

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4-1.

### Изучение магнитного поля соленоида.

#### Цели работы:

1. Ознакомление с методом измерения магнитной индукции на основе эффекта электромагнитной индукции.
2. Исследование распределения индукции магнитного поля на оси соленоида.

#### Теоретические основы лабораторной работы.

По закону Био-Савара-Лапласа и принципу суперпозиции вектор магнитной индукции, создаваемой одиночным круговым витком в любой точке на его оси

$$B_{\text{витка}} = \frac{\mu_0 I R^2}{2r^3}, \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ,  $I$  – сила тока,  $R$  – радиус витка,  $r$  – расстояние от элемента витка до точки на оси, в которой вычисляется поле.

Рассмотрим участок шириной  $dz$  соленоида с равномерной очень плотной намоткой. На нем расположены  $\frac{N}{L} dz$  витков.

$$dB = \frac{\mu_0 I R^2}{2r^3} \cdot \frac{N}{L} dz. \quad (2)$$

Пусть  $\theta$  и  $d\theta$  – углы, под которыми видны дальний конец участка шириной  $dz$  и сам участок из точки на оси, где вычисляется магнитная индукция. Тогда  $dz = r d\theta / \sin\theta$ ,  $r = R / \sin\theta$ . Отсюда:

$$dB = \frac{\mu_0 I N}{2L} \sin\theta d\theta. \quad (3)$$

Пусть  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  – углы, под которыми видны концы соленоида.

$$dB = \frac{\mu_0 I N}{2L} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta = \frac{\mu_0 I N}{2L} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2). \quad (4)$$

Введем координатную ось  $z$ , направленную вдоль оси соленоида с началом в центре соленоида и вычислим  $\cos\theta_1$  и  $\cos\theta_2$ .

$$B(z) = \frac{\mu_0 I N}{2L} \left( \frac{\frac{1}{2}L - z}{\sqrt{R^2 + (\frac{1}{2}L - z)^2}} + \frac{\frac{1}{2}L + z}{\sqrt{R^2 + (\frac{1}{2}L + z)^2}} \right) \quad (5)$$

где  $L$  – длина соленоида.

Величину магнитной индукции соленоида можно измерить с помощью эффекта электромагнитной индукции. Для этого через соленоид пропускается переменный ток невысокой частоты. Поле соленоиде в этом случае также является переменным, но соотношения между мгновенным значением магнитной индукции и мгновенным значением тока (например, между амплитудными значениями) точно такие же, как в случае постоянного тока. Если в это переменное магнитное поле поместить небольшую измерительную катушку, то в ней в соответствии с законом электромагнитной индукции наводится ЭДС. По величине этой ