НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

ФЭЛ-3

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ХОЛЛА.

Тула, 2007 г

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ХОЛЛА

Цель работы: ознакомление с одним из методов получения магнитного поля в пространстве при помощи плоской катушки с током, экспериментальное определение значений магнитной индукции на оси соленоида.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.
Магнитное поле соленоида

Известно, что источником магнитного поля являются либо постоянные магниты, либо проводники с током.

Между проводниками, по которым протекают электрические токи, возникают пондеромоторные (механические) силы взаимодействия, зависящие от силы этих токов и расположения проводников относительно друг друга.

Во всех точках пространства, окружающего произвольный проводник с током, всегда существует обусловленное этим током поле сил. Это поле называется *магнитным полем тока*. Термин «магнитное поле» был введен английским физиком М. Фарадеем, считавшим, что как электрические, так и магнитные взаимодействия осуществляются посредством единого материального поля.

Природа макроскопического магнитного поля, создаваемого проводниками с током, заключается в движении электрически заряженных микрочастиц (электронов, протонов, ионов).

Основной характеристикой магнитного поля, представляющей собой среднее значение суммарного действия микроскопических полей, созданных отдельными микрочастицами, является вектор *магнитной индукции* $\vec{B}$.

Очевидно, что значение и направление магнитной индукции $\vec{B}$ движущегося заряда будет зависеть от величины самого заряда, его скорости и удаленности до точки измерения индукции. Если вместо заряда взять элементарный проводник – *элемент тока* – $Id\vec{l}$, можно рассчитать для него вектор магнитной индукции для любой точки пространства, в котором находится проводник.

Закон *Био-Савара-Лапласа* позволяет определить вектор индукции магнитного поля, созданного элементом тока:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{\left[d\vec{l} \times \vec{r}\right] I}{r^3}, \qquad (1)$$

где $Id\vec{l}$ – элемент тока; I – сила тока в проводнике; $d\vec{l}$ – вектор, равный по модулю длине dl проводника и совпадающий по направлению с направлением тока; μ – магнитная проницаемость среды (для вакуума μ=1);

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный от середины элемента проводника к точке, в которой определяется магнитная индукция.

Направления вектора $d\vec{B}$ – *силовые линии магнитного поля* – определяются правилом векторного произведения, и представляют собой концентрические окружности, центр которых лежит на прямой, проходящей через элемент $d\vec{l}$. Векторы $d\vec{l}$, $\vec{r}$, $d\vec{B}$ образуют правовинтовую систему (рис. 1).

Величина вектора магнитной индукции $d\vec{B}$ может быть выражена следующим образом:

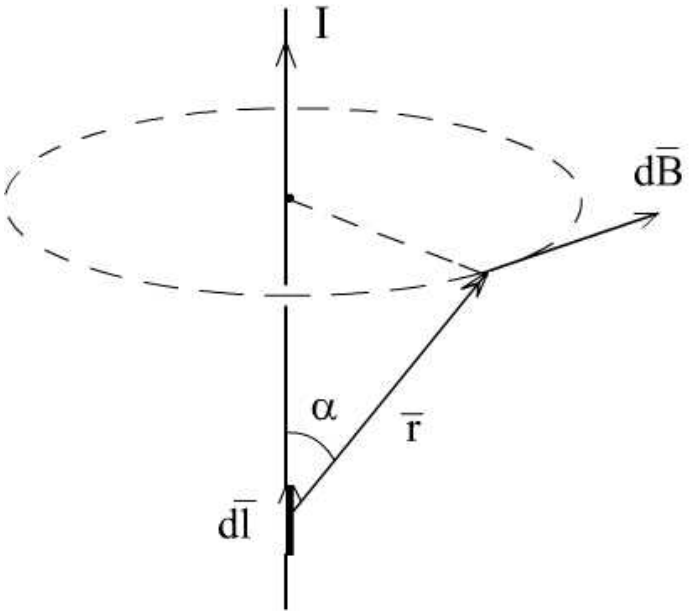

Рис. 1

$$\left|d\vec{B}\right| = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \sin\alpha}{r^2} dl, \qquad (2)$$

где α – угол между векторами $d\vec{l}$ и $\vec{r}$.

Рассмотрим круговой проводник с током.

Определим величину и направление вектора магнитной индукции $\vec{B}$ в какой-либо точке, лежащей на перпендикуляре, проведенном через центр этого витка (рис. 2).

