

Кафедра физики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3э.3

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ

Минск 2022

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3э.3

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Цель работы:

1. Ознакомиться с одним из методов измерения индукции магнитного поля.
2. Изучить магнитное поле тока катушки.
3. Проверить справедливость принципа суперпозиции магнитных полей.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Магнитное поле – это силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды, проводники с током и на тела, обладающие магнитным моментом (независимо от состояния их движения). Эти же объекты являются источниками магнитных полей.

Магнитное поле создается токами в электролитах, электрическими разрядами в газах, катодными и анодными лучами, проявляется при движении электронов в атомах, при колебаниях атомных ядер в молекулах, при изменении ориентации элементарных диполей в диэлектриках и т.д. Природа этих источников едина; магнитное поле возникает в результате движения заряженных микрочастиц (электронов, протонов, ионов), а также благодаря наличию у микрочастиц собственного (спинового) магнитного момента.

Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции \vec{B} . Вектор \vec{B} определяет силу, действующую в данной точке поля на движущийся электрический заряд, проводник с током или на тело, обладающее магнитным моментом \vec{p}_m .

В СИ единица магнитной индукции получила название **Тесла (Тл)**:

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}.$$

Магнитного аналога электрическому заряду в природе не существует. Пробным объектом, пригодным для определения и измерения магнитного поля может быть элементарный контур с током, магнитным полем которого можно пренебречь.

Количественной характеристикой контура с током I является его магнитный момент \vec{p}_m :

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}, \quad (1)$$

где S – площадь поверхности, ограниченной контуром L ; \vec{n} – единичный вектор нормали к этой поверхности.

Направление тока и нормали к поверхности образуют правовинтовую систему (Рис. 1).

На плоский контур с током, помещенный в однородное магнитное поле, действует, момент сил

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}], \quad (2)$$

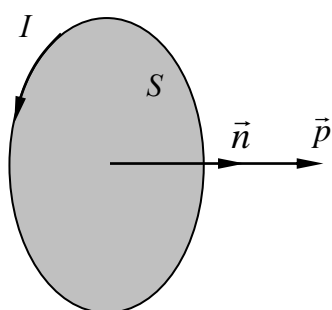


Рис. 1

В положении устойчивого равновесия контура $\vec{p}_m \uparrow \vec{B}$. Модуль момента сил – $M = p_m B \sin(\vec{n}, \vec{B})$. Из соотношения (2.6.2) можно получить величину магнитной индукции

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m},$$

где M_{\max} – максимальный момент сил, действующий на контур с током. Направление вектора \vec{B} определяется направлением магнитного момента \vec{p}_m в равновесном положении контура.

Основной задачей теории магнитного поля является расчет характеристик магнитного поля произвольной системы токов и движущихся электрических зарядов. В основе метода расчета магнитных полей лежит **принцип суперпозиции**: магнитное поле, порождаемое несколькими движущимися зарядами (токами) в данной точке пространства, равно векторной сумме магнитных полей, порождаемых каждым зарядом (током) в этой точке в отдельности

$$\vec{B}(\vec{r}) = \sum_i \vec{B}_i(\vec{r}), \quad (3)$$

Согласно закону Био-Савара-Лапласа, элемент проводника $d\vec{l}$ (Рис.2.6.2), по которому идет ток I , создает в точке N , находящейся на радиус-векторе \vec{r} от направленного элемента длины $d\vec{l}$, вектор индукции магнитного поля

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

где μ_0 – магнитная постоянная ($\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м); μ – магнитная проницаемость среды. Элемент $d\vec{l}$ направлен по касательной $\vec{\tau}$ к проводнику по току.

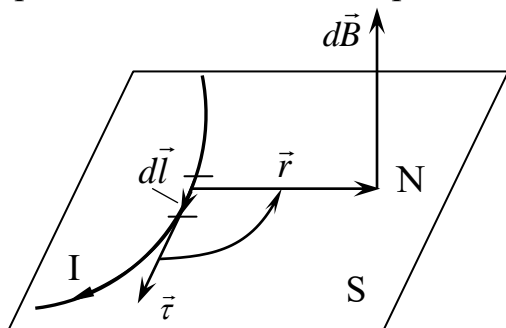


Рис.2

Вектор $\vec{B}(\vec{r})$ перпендикулярен плоскости S , содержащей векторы $d\vec{l}$ и \vec{r} (Рис. 2). Направление вектора $d\vec{B}$ определяется по правилу векторного произведения: если смотреть с конца этого вектора, то кратчайший поворот от первого вектора в произведении $d\vec{l}$, ко второму \vec{r} происходит против часовой стрелки. Модуль индукции магнитного поля, создаваемого проводником с током I в точке N , будет определяться путем интегрирования модуля dB по всей длине проводника

Применяя закон Био-Савара-Лапласа и принцип суперпозиции, можно рассчитать индукцию магнитного поля, создаваемого токами различных конфигураций проводников. В частности, магнитное поле, создаваемое кольцевым проводником с током I в произвольной точке, лежащей на оси проводника на расстоянии x от его плоскости:

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{I R^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

где R – радиус кругового проводника.

Типичные графики зависимости величины индукции B как функции расстояния x вдоль оси для разных направлений тока изображены на рис. 3.: $B_1(x)$ – график для индукции магнитного поля левой катушки, $B_2(x)$ – график для поля правой катушки, $B_p(x)$ – график для результирующего поля двух катушек с токами противоположенного направления.

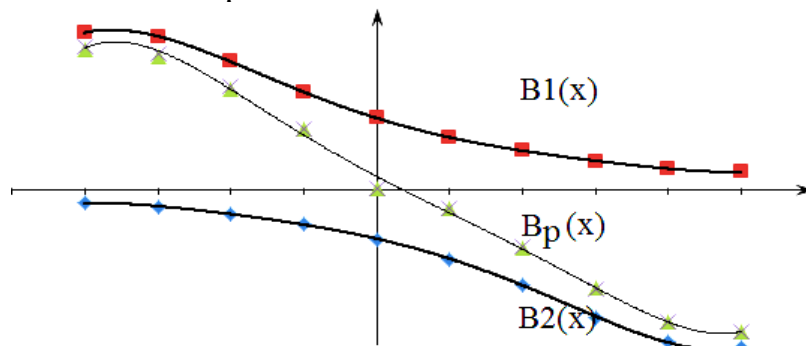


Рис.3

В работе исследуются магнитные поля двух соосных катушек, расположенных друг от друга на расстоянии *порядка их радиуса*, по виткам которых идут *постоянные токи* противоположного направления (Рис. 4). Индукция магнитного поля в любой точке на оси катушек равна в торной сумме полей, создаваемых этими катушками по отдельности в той же точке

$$\vec{B}(x) = \vec{B}_1(x) + \vec{B}_2(x). \quad (6)$$

Проецируя (6) на ось Ox , получаем:

$$B_x(x) = B_{1x}(x) + B_{2x}(x).$$

Для измерения индукции магнитного поля в работе применяется осциллограф. Метод измерения величины магнитной индукции основан на явлении электромагнитной индукции – возникновении ЭДС индукции в измерительной катушке (зонде) при изменении магнитного потока Φ через поверхность, ограниченную витками катушки.

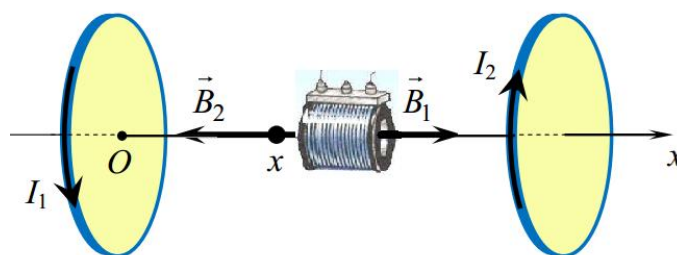


Рис.4

Измерительная катушка (зонд) небольших размеров расположена на оси OX так, чтобы вектор $\vec{B}(x)$ был перпендикулярен к плоскости ее витков. Величина магнитной индукции B_x определяется по изменению магнитного потока через поперечное сечение зонда при включении тока *постоянной величины* в катушках, создающих магнитное поле. Вследствие этого в обмотке зонда наводится ЭДС индукции \mathcal{E} , которая создает импульс тока и заряжает конденсатор C до определенной разности потенциалов, отображаемой на экране осциллографа в виде одиночного импульса, амплитуда которого $U = V_{amp}$, зависит от координаты зонда на оси.

Величина индукционного тока I , определяется из закона Ома:

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7)$$

где R – полное сопротивление цепи.

Этот ток за время Δt перенесет через измерительную цепь заряд

$$Q = \int_0^{\Delta t} I_i dt = -\frac{1}{R} \int_0^{\Phi} d\Phi = -\frac{\Phi}{R} \quad (8)$$

и сформирует импульс напряжения на конденсаторе C амплитудой $U = \frac{Q}{C}$.

Так как магнитный поток через поперечное сечение катушки

$$\Phi = -B_x S N,$$

где S – площадь ограниченной витком поверхности, в пределах которой поле можно считать однородным, N – число витков катушки, то согласно формуле (2.6.8), по цепи пройдет заряд

$$Q = \frac{B_x S N}{R}. \quad (9)$$

Измеряя амплитуду импульса $U = V_{amp}$ на цифровом осциллографе при переносе заряда Q через измерительную цепь, можно вычислить магнитную индукцию по формуле

$$B_x = \frac{UCR}{NS}. \quad (10)$$

Принципиальная схема установки изображена на рис. 6. Исследуемые поля катушек L_1 и L_2 , создаются постоянным током. Амплитуда напряжения U на конденсаторе C показана с правой стороны в меню осциллографа как V_{amp} .

