

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Амурский государственный университет»

Инженерно-физический факультет
Кафедра физики

Лабораторный практикум по общей физике
Электричество и магнетизм

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
**ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА ОСИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАТУШКИ**

Благовещенск 2021

ББК 22.334я73

Л 12

Рецензент:

С.В. Барышников, профессор кафедры физического и математического образования ФГБОУ ВО «Благовещенский государственный педагогический университет», д-р. физ.-мат. наук, профессор.

Л 12

Лабораторный практикум по общей физике. Электричество и магнетизм: Лаб. работа «Исследование магнитного поля на оси цилиндрической катушки» /сост. О.В. Зотова, Е.В. Стукова. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2021.- 14 с.

Лабораторная работа «Исследование магнитного поля на оси цилиндрической катушки» входит в физический практикум (раздел «Электричество и магнетизм») для студентов, обучающихся по инженерным специальностям и направлениям подготовки.

В пособии содержится теоретический материал на тему исследования, описание лабораторной установки и методики эксперимента, указания по выполнению эксперимента и обработке результатов измерений, вопросы для контроля знаний, а также список рекомендуемой учебной литературы.

ББК 22.334 я73

В авторской редакции.

©Амурский государственный университет, 2021

© О.В. Зотова, Е.В. Стукова, составление

Лабораторная работа
ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА ОСИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАТУШКИ

ЦЕЛЬ: Экспериментально определить значения магнитной индукции на оси цилиндрической катушки (соленоида) с помощью датчика Холла.

ОБОРУДОВАНИЕ: Лабораторный комплекс «Электричество и магнетизм»: миниблоки «Цилиндрическая катушка», «Тесламетр», генератор постоянных напряжений, мультиметры.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

1. Закон Био – Савара– Лапласа

Во всех точках пространства, окружающего движущиеся заряды и проводники с током, всегда существует обусловленное этим движением (током) *магнитное поле*.

Основной характеристикой магнитного поля является *вектор магнитной индукции* \vec{B} . Закон *Био – Савара – Лапласа* позволяет определить вектор индукции магнитного поля, созданного элементарно малым проводником длиной dl с током I (т.е. *элементом тока* – $I\vec{dl}$) в любой точке пространства окружающего проводник:

$$\vec{dB} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I[\vec{dl}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость среды (для вакуума и воздуха $\mu=1$),

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

I – сила тока в проводнике;

\vec{dl} – вектор, равный по модулю длине dl проводника и совпадающий по направлению с направлением тока;

\vec{r} – радиус-вектор, проведенный от элемента проводника к точке, в которой определяется магнитная индукция.

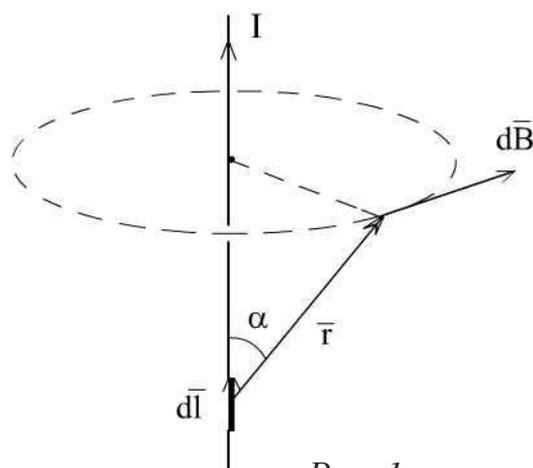


Рис. 1

Из (1) следует, что *направление вектора* \vec{dB} , определяется правилом векторного произведения $[\vec{dl}, \vec{r}]$ (*правилом правого винта*), согласно которому вектор \vec{dB} перпендикулярен плоскости, в которой лежат векторы \vec{dl} и \vec{r} . Векторы \vec{dl} , \vec{r} и \vec{dB} образуют правовинтовую систему, в которой если четыре пальца правой руки согнуть в направлении поворота от вектора \vec{dl} к вектору \vec{r} через наименьший угол, тогда большой палец, отогнутый на 90° , будет указывать направление вектора \vec{dB} в любой точке (рис. 1). Вектор магнитной индукции всегда направлен по касательной к *силовой линии магнитного поля*, которая в данном случае представляет собой концентрическую окружность, центр которой лежит на прямой, проходящей через элемент \vec{dl} .

Величина (модуль) вектора магнитной индукции в вакууме (или в воздухе) \vec{dB} определяется следующим образом:

$$|\vec{dB}| = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \sin \alpha}{r^2} dl, \quad (2)$$

где α – угол между векторами \vec{dl} и \vec{r} .

2. Магнитное поле на оси кругового витка с током

Рассмотрим круговой проводник с током (рис. 2). Определим величину и направление вектора магнитной индукции \vec{B} в какой-либо точке, лежащей на перпендикуляре, проведенном через центр этого витка. Для этого выделим на кольцевом проводнике радиуса R с током I элемент \vec{dl} . От этого элемента проведем радиус-вектор \vec{r} в произвольную точку А, лежащую на оси симметрии. Направление вектора \vec{dB} в точке А определяется по правилу правого винта.

Согласно принципу суперпозиции магнитных полей, результирующая индукция магнитного поля в точке А находится как векторная сумма векторов \vec{dB} , от всех элементов, составляющих виток. Все векторы \vec{dB} перпендикулярны плоскостям проходящим через соответствующие \vec{dl} и \vec{r} , и следовательно, они образуют симметричный конический веер. Из соображений симметрии видно, что результирующий вектор \vec{B} направлен вдоль оси кругового

тока. Каждый из векторов вносит вклад равный \vec{dB}_{\parallel} , а \vec{dB}_{\perp} взаимно уничтожаются.

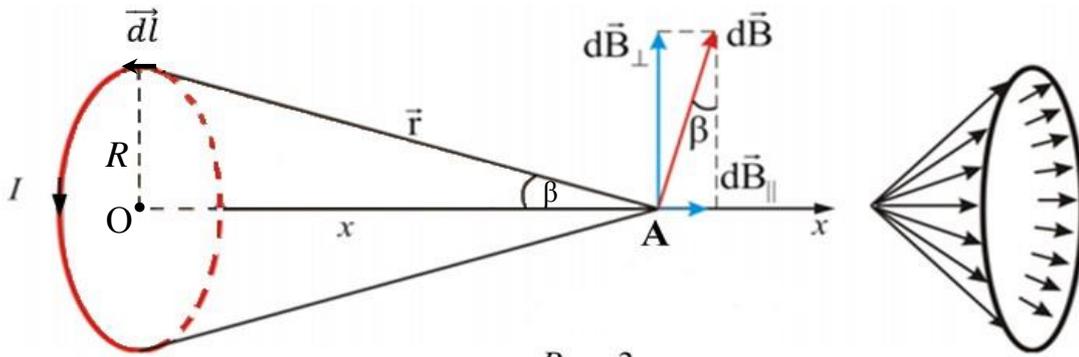


Рис. 2

Из рисунка 2 видно, что

$$dB_{\parallel} = dB \cdot \sin\beta; \quad \sin\beta = \frac{R}{r}, \quad (3)$$

Так как угол между векторами \vec{dl} и \vec{r} $\alpha = 90^\circ$, то $\sin \alpha = 1$, тогда подставляя (3) в (2), получим

$$dB_{\parallel} = dB \frac{R}{r} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \cdot \frac{R}{r} dl. \quad (4)$$

Проинтегрировав, по всему контуру $l = 2\pi R$, и учитывая, что $r = \sqrt{R^2 + x^2}$ получим выражение для нахождения магнитной индукции на оси кругового тока на расстоянии x от его центра

$$B = \int_0^{2\pi R} dB_{\parallel} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{IR}{r^3} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (5)$$

3. Магнитное поле на оси соленоида

Соленоидом называется цилиндрическая катушка, состоящая из большого числа витков изолированной проволоки, по которой течет ток (рис.3).

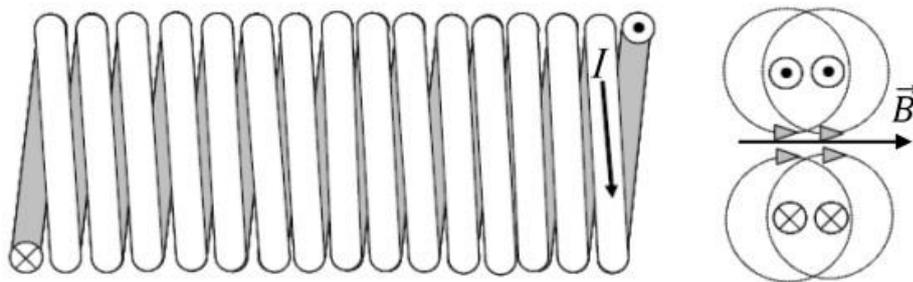


Рис. 3

Если витки катушки прилегают так плотно, что шаг винтовой линии достаточно мал, то каждый виток соленоида можно приближенно заменить замкнутым витком. Из соображений симметрии ясно, что силовые линии магнитного поля внутри соленоида направлены вдоль его оси, и вектор магнитной индукции составляет с направлением тока в соленоиде правовинтовую систему (рис. 3).