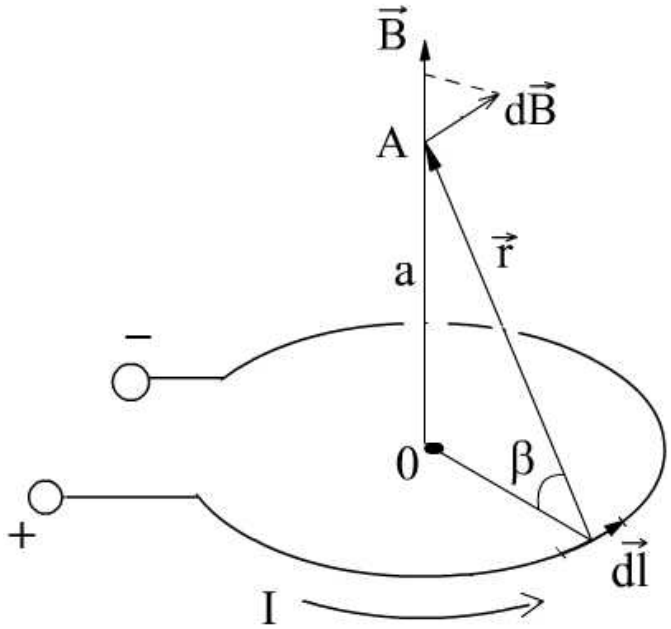

Рис. 2

Выделим на кольцевом проводнике с током радиуса R элемент $d\vec{l}$. От этого элемента проведем радиус-вектор $\vec{r}$ в т.А, лежащую на оси симметрии. Направление вектора $d\vec{B}$ в т. А определяется векторным произведением (1).

Согласно принципу суперпозиции магнитных полей, результирующая индукция магнитного поля в т. А является суммой полей всех элементов, составляющих круговой проводник.

Результирующее поле будет направлено вдоль оси симметрии, а его величину вычислим интегрированием

$$B = \int_L dB \cos\beta = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} I \cos\beta \frac{\sin\alpha}{r^2} \int_0^{2\pi R} dl, \qquad (3)$$

где α – угол между вектором $\vec{r}$ и вектором $d\vec{l}$ (α=90^0);

β – угол между вектором $\vec{r}$ и радиусом кругового проводника R, проведенном к элементу $d\vec{l}$;

$2\pi R$ – длина кругового проводника.

Проведя интегрирование, получим

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} I \cos\beta \frac{2\pi R}{r^2} = \frac{\mu\mu_0}{2} \frac{IR^2}{\left(a^2 + R^2\right)^{3/2}}, \qquad (4)$$

где a – расстояние от центра кольца до т. А;

I – сила тока в кольце (в обмотке плоской катушки).

Если круговой проводник находится в воздухе, то магнитную проницаемость среды μ, входящую в формулу (4), можно приближенно считать равной 1.

Магнитное поле соленоида. Соленоидом называется цилиндрическая катушка, состоящая из большого числа витков изолированной проволоки, по которой течет ток. Если шаг винтовой линии достаточно мал, то каждый виток соленоида можно приближенно заменить замкнутым витком. Из соображений симметрии ясно, что линии вектора магнитной индукции внутри соленоида направлены вдоль его оси, причем вектор составляет с направлением тока в соленоиде правовинтовую систему (рис.3).

Магнитное поле на оси соленоида можно рассчитать следующим образом. Выделим малый участок dl длины соленоида, на него придется ndl витков ($n=N/L$ – число витков на единицу длины, N – общее число витков, L – длина соленоида). Обозначим силу тока в каждом витке через I, тогда участок dl соленоида можно рассматривать как круговой ток силы $Indl$. Индукция магнитного поля, создаваемая этим участком на оси соленоида согласно (4), равна:

$$dB_x = \frac{\mu_0 R^2 Indl}{2\left(R^2 + x^2\right)^{3/2}} \qquad (5)$$

где x – расстояние по горизонтальной оси от участка dl до точки А, R – радиус витка (рис.4).

