

Лабораторная работа 3.1

**Определение индукции магнитного поля
соленоида и взаимной индуктивности
двух катушек**

Лабораторная работа 3.3.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА И ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ ДВУХ КАТУШЕК

Цель работы : изучение закона Био-Савара-Лапласа и его применение для расчета индукции магнитного поля; применение закона Фарадея для измерения индукции магнитного поля и взаимной индуктивности катушек.

Рекомендуемая литература: [1 - § 109, 110, 119, 128];

[2 - § 22.1, 22.2, 22.3];

[3 - § 40-41].

Теоретические сведения

Соленоидом называется цилиндрическая катушка, состоящая из большого количества витков, плотно прилегающих друг к другу. При пропускании по обмотке тока внутри соленоида возникает магнитное поле.

Для расчета магнитной индукции поля соленоида пользуются законом Био-Савара-Лапласа (В.6). При этом представляет соленоид как

систему круговых токов с общей осью (рис. 1.1).

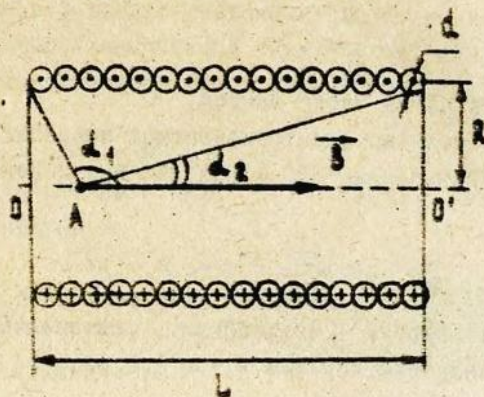


рис. 1.1

По принципу суперпозиции результирующее значение магнитной индукции B поля соленоида в любой точке пространства определяется как векторная сумма B_i полей, создаваемых каждым витком. Для точек, лежащих на оси соленоида $O-O'$, направления B_i совпадают (определяются по правилу правого винта), поэтому сложение векторов B_i можно заменить сложением их модулей: $B = \sum_{i=1}^N B_i$, где N — число витков.

Рассмотрим соленоид длиной L , радиусом витков R , по которому течет ток силой I . Пусть на единицу длины соленоида приходится $n_0 = \frac{N}{L}$ витков (n_0 — плотность намотки).

Элементарный участок соленоида длиной dl , на котором укладывается $n_0 dl$ витков, можно рассматривать как круговой ток силой $n_0 dl \cdot I$.

Этот ток создает в некоторой точке A магнитное поле с индукцией dB :

$$dB = \frac{\mu_0 (n_0 dl \cdot I) R^2}{2 (r^2 + R^2)^{3/2}} \quad (1.1)$$

где r — расстояние от центра витка до рассматриваемой точки A (см. рис. 1.1).

Заменяя в этой формуле переменную r на переменную α — угол, под которым виден радиус рассматриваемого витка из точки A (подробнее см. [2, § 22.21], получим:

$$dB = - \frac{\mu_0 I \cdot n_0}{2} \sin(\alpha) \cdot d\alpha \quad (1.2)$$

Для получения результирующего значения B интегрируем (1.2) в пределах от α_1 до α_2 (см. рис. 1.1):

$$B = \frac{\mu_0 I \cdot n_0}{2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{\mu_0 I \cdot n_0}{2} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (1.3)$$

здесь $\cos \alpha_1 = -1 / \sqrt{R^2 + r_1^2}$; $\cos \alpha_2 = (L - r_1) / \sqrt{R^2 + (L - r_1)^2}$.

Очевидно, что индукция максимальна в центре соленоида при $L = L/2$, т.е. $\cos \alpha_2 = -\cos \alpha_1 = 1 / \sqrt{1 + (2 \cdot R / L)^2}$, а с удалением точки A от центра в ту или другую сторону уменьшается.

Если $L \gg R$ соленоид считают бесконечно длинным, тогда

$$B = \mu_0 n_0 I \quad (1.4)$$

Между катушками L_1 и L_2 существует индуктивная связь. Она проявляется в частности в том, что при протекании по соленоиду L_1 переменного тока в катушке L_2 наводится ЭДС индукции. Количественно индуктивная связь характеризуется взаимной индуктивностью.

Взаимная индуктивность катушек L_1 и L_2 есть скалярная величина, равная отношению потокоосцепления взаимной индукции катушки L_2 к силе тока в катушке L_1 , определяющем это потокоосцепление:

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{I_1} \quad (1.5)$$

Если по соленоиду L_1 идет ток I_1 , то внутри соленоида магнитная индукция $B_1 = \mu_0 n_0 I_1$ (1.4). Потокоосцепление взаимной индукции катушки L_2 , находящейся внутри соленоида L_1 на его оси: $\Psi_{21} = n_2 B_1 S = \mu_0 n_0 \cdot n_2 I_1 \cdot S$, где $S = \pi \cdot r_2^2$ — площадь сечения катушки L_2 , n_2 — число витков этой катушки. Тогда

$$M_{21} = \mu_0 n_0 \cdot n_2 \cdot S$$

ЭДС взаимной индукции, наведенная в катушке L_2 определяется как

$$E_{21} = - \frac{d\psi_{21}}{dt} = - M_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (1.6)$$

Если $I_1 = I_m \sin \omega t$, то $E_{21} = M_{21} I_m \omega \cos \omega t$, действующее значение $E_{21} = M_{21} \omega \cdot I$, откуда

$$M_{21} = \frac{E_{21}}{I_1 \omega} = \frac{E_{21}}{I_1 \cdot 2\pi \nu} \quad (1.7)$$

где $\omega = 2\pi \nu$, ν - частота переменного тока.