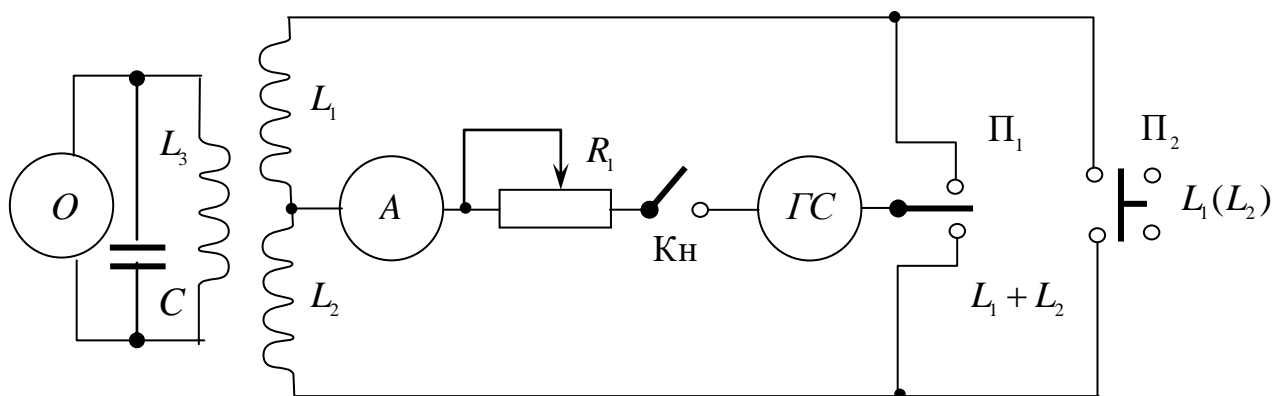


Рис.6

Измерительная катушка L_3 жестко насажена на стержень, с помощью которого может перемещаться вдоль осей катушек L_1 и L_2 . Параллельно катушке L_3 подключена емкость C . Полное сопротивление измерительной цепи R равно сумме сопротивлений катушки L_3 , соединенных проводов и осциллографа.



ЗАДАНИЕ

1. Для каждой из катушек L_1 и L_2 измерить на их оси через каждый сантиметр максимальное значение амплитуды импульса сигнала U осциллографа при включении тока, создающего поле. При этом необходимо учитывать знак U : ориентированная вверх кривая импульса сигнала соответствует $U > 0$, а вниз – $U < 0$.

Рассчитать проекцию магнитной индукции B_x на оси катушек по формуле (10). Данные измерений и расчетов занести в табл. 1. Проекция вектора магнитной индукции B_x на ось OX вносится со знаком, соответствующим полярности импульса на экране осциллографа.

Таблица 1

$x,$ 10^{-2} м	L_1		L_2		$B_{1x} + B_{2x},$ Тл	$L_1 + L_2$	
	$U_1, В$	$B_{1x},$ Тл	$U_2, В$	$B_{2x},$ Тл		$U_p, В$	$B_{px},$ Тл
-4							
-3							
...							
0							
...							
3							
4							

Построить зависимости $B_{1x} = B_{1x}(x)$ и $B_{2x} = B_{2x}(x)$ на одних координатных осях.

2. Прodelать аналогичные измерения результирующего магнитного поля при одновременном протекании тока в катушках L_1 и L_2 . Результаты измерений и расчетов проекции результирующей магнитной индукции B_{px} внести в Табл. 1.

Построить графики алгебраической суммы проекций функций магнитных полей $B(x) = B_{1x}(x) + B_{2x}(x)$ и результирующего поля катушек $B_{px}(x)$ на одних координатных осях.

3. Провести анализ полученных результатов. Сделать заключение о выполнении в последнем случае принципа суперпозиции полей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение магнитного поля. Назвать его источники. Сформулировать принцип суперпозиции магнитных полей.
2. Записать закон Био – Савара – Лапласа. Как определить направление вектора $d\vec{B}$?
3. В чем состоит явление электромагнитной индукции? Определить направления индукционного тока в измерительной катушке при включении и выключении тока в катушке, создающей магнитное поле.
4. Перечислить все физические явления, лежащие в основе предложенного метода исследования магнитного поля катушек.
5. Пояснить принцип работы используемой схемы.
6. Используя закон Био – Савара – Лапласа и принцип суперпозиции магнитных полей, получить формулу (2.6.5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Иродов, И. Е. Основные законы электромагнетизма / И. Е. Иродов. – М. : Высш. шк., 1983.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 2: Электричество и магнетизм/ И. В. Савельев. – М. : Астрель: АСТ, 2004.
3. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: – в 5 т. / Д. В. Сивухин. – М. : Физматлит, МФТИ, 2002 – 2005. – 5 т.
4. Электромагнетизм : лаб. практикум по курсу «Физика» / М. С. Сергеева-Некрасова [и др.]; под общ. ред. В. И. Мурзова, – Минск : БГУИР, 2011.