

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4П. ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА

**Цель работы:** определение магнитных полей, создаваемых вдоль оси длинной и короткой катушек.

### Описание лабораторной установки и вывод расчётных зависимостей

Примерная картина магнитного поля на оси короткой и длинной катушек приведена на рис. 4.1.

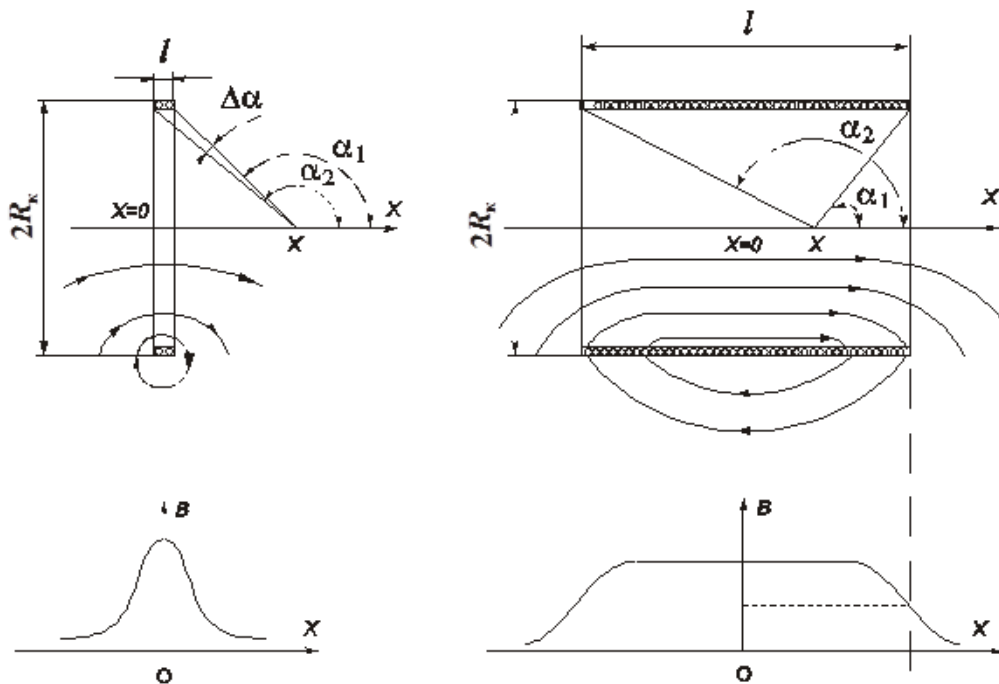


Рис. 4.1

Значение магнитной индукции на оси катушки рассчитывается по формуле

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2l} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = \frac{\mu_0 IN}{2l} \left( \frac{l/2 - x}{\sqrt{(l/2 - x)^2 + R_k^2}} + \frac{l/2 + x}{\sqrt{(l/2 + x)^2 + R_k^2}} \right), \quad (4.1)$$

где  $I$  – ток, протекающий по катушке,  $N$  – число витков катушки;  $l$  – длина катушки, м;  $A$ ;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы между направлением оси  $x$  и радиус-векторами, проведёнными из точки на оси к краям катушки, рад;  $x$  – координата точки на оси катушки, в которой определяется величина магнитной индукции (рис. 4.1), м;  $R_k$  – радиус катушки, м.

Если выполняется соотношение  $2R_k \ll l$  (такую катушку называют соленоидом), то в точке с координатой  $x = l/2$  (торец)  $\alpha_1 = \pi/2$  и  $\alpha_2 \approx \pi$ , а в центре соленоида ( $x = 0$ )  $\alpha_1 \approx 0$  и  $\alpha_2 \approx \pi$ . В этом случае для расчёта

величины магнитной индукции на оси соленоида в центре  $B_{\text{ц}}$  и в торце  $B_{\text{т}}$  из (4.1) получим

$$B_{\text{ц}} = \frac{\mu_0 I N_{\text{с}}}{l} = \mu_0 I n, \quad (4.2)$$

$$B_{\text{т}} = \frac{\mu_0 I N_{\text{с}}}{2l} = \frac{\mu_0 I n}{2}, \quad (4.3)$$

где  $N_{\text{с}}$  – число витков соленоида;  $n = N_{\text{с}}/l$  – число витков на единицу длины соленоида,  $\text{м}^{-1}$ .

Если выполняется соотношение  $l \ll 2R_{\text{к}}$  и  $\Delta\alpha \rightarrow 0$ , то с учётом того, что  $\alpha_2 = \alpha_1 + \Delta\alpha$ ;  $\cos\Delta\alpha \approx 1$  и  $\sin\Delta\alpha \approx \Delta\alpha$ , получаем

$$\begin{aligned} \cos\alpha_1 - \cos\alpha_2 &= \cos\alpha_1 - \cos(\alpha_1 + \Delta\alpha) = \cos\alpha_1 - \cos\alpha_1 \cos\Delta\alpha + \\ &+ \sin\alpha_1 \sin\Delta\alpha = \Delta\alpha \sin\alpha_1. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Из геометрических построений на рис. 4.1 следует:

$$\Delta\alpha = \frac{l \sin \alpha_1}{\sqrt{(x - l/2)^2 + R_{\text{к}}^2}} \approx \frac{l \sin \alpha_1}{\sqrt{x^2 + R_{\text{к}}^2}}; \quad \sin \alpha_1 \approx \frac{R_{\text{к}}}{\sqrt{x^2 + R_{\text{к}}^2}}. \quad (4.5)$$

Таким образом, подставив (4.4) в (4.1), с учётом 4.5) получим формулу для магнитной индукции на оси катушки

$$B_{\text{к}} = \frac{\mu_0 I N_{\text{к}} R_{\text{к}}^2}{2(x^2 + R_{\text{к}}^2)^{3/2}}, \quad (4.6)$$

где  $N_{\text{к}}$  – число витков короткой катушки.

Формула (4.6) совпадает с формулой для расчёта магнитной индукции витков с током, которую можно получить, используя закон Био-Савара-Лапласа.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 4.2. Установка состоит из лабораторного модуля 1, амперметра 2, милливольтметра 3 и выносного элемента 4. В качестве измерительных приборов используются мультиметры.

Выносной элемент включает в себя соосно смонтированные на подставке катушки: длинную 5 и короткую 6. В процессе работы они могут быть поочередно присоединены к лабораторному модулю. Модуль служит для обеспечения электропитания выносного элемента. На панели модуля изображена принципиальная электрическая схема, а также установлены гнезда 11 для штекеров короткой и длинной катушек. На катушки подаётся переменное напряжение частотой  $\nu = 50$  Гц. Для регулирования силы тока в цепь включён резистор  $R$  с переменным сопротивлением. Миллиамперметр, измеряющий ток в катушке, подключается через гнезда

"РА" на панели лабораторного модуля. При прохождении через катушку переменного тока возникает переменное магнитное поле.

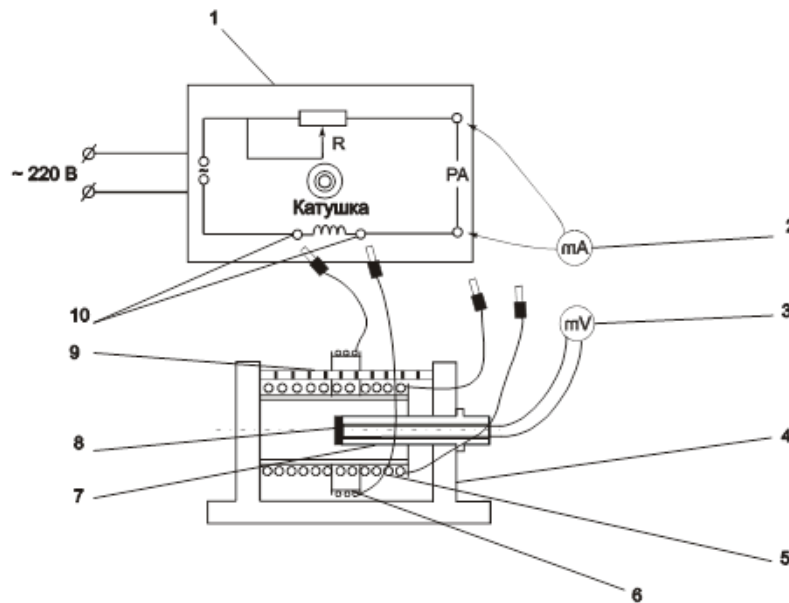


Рис. 4.2

В качестве датчика магнитной индукции используется измерительная рамка 8, расположенная вблизи катушек на штоке 7. Для удобства определения координаты рамки на штоке имеются сантиметровые деления. При полностью введённом штоке рамка располагается точно в середине длинной катушки. Через шток выведен коаксиальный кабель, с помощью которого измерительная рамка присоединяется к милливольтметру. Короткая катушка насажена на стержень 9 и может передвигаться вдоль него. Положение катушки может определяться с помощью сантиметровых делений на стержне.

Под действием переменного магнитного поля катушки в измерительной рамке возникает ЭДС индукции. Так как сопротивление милливольтметра, подключённого к измерительной рамке, довольно велико (не менее 1 МОм), можно считать, что измеряемая милливольтметром разность потенциалов будет равна ЭДС индукции. Ток в катушке изменяется по гармоническому закону, поэтому мгновенное значение магнитной индукции в любой точке изменяется во времени по тому же закону  $B = B_0 \cos \omega t$ , где  $B_0$  – амплитудное значение магнитной индукции, Тл;  $\omega = 2\pi\nu$  – циклическая частота, рад/с.

Измерительная рамка располагается так, что плоскость её витков перпендикулярна линиям индукции. Радиус рамки  $r_p \ll R$ , поэтому поле в

пределах рамки можно считать однородным в каждый момент времени. Магнитный поток сквозь рамку  $\Phi = BS_p$ , где  $S_p$  – площадь рамки,  $m^2$ .

В соответствии с законом электромагнитной индукции в рамке индуцируется ЭДС, мгновенное значение которой

$$E = -N_p \frac{d\Phi}{dt},$$

где  $N_p$  – число витков измерительной рамки.

Учитывая закон изменения магнитной индукции во времени, получим

$$E = -N_p S_p \frac{dB}{dt} = N_p S_p B_0 \omega \sin \omega t = E_0 \sin \omega t,$$

где  $E_0$  – амплитудное значение ЭДС, В.

Таким образом, магнитная индукция однозначно связана с ЭДС, возникающей в рамке:

$$B_0 = \frac{E_0}{N_p S_p \omega}. \quad (4.7)$$

Помещая измерительную рамку в разные точки на оси катушки и измеряя величину возникающей ЭДС индукции, можно получить распределение магнитной индукции вдоль оси.

Необходимые для расчётов характеристики приведены в табл. 4.1. В ней величины с индексом "с" относятся к соленоиду, а с индексом "к" к катушке.

Таблица 4.1

$N_c$	$N_k$	$N_p$	$R_c$ , мм	$R_k$ , мм	$l_c$ , мм	$l_k$ , мм	$\omega$ , рад/с

## Порядок проведения измерений и выполнения расчётов

### Тарировка индукционного датчика

1. Подключить к лабораторному модулю соленоид.
2. Полностью ввести шток в соленоид.
3. Установить с помощью резистора с переменным сопротивлением максимально возможное значение тока соленоида и измерить значение ЭДС индукции.
4. Прodelать 4-5 измерений ЭДС индукции, уменьшая каждый раз значение тока на 0,2 А. Результаты занести в табл. 4.2.

5. Милливольтметр и миллиамперметр показывают действующие значения ЭДС и тока, которые в  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитудных. Подставляя действующие значения токов в формулу (4.2), рассчитать соответствующие значения магнитной индукции, а затем значения  $S_p$  для каждого значения тока, учитывая, что в соответствии с уравнением (4.7)

$$S_p = \frac{E}{BN_p\omega},$$

где  $E$  – действующее значение ЭДС, В;  $B$  – значение магнитной индукции, рассчитанное по формуле (4.2), Тл.

6. Рассчитать среднеарифметическое значение площади измерительной рамки  $\langle S_p \rangle$ . Результаты занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

$I, A$	$E, B$	$B, Tл$	$S_p, м^2$	$\langle S_p \rangle, м^2$
...				

### Определение магнитной индукции на оси соленоида

1. Установить значение тока соленоида, равное 1 А.
2. Полностью ввести шток в соленоид.
3. Перемещая шток на 1 деление (1 см), снять зависимость ЭДС от координаты. Результаты записать в табл. 4.3.
4. Рассчитать экспериментальные значения магнитной индукции по формуле

$$B_{c.эксп} = \frac{E}{N_p S_p \omega}. \quad (4.8)$$

5. Рассчитать теоретическое значение магнитной индукции на оси соленоида  $B_{c.теор}$  по формуле (1.1) во всех точках, в которых производились измерения.

6. Построить графики  $B_{c.теор} = f(x)$  и  $B_{c.эксп} = f(x)$  в одних координатных осях.

Таблица 4.3

$x, см$	$E, мВ$	$B_{c.эксп}, Tл$	$B_{c.теор}, Tл$
0			
1			
...			
11			

### Определение магнитной индукции на оси короткой катушки

1. Установить значение тока катушки, равное 1 А.
2. Установить шток в такое положение, чтобы вне соленоида находилось два деления штока. Перемещая катушку вдоль соленоида, добиться максимального показания милливольтметра, присоединённого к рамке. В этом положении измерительная рамка на штоке оказывается точно в центре катушки ( $x = 0$ ).
3. Перемещая шток каждый раз на 1 см, снять зависимость  $E = f(x)$ .
4. По формуле (4.8) рассчитать экспериментальное значение магнитной индукции  $B_{к.эксп}$  на оси катушки для каждого значения координаты.
5. По формуле (4.6) рассчитать теоретическое значение магнитной индукции  $B_{к.теор}$  на оси катушки для каждого значения координаты.
6. Результаты измерений и расчётов записать в табл. 4.4.
7. Построить графики  $B_{к.теор} = f(x)$  и  $B_{к.эксп} = f(x)$ .

Таблица 4.4

$x$ , см	$E$ , мВ	$B_{к.эксп}$ , Тл	$B_{к.теор}$ , Тл
-2			
-1			
0			
1			
...			
11			

### Контрольные вопросы

1. Что такое магнитная индукция?
2. Вывести формулу для расчёта магнитной индукции на оси витка с током на расстоянии  $x$  от его плоскости, используя закон Био-Савара-Лапласа.
3. Вывести формулу для расчёта магнитной индукции на оси соленоида в произвольной точке.
4. На чём основан метод измерения магнитной индукции, применённый в работе? Какая величина измеряется непосредственно? От чего она зависит?

**Лабораторная работа № 4**  
**Определение магнитной индукции соленоида и катушки**

Состав работы:

- лабораторный модуль \_\_\_\_\_ 1 шт.
- электронный осциллограф ОСУ – 10В \_\_\_\_\_ 1 шт.
- микроультиметр ( МУ-67) \_\_\_\_\_ 2 шт.
- адаптер АС-DC \_\_\_\_\_ 2 шт.
- соленоид с катушкой \_\_\_\_\_ 1 шт.
- полка \_\_\_\_\_ 1 шт.

Параметры соленоида: длина  $l = 15$  см. , число витков  $N_1 = 1750$

Параметры катушки : длина  $l = 9$  мм., диаметр  $D = 88$  мм. , число витков  $N_2 = 750$ .

Примечание: параметры датчика индукционного типа ( NS )- произведение числа витков датчика на площадь его сечения – определяются путём его тарировки.