Магнитное поле на оси соленоида радиусом R и длиной L , по которому течет ток I , можно рассчитать следующим образом. Выделим на соленоиде на расстоянии x_1 от его левого края бесконечно узкое кольцо шириной dx_1 (рис.4).

Число витков dN в этом кольце равно числу витков в единице длины соленоида $n=N/L$, умноженному на ширину кольца dx_1

$$dN = n \cdot dx_1. \quad (6)$$

Сила тока dI в выделенном кольце равна

$$dI = I \cdot dN = I n \cdot dx_1. \quad (7)$$

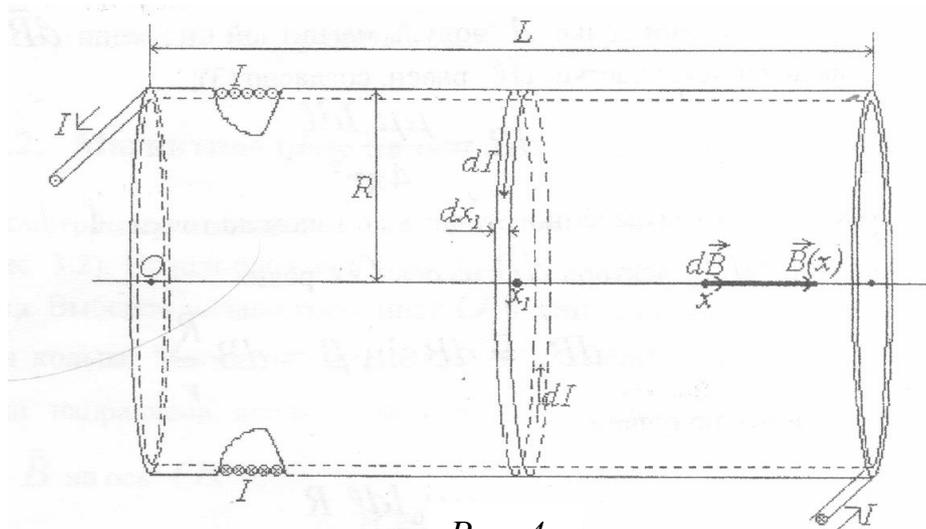


Рис. 4

Направим ось Ox вдоль оси соленоида, выбрав начало координат O на левом краю соленоида. В точке A с координатой x , которая отстоит от выделенного кольца на расстоянии $(x - x_1)$, модуль dB магнитной индукции $\vec{dB}(x)$, созданной током в выделенном кольце, равен, согласно (5) с силой тока $I n dx_1$. Величина индукции магнитного поля, создаваемая этим участком на оси соленоида согласно (5), равна:

$$dB(x) = \frac{\mu_0 R^2}{2} \cdot \frac{dI}{(R^2 + (x - x_1)^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (8)$$

А после подстановки (7) в (8) получаем

$$dB(x) = \frac{\mu_0 R^2}{2} \cdot \frac{Indx_1}{(R^2 + (x - x_1)^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (9)$$

Модуль $B(x)$ магнитной индукции $\vec{B}(x)$, созданной в точке A током во всем соленоиде, равен интегралу от выражения (9) при изменении координаты выделенного кольца x_1 от 0 до L :

$$B(x) = \int_0^L dB(x) = \int_0^L \frac{\mu_0 R^2}{2} \cdot \frac{In}{(R^2 + (x - x_1)^2)^{\frac{3}{2}}} dx_1. \quad (10)$$

После интегрирования в (10) получаем для модуля магнитной индукции $B(x)$ на оси соленоида (в точке на расстоянии x от его края) выражение

$$B(x) = \frac{\mu_0 In}{2} \left(\frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} - \frac{x - L}{\sqrt{R^2 + (x - L)^2}} \right). \quad (11)$$

При многослойной обмотке соленоида поле в точках наблюдения является результатом наложение полей отдельных слоев, каждое из которых рассчитывается по формуле (11). Поэтому, качественно, поле соленоида (многослойного) имеет такой же характер, как и поле однослойного.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Принципиальная электрическая схема установки представлена на рис. 5. Основными элементами схемы являются:

- 1 – миниблок «Тесламетр»;
- 2 – миниблок «Цилиндрическая катушка»;
- 3 – зонд с датчиком Холла;
- 4 – усилитель напряжения (в составе миниблока «Тесламетр»).

