый от источника 3, позволяющего изменять прямой ток во вторичной обмотке в диапазоне от 20 А до 120 А. Мультиметр 2 фиксирует напряжение на трансформаторе.

Перед выполнением работы заполните табл. 3.1.

*Таблица 3.1*

### **Характеристики измерительных приборов**

№ п/п	Прибор	Пределы измерений	Точность прибора

### Порядок выполнения работы

При выполнении работы необходимо строго соблюдать правила техники безопасности, установленные на рабочем столе студента в лаборатории.

**Категорически запрещается самостоятельное включение электроприборов в измерительной установке.**

Работу выполняйте в такой последовательности:

1. Источник питания подключите к трансформатору. К выходным клеммам трансформатора вертикально закрепите исследуемый образец (металлическую рамку). Датчик Холла (далее называемый щупом) закрепите горизонтально в штативе, расположенном на измерительной горизонтальной линейке, перпендикулярно плоскости рамки.

2. Сопротивление проводника рассчитывается по формуле

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}, \quad (3.23)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника,  $\ell$  – длина проводника (длина вертикальной стороны рамки),  $S$  – площадь поперечного сечения проводника равная  $\frac{\pi d^2}{4}$ . Значения

$\rho, l, d$ , приведенные на рабочем столе экспериментальной установки, запишите в табл.

3.2.

3. Подайте на трансформатор указанное в индивидуальном задании напряжение  $U_{np}$ , которое фиксируется мультиметром. На рамке будет напряжение  $U$ , которое вычисляется по формуле

$$U = k \cdot U_{np} \quad (3.24)$$

с учетом коэффициента трансформации  $k = \frac{N_2}{N_1}$ , где  $N_2$  и  $N_1$  – количество витков вторичной и первичной обмотках трансформатора ( $N_2 = 6$  витков,  $N_1 = 140$  витков).

4. Рассчитайте значение силы тока в рамке по закону Ома

$$I = \frac{U}{R} . \quad (3.25)$$

5. Зафиксируйте положение щупа на расстоянии 5 см перед левым проводником (левая вертикальная сторона) рамки. Переместите щуп к правой стороне рамки и убедитесь, что расстояние 5 см сохраняется (как и у левого проводника).

Поместите щуп влево на расстояние 6 см от левого проводника. Перемещая щуп далее по горизонтальной линейке (с шагом 1 см) в сторону проводника, запишите значения индукции магнитного поля  $B$ , измеренное по тесламетру.

6. Перемещайте щуп далее от левого проводника в сторону правого (с шагом 3 см) и, пройдя всю плоскость рамки, запишите величину  $B$ , измеренную по тесламетру.

Запишите значения  $B$  при перемещении щупа от правого проводника вправо до расстояния 6 см с шагом 1 см.

7. Зафиксируйте положение щупа на расстоянии 1 см слева у левого проводника. Запишите величину  $B$ . Изменяя величину напряжения на рамке и рассчитав по формуле

(3.25) значение тока в рамке, получите зависимость величины индукции магнитного поля от силы тока  $B = f(I)$ , при фиксированном расстоянии щупа от рамки.

8. Полученные данные занесите, соответственно, в табл. 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2

**Данные образцов**

Номер образца	Длина образца, м	Диаметр образца, м	Удельное сопротивление материала $\rho$ , Ом·м	Сопротивление образца $R$ , Ом

Таблица 3.3

**Результаты измерений**

№ п/п	Расстояние щупа по линейке $r$ , см	Значения $B$ по тесламетру, мТл	Напряжение $U_{np}$ , В	Напряжение на образце $U$ , В	Сила тока на образце $I$ , мА
1					
2					
...					
20					

*Примечание.* Содержание и форма таблицы должны соответствовать измерениям, проводимым согласно индивидуальному заданию.

**Обработка результатов эксперимента**

1. Рассчитайте величину сопротивления образца по формуле (3.23) и запишите результат расчетов в табл. 3.1.

2. Вычислите величину тока в образце по формуле (3.25).

3. Постройте график зависимости величины магнитной индукции поля от величины, обратной расстоянию на участке перемещения щупа из крайнего положения (6 см от левого проводника) до левого проводника  $B = f\left(\frac{1}{r}\right)$ , согласно измерениям по п. 5 раздела «Порядок выполнения работы».

4. Постройте график зависимости величины магнитной индукции от расстояния  $B = f(r)$  по измерениям п. 6 раздела «Порядок выполнения работы».

5. Постройте график зависимости величины магнитной индукции от величины тока  $B = f(I)$ .

6. Для значений тока и расстояний, которые были установлены при измерениях по п. 5 раздела «Порядок выполнения работы», рассчитать величину  $B$  по формуле (3.17). Сравните вычисленные значения с показаниями, полученными по тесламетру при измерениях п. 5 раздела «Порядок выполнения работы».

7. Определите погрешность значения магнитной индукции, полученного по формуле (3.17). Так как значение  $B$  – косвенное измерение, то абсолютная погрешность определяется методом частных производных  $B$  по переменным  $I$  и  $r$ :

$$\frac{\partial B}{\partial I} = \frac{\mu_0}{2\pi r}; \quad \frac{\partial B}{\partial r} = \left| \frac{\mu_0 I}{2\pi} \right| \cdot \frac{1}{r^2},$$

$$\Delta B = \frac{\partial B}{\partial I} \Delta I + \frac{\partial B}{\partial r} \Delta r.$$

Величина  $\Delta I$  определяется через частные производные:

$$\Delta I = \frac{\Delta U}{R} + \frac{\Delta R \cdot U}{R^2}.$$

Величина  $\Delta r$  – цена наименьшего деления линейки.

8. Рассчитайте относительную погрешность измерения:

$$\delta = \frac{\Delta B}{B_{\max}} \cdot 100\% .$$

Так как величина  $B$  изменяется не линейно, то для расчета выбирается значение  $B_{\max}$ .

9. Окончательный результат для выбранного значения  $B$  запишите в виде:

$$B = B_{\max} \pm \Delta B .$$

### **Библиографический список**

*а) основной:*

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики: В 5 кн. М.: АСТ: Астрель, 2006. Кн. 2. 289 с.
2. *Батурин Б.Н.* Правила электробезопасности при выполнении лабораторных работ: Учеб. пособие. М: МИСиС. 1995. 38 с
3. *Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ: Учеб. пособие. М.: МИСиС. 2007. 107 с.

*б) дополнительный:*

4. *Калашиников С.Г.* Электричество. М.: Физматлит. 2006. 655 с.
5. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. М.: Физматлит. 2004. Т.2. 600 с.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое магнитное поле? Назовите источники магнитного поля.

2. Что называют индукцией магнитного поля? Напишите формулу связи индукции и напряженности магнитного поля в веществе. Поясните физический смысл магнитной проницаемости среды.

3. Нарисуйте и покажите, как ориентированы силовые линии поля прямого проводника с током. Как направлен вектор  $\vec{B}$ ?

4. Записав закон Био-Савара-Лапласа, объясните его физический смысл.

5. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора магнитной индукции и запишите её в интегральной и дифференциальной форме. Что доказывает вихревой характер магнитного поля?

6. Используя закон Ампера, выведите формулу вычисления силы взаимодействия двух параллельных прямых токов  $I_1$  и  $I_2$  одинаковой длины, расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга. Укажите направление вектора силы взаимодействия двух параллельных прямых токов  $I_1$  и  $I_2$  в двух случаях: 1) токи текут в одном направлении; 2) токи текут в противоположных направлениях.