✓ Описание лабораторной установки и методики эксперимента

В лабораторной работе исследуется зависимость индукции магнитного поля на оси соленоида от силы тока в его обмотке и расположения исследуемой точки на оси соленоида индукции. Для измерения B используется явление электромагнитной индукции. Электрическая схема лабораторной установки приведена на рис.1.2.

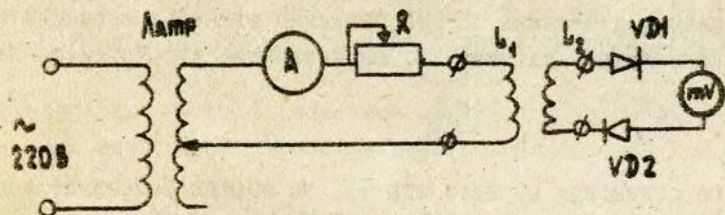


рис.1.2

В ее состав входят ЛАТР, амперметр А, реостат R, исследуемый соленоид L_1 , измерительная катушка L_2 и милливольтметр мВ. Измерительная катушка размещена коаксиально с исследуемым соленоидом и может перемещаться вдоль его оси.

При пропускании через соленоид L_1 переменного тока $i = I \sin \omega t$, внутри соленоида возникает также магнитное поле, индукция которого в произвольной точке на оси может быть рассчитана по выражению (1.3).

При этом площадь сечения S_2 измерительной катушки L_2 с числом витков n_2 пронизывается переменным магнитным потоком $\Phi = n_2 B_m S_2 \sin \omega t$, где B_m - амплитудное значение индукции магнитного поля исследуемого соленоида в точке нахождения измерительной катушки L_2 .

По закону Фарадея в катушке L_2 будет наводиться переменная ЭДС:

$$E_i = - \frac{d\Phi}{dt} = B_m \omega n_2 S_2 \cos \omega t \quad (1.8)$$

При постоянных значениях ω , n_2 , S значение E_i пропорционально B_m и зависимость (1.5) может служить для измерения B .

Подключенный к катушке L_2 милливольтметр измеряет действующее значение ЭДС так, что:

$$B = \frac{E_i}{n S \omega} = \frac{E_i}{n \cdot 2\pi r^2 \cdot 2\pi \nu} \quad (1.9)$$

где r - радиус измерительной катушки;

ν - частота переменного тока в сети, $\nu = 50$ Гц.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Исследование зависимости индукции магнитного поля соленоида от положения точки на его оси.

1. Измерить и записать:

для соленоида: его длину L , радиус R , плотность намотки n_0 ;

для измерительной катушки: радиус r , число витков n_2 .

2. По формуле (1.3), задаваясь значением тока $I = 1$ А, рассчитать максимальное значение B_{max} , которое наблюдается в центре соленоида.

3. Рассчитать положение точек на оси (значение l), для которых $B = 0.9B_m$; $0.75B_m$; $0.6B_m$.

4. Построить примерный график зависимости $B/B_m = f(l_1/L)$.

5. Собрать схему рис. 1.2. Установить измерительную катушку в центре соленоида.

6. Включить питание. Изменяя силу тока с помощью ЛАТРа от 0,1 до 2 А, измерить милливольтметром значение ЭДС индукции, наводимой в измерительной катушке L_2 .

Результаты занести в табл. 1

Таблица 1

Номер опыта	I, A	\mathcal{E}_2, B	$B, Tл$	$B_{расч}, Tл$
1	0,1			
2	0,5			
3	1,0			
4	1,5			
5	2,0			

Рассчитать по данным табл. 1, п. 1 значение B . Сравнить с рассчитанными в п. 2 для $I = 1 A$.

7. Установить ток в соленоиде $I = 1 A$. Перемещая измерительную катушку вправо и влево от центра, т.е. изменяя l_1 , измерять соответствующие значения \mathcal{E}_2 . Данные занести в табл. 2.

Таблица 2

Номер опыта	$l_1, м$	l_1/L	\mathcal{E}_2, B	$B, Tл$
1				
2				
3				
4				
...	...			

Рассчитать по формуле (1.9) значения B . Построить график зависимости $B/B_m = f(l_1/L)$. Сравнить с построенным в п. 4. Сделать вывод.

Задание 2. Измерение взаимной индуктивности соленоида и измерительной катушки.

1. Рассчитать по данным п. 1 задания 1 и формуле (1.6) взаимную индуктивность соленоида и измерительной катушки.

2. Провести подобные расчеты для других измерительных катушек, предложенных преподавателем.

3. Устанавливая измерительные катушки в центр соленоида и задавая значение тока $I = 1 A$, определить соответствующие значения ЭДС взаимоиндукции \mathcal{E}_{21} . По формуле (1.7) рассчитать значения M_{21} и сравнить их с полученными в пп. 1 и 2.

Контрольные вопросы

1. В чем суть метода измерения магнитной индукции, применяемого в данной работе?
2. Как определить направление вектора B ?
3. Что такое соленоид? Охарактеризуйте магнитное поле соленоида.
4. Почему меняется значение индукции при перемещении измерительной катушки вдоль оси соленоида?
5. Каким образом используется в данной работе явление электромагнитной индукции?
6. От чего зависят значения ЭДС электромагнитной индукции?
7. Охарактеризуйте явление взаимной индукции.