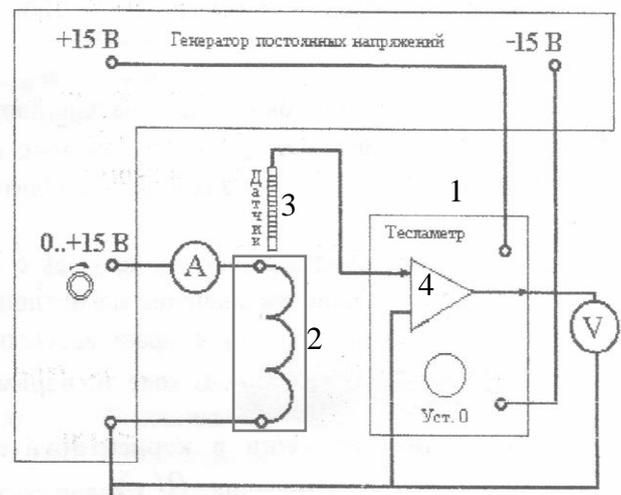


Рис. 5

Для экспериментального измерения величины магнитного поля на оси соленоида в данной работе используется *датчик Холла*, который представляет собой тонкую прямоугольную пластинку площадью в несколько квадратных миллиметров. К датчику крепятся четыре электрода для подвода тока и снятия разности потенциалов Холла, которая измеряется вольтметром.

Явление Холла заключается в возникновении напряжения (разности потенциалов) при протекании постоянного электрического тока через проводящую пластинку, помещенную в постоянное магнитное поле, перпендикулярного плоскости пластинки и направлению тока (рис.6).

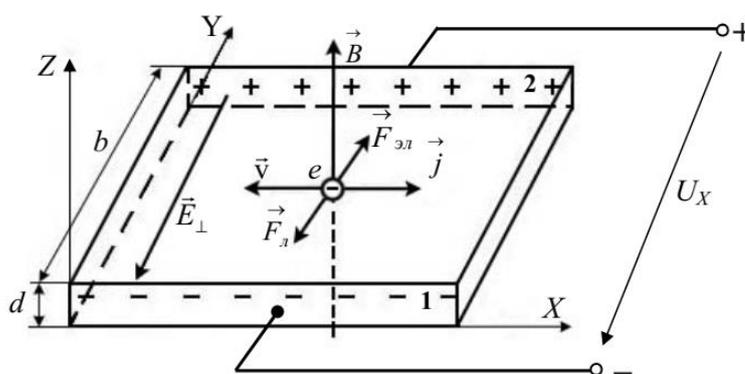


Рис. 6

Простейшая теория эффекта Холла объясняет появление напряжения Холла взаимодействием носителей тока с магнитным полем. В отсутствие внешнего магнитного поля в проводнике под действием постоянного электрического поля имеет место направленное движение электронов e со скоростью \vec{v} , создающих ток плотностью \vec{j} (рис. 6). При наложении магнитного поля \vec{B} на заряды действует сила Лоренца F_L , под действием которой частицы отклоняются в направлении, перпендикулярном \vec{v} и \vec{B} . В результате смещения электронов к одной из граней (на рисунке 6 она обозначена цифрой 1) в проводнике возникает перпендикулярное направлению тока электрическое поле E_{\perp} – поле Холла. В свою очередь, поле Холла действует на заряды с силой $F_{эл}$ и уравновешивает силу Лоренца. В условиях равновесия сил:

$$eE_{\perp} = evB. \quad (12)$$

Принимая во внимание связь плотности тока \vec{j} со скоростью направленного движения \vec{v} и концентрацией n носителей заряда $j=evn$, и пользуясь соотношением (12), для напряжения Холла U_X получим:

$$U_X = E_{\perp} b = vBb = \frac{j}{qn} Bb = \frac{I}{qnS} Bb = \frac{I}{qndb} Bb = \frac{1}{qn} \cdot \frac{IB}{a} = R_H \frac{IB}{d}, \quad (13)$$

где $R_H = \frac{1}{qn}$ – постоянная Холла;

b и d – ширина и толщина пластинки соответственно;

I – сила тока в пластине.