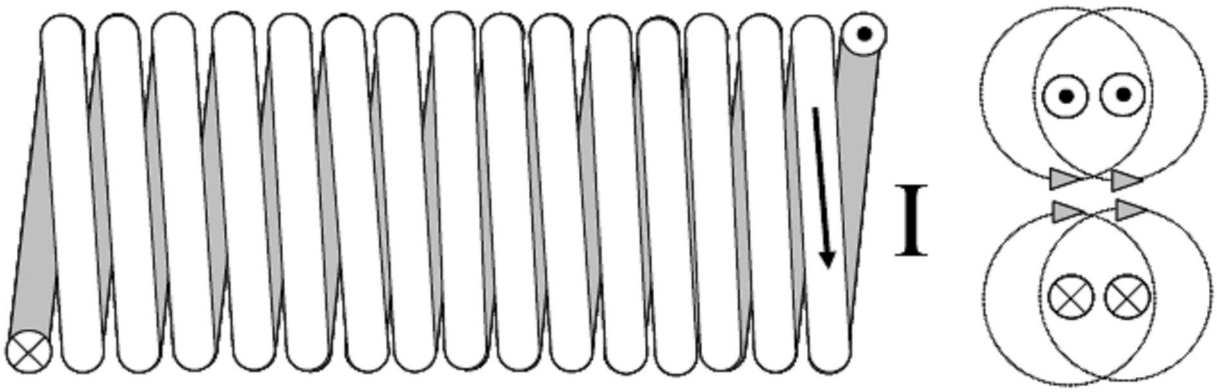

Рис.3

Введем угол β между положительным направлением оси соленоида (положительное направление оси соленоида связано с направлением тока в соленоиде правилом буравчика) и радиус-вектором, проведенным из рассматриваемой точки к участку dl, тогда $x=R\mathrm{ctg}\beta$, $r^2=R^2+x^2=R^2/\sin^2\beta$, откуда $dl=rd\beta=(Rd\beta)/\sin\beta$. Для dB_x имеем:

$$dB_x=\frac{\mu_0 In\sin\beta d\beta}{2} \qquad (6)$$

Для получения результирующего значения индукции магнитного поля в точке A, нужно просуммировать все dB_x, создаваемые всеми участками dl, то есть проинтегрировать выражение (5) по углу β:

$$B_x=\frac{\mu_0 In}{2}\int_{\beta_1}^{\beta_2}\sin\beta d\beta=\frac{\mu_0 In}{2}\left(\cos\beta_1-\cos\beta_2\right)=\frac{\mu_0 In}{2}\left(\cos\beta_1+\cos\beta_3\right) \qquad (7)$$

где $\cos\beta_1=\dfrac{L-a}{\sqrt{R^2+\left(L-a\right)^2}}$, $\cos\beta_3=\dfrac{a}{\sqrt{R^2+a^2}}$

Для точки, находящейся у левого края соленоида $\beta_3=\pi/2$, поэтому индукция вычисляется по формуле $B=\dfrac{\mu_0 In}{2}\cos\beta_1$. Для бесконечно длинного соленоида $\beta_1=0$ и $\beta_2=\pi$, откуда индукция магнитного поля внутри такого соленоида равна B=$?_0 nI$.

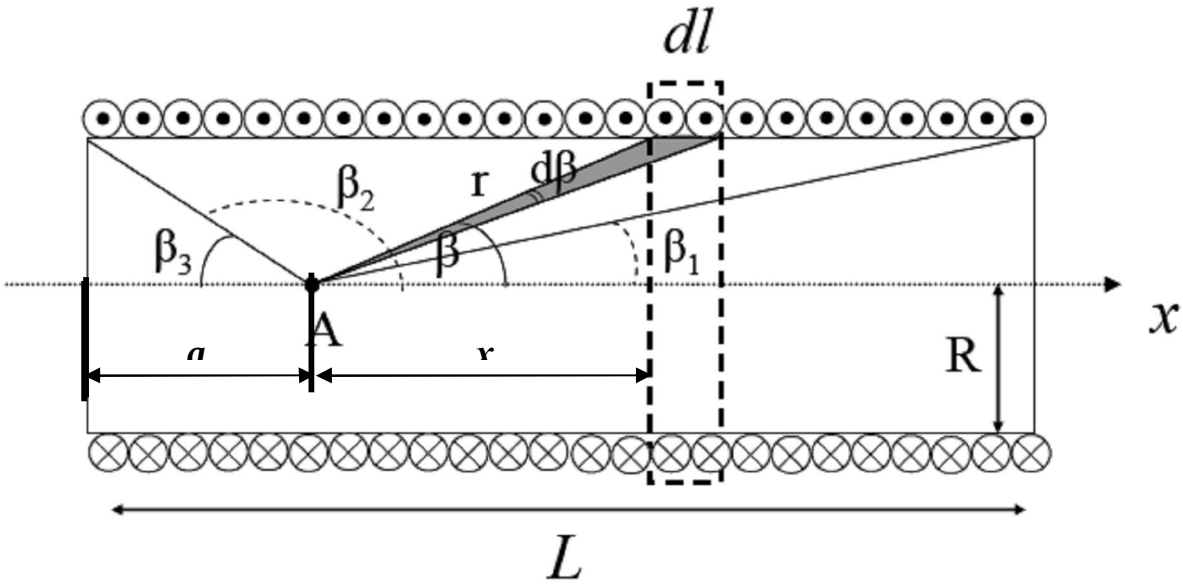

Рис.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальный метод измерения магнитного поля. Эффект Холла.

Для экспериментального измерения величины магнитного поля на оси соленоида в данной работе используется датчик Холла. Явление Холла заключается в возникновении разности потенциалов при протекании постоянного электрического тока через проводящую пластинку, помещенную в постоянное магнитное поле, перпендикулярное плоскости пластинки и направлению тока. Простейшая теория эффекта Холла объясняет появление ЭДС Холла взаимодействием носителей тока с магнитным полем. В отсутствие внешнего магнитного поля в проводнике под действием постоянного электрического поля имеет место направленное движение зарядов q со скоростью $\vec{v}$ (рис.5).

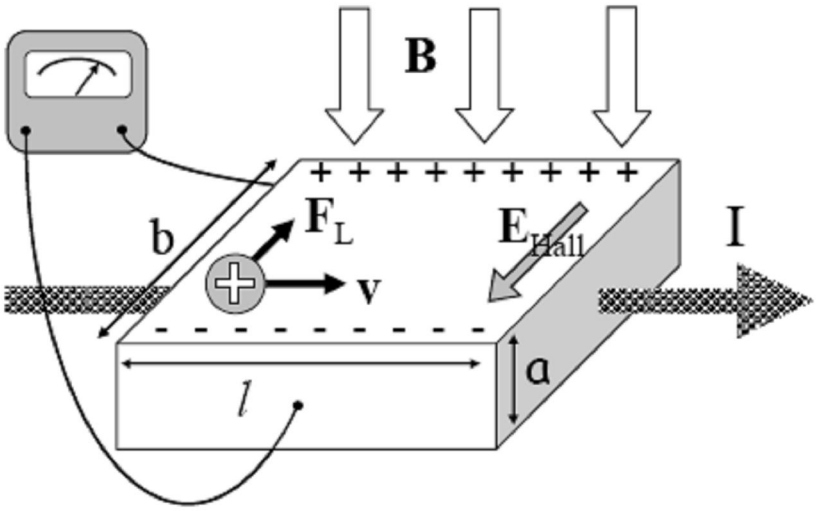

Рис.5

При наложении магнитного поля $\vec{B}$, на заряды действует сила Лоренца под действием которой частицы отклоняются в направлении, перпендикулярном $\vec{v}$ и $\vec{B}$. В результате пространственного разделения носителей заряда в проводнике возникает перпендикулярное направлению тока электрическое поле E_{Hall}. В свою очередь поле Холла действует на заряды и уравновешивает силу Лоренца. В условиях равновесия:

$$qE_{Hall} = qvB \tag{8}$$

Принимая во внимание связь плотности тока *j* со скоростью направленного движения $\vec{v}$ и концентрацией *n* носителей заряда, получаем выражение для разности потенциалов Холла:

$$\begin{aligned} U_{Hall} &= E_{Hall}b = vBb = \frac{j}{qn}Bb = \frac{I}{qnS}Bb = \frac{I}{qnab}Bb = \frac{1}{qn}\cdot\frac{IB}{a} \\ &= R_{Hall}\frac{IB}{a}, \end{aligned} \tag{9}$$

В этом выражении $R_H = \dfrac{1}{qn}$ - постоянная Холла, *a* и *b* – поперечные размеры пластинки. Из выражения (9) видно, что U_{Hall} пропорциональна величине создаваемого магнитного поля *B* (в нашем случае – магнитного поля соленоида).

Датчик Холла представляет собой тонкую прямоугольную пластину площадью несколько $мм^2$ и имеет 4 электрода для подвода тока и измерения разности потенциалов Холла U_{Hall}, которая затем переводится в величину поля *B*. Величина индукции магнитного поля, создаваемая внутри соленоида индуцируется на цифровом индикаторе.

Экспериментальная установка

Соленоид, магнитное поле которого надо определить, представляет собой совокупность большого количества витков медного провода, близко расположенных на непроводящем каркасе.

Вдоль оси катушки, перпендикулярно ее плоскости, расположена измерительная линейка, на конце которой укреплен чувствительный датчик Холла. Координаты положения датчика *a* определяются относительно левого края катушки $x_{лев}$=19 см (*a=0 см*) до правого края катушки $x_{прав}$=2 см (*a=17 см*). Длина соленоида L=0,17 м, количество витков N=550, средний радиус намотки витков R=0,025м, средний ток катушки I=1,1 А.

Ключ К «ИЗМЕРЕНИЕ» служит для замыкания цепи катушки (в это время через катушку с достаточно малым активным сопротивлением проходит постоянный ток, поэтому кнопку К не следует держать нажатой постоянно более 30 секунд).

Тесламетр, собранный на основе высокочувствительного датчика Холла, применяемый в этой работе, позволяет определить магнитное поле с точностью $\pm 0,2$ мТл. При этом показания датчика колеблются возле некоторого среднего значения в пределах ошибки.

Порядок выполнения

1. В исходном состоянии измерительная линейка должна быть вдвинута в катушку до упора. Переключатель «СЕТЬ» в положение «ВЫКЛ».
2. Включить установку в сеть напряжением ~220 В. Перевести переключатель «СЕТЬ» на панели в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный светодиод.
3. Поместить измерительный датчик Холла у левого края катушки. Координата положения датчика при этом x=19 см (по измерительной линейке «ПОЛОЖЕНИЕ»), *a=0 см* (относительно катушки).
4. Замкнуть ключ К «ИЗМЕРЕНИЕ» и записать показания измерительного прибора Тесламетра в таблицу 1. Магнитное поле индуцируется на жидкокристаллическом индикаторе в мТл, показания прибора могут изменяться в пределах ошибки определения поля $\pm 0,2$ мТл относительно среднего значения. В таблицу 1 следует записывать среднее значение показаний, определенное за некоторый промежуток времени (ключ К при этом не следует держать нажатым более 30 секунд).
5. Переместить измерительную линейку вправо на 1 см. Координата положения относительно катушки *a=19-x* (см) где *x* – положение датчика по измерительной линейке и повторить действия п.4.
6. Провести измерение поля вдоль оси катушки, повторяя пп. 4, 5, каждый раз перемещая датчик на 1 см до правого края катушки с *x=2 см* (*a=17 см*). Все измеренные значения занести в таблицу 1.
7. Для каждого положения датчика *a* провести теоретический расчет магнитного поля по формуле (7) и построить теоретический график распределения поля с нанесенными на него экспериментальными точками.

8. По окончании работы, вернуть измерительную линейку в исходное положение, плавно вдвинув ее до упора. Перевести переключатель «СЕТЬ» в положение «ВЫКЛ» и выключить установку из сети.

Табл. 1

а, м	**0**	**0.01**	**0,02**	**…**	**0.17**
<$B_{изм}$>					
$B_{расч.}$					

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что является источником магнитного поля в данной установке?
2. Назовите параметры, с помощью которых можно описать магнитное поле.
3. Изобразите магнитные силовые линии для прямого бесконечного проводника с током и для соленоида.
4. Напишите закон Био-Савара-Лапласа. Объясните, как, пользуясь этим законом, можно определить направление и величину магнитной индукции в любой точке пространства.
5. Что означают магнитные константы μ и μ_0 ?
6. Как взаимодействуют два проводника с током, расположенные вблизи друг друга?
7. Объясните разницу между индукцией B и индуктивностью L?
8. Что такое магнитный поток? Как рассчитать его величину?
9. Как определяется магнитная индукция в центре кругового проводника с током? Вывод.
10. Почему в датчике измерений появляется электрический ток?
11. Объясните, что означает закон электромагнитной индукции.
12. Как определить ЭДС индукции и ЭДС самоиндукции?
13. Каково соотношение между фазами напряжения на катушке и на датчике?
14. Какой вид должна иметь зависимость индукции B от расстояния вдоль оси от центра катушки?
15. Как изменяется магнитное поле вдоль перпендикуляра, проведенного через центр катушки?
16. В чем заключается методика измерения магнитного поля катушки?
17. Опишите работу установки по приведенной блок-схеме.
18. Может ли катушка создавать постоянное магнитное поле? Позволяет ли данная методика измерять такое поле?
19. Что такое соленоид? Можно ли данную катушку с током считать соленоидом?
20. Каким проводом должна быть намотана катушка?

21. Что представляет собой датчик измерений магнитного поля?

22. Какова сила тока в датчике измерений? Как ее изменить?

23. Как изменятся показания датчика, если его перемещать в сторону от оси, проходящей через центр катушки? Почему?