Из (13) видно, что U_X пропорциональна величине создаваемого магнитного поля \vec{B} (в нашем случае магнитного поля соленоида).

Используемый в данной работе миниблок «Тесламетр» предназначен для измерения магнитной индукции. Он имеет зонд с датчиком Холла на конце, который можно вводить внутрь катушки. Вдоль оси зонда нанесены риски через 5 мм. Они позволяют определять расстояние, на которое перемещается датчик внутри катушки. Датчик расположен перпендикулярно оси зонда, т.е. он измерят аксиальную (параллельную оси катушки) составляющую магнитной индукции. Напряжение Холла поступает в миниблок на вход усилителя напряжения, к выходу которого подключается вольтметр.

На рис. 7 представлена монтажная схема установки. К установленному на наборном поле миниблоку «Тесламетр» подводится нерегулируемое напряжение ± 15 В относительно средней точки (\perp). К выходам миниблока подключается мультиметр в режиме вольтметра (режим $\overline{\text{---}} 2$ V, входы COM и V Ω) для измерения напряжения Холла. Для компенсации несимметрии датчика Холла и дрейфа «нуля» усилителя на миниблоке имеется ручка управления «Установка нуля» (обозначена как «Уст. 0»). Чувствительность тесламетра отрегулирована изготовителем и составляет 0,1 В/мТл. Контроль установки «нуля» и ее корректировку необходимо проводить время от времени в течение всего опыта.

Миниблок «Цилиндрическая катушка» подключается к источнику регулируемого напряжения ± 15 В относительно средней точки (\perp). С помощью ручки регулятора напряжения на генераторе можно изменять величину тока через катушку. Для фиксации значения тока в цепь катушки включается мультиметр в режиме миллиамперметра (режим $\overline{\text{---}}200$ mA, входы COM, A).

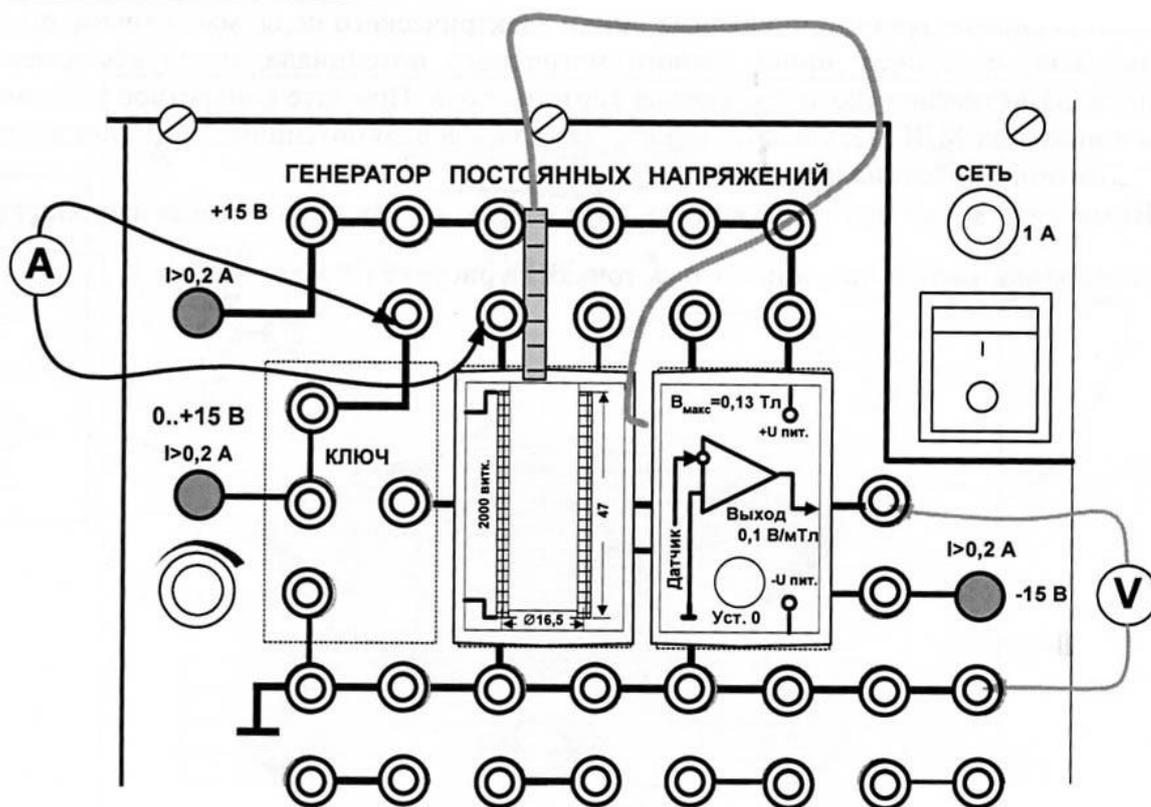


Рис. 7

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите электрическую цепь экспериментальной установки согласно монтажной схеме (рис. 7).
2. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений и расчетов

Таблица 1

№ риски на зонде	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10	-15
x , мм	0	5	10	15	20	25	30	40	45	50	55	60	65
U , В													
$B_{\text{экс}}$, мТл													
$B_{\text{теор}}$, мТл													

3. Настройте амперметр для измерения постоянного тока не более 0,2 А, а на вольтметре установите предел напряжения 2 В.

4. Включите сначала кнопку «Сеть» на блоке мультиметров.

5. Разомкните цепь питания катушки (выньте из гнезда наборной панели штырек провода от амперметра) и включите блок генераторов кнопкой «Сеть».

6. При выключенном питании катушки установите как можно точнее нулевое показание вольтметра ручкой установки нуля (обычно удаётся получить $U < 20$ мВ).

7. Проверив предварительно установку регулируемого напряжения генератора на минимальное значение (ручка регулятора должна быть выкручена против часовой стрелки до упора), включите питание катушки и установите с помощью ручки регулятора ток от 150 до 170 мА (по заданию преподавателя).

8. Перемещая зонд с датчиком Холла вдоль оси катушки с шагом 5 мм, запишите в таблицу 1 координаты и соответствующие им значения напряжения $U_x(x)$ на выходе тесламетра. Координату $x=0$ удобно принять на краю катушки.

9. В ходе эксперимента время от времени отключайте питание катушки и корректируйте установку нуля тесламетра.

10. Закончив измерения, установите регулятор тока на минимальное значение и отключите блок генераторов напряжений и блок мультиметров кнопками «Сеть».

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Для каждого значения x вычислите экспериментальные значения магнитной индукции по формуле

$$B_{\text{эксп}} [\text{мТл}] = 10 U [\text{В}], \quad (14)$$

и запишите эти значения в таблицу 1.

2. Постройте график зависимости $B_{\text{эксп}}(x)$. Предварительно выберите удобные масштабы и нанесите шкалы с масштабными значениями по осям.

3. Вычислите теоретические значения магнитной индукции $B_{\text{теор}}$ для тех же точек по формуле (11) и занесите найденные значения в таблицу 1. В расчетах принять $R=0,00825$ м, $L=0,047$ м, $N=2000$.

4. Постройте график $B_{\text{теор}}(x)$ на одной координатной плоскости с графиком $B_{\text{эксп}}(x)$.

5. Сравните полученные графики и сделайте вывод о поведении магнитной индукции:

- в середине длинной катушки;
- вблизи ее краев;
- вне катушки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется магнитным полем? В чем состоит принципиальное отличие магнитного поля от электростатического?

2. Сформулируйте закон Био – Савара – Лапласа. Как, пользуясь этим законом, можно определить направление и величину магнитной индукции поля тока в любой точке пространства?

3. Что собой представляют силовые линии магнитного поля? Изобразите силовые линии магнитного поля для прямого бесконечного проводника с током, для кругового витка и для соленоида.

4. Как определяется магнитная индукция в центре кругового витка с током и в произвольной точке, лежащей на перпендикуляре, проведенном через центр этого витка? Проведите выводы соответствующих формул.

5. Какой вид должна иметь зависимость магнитной индукции от расстояния вдоль оси от центра катушки? Получите данную зависимость.

6. В чем заключается эффект Холла? Проведите вывод соотношения, определяющего напряжение Холла.

7. Что представляет собой датчик для измерений магнитного поля? Опишите методику измерения магнитного поля катушки.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие: рек. Мин. обр. РФ/ Т.И. Трофимова.-8-15-е изд., стер.- М.: Высш. шк., 2005-2010. §§ 109, 110, 117, 119.

2. Савельев, И.В., Курс общей физики: учеб. пособие: в 3-х т. / И.В. Савельев.- 5-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2006. т.2 §§40, 42, 43, 47, 50, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59.
3. Курс физики : учеб. пособие для студ. вузов / А. А.Детлаф, Б.М.Яворский. -8-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. §§ 21.1, 21.2, 22.1, 22.2, 23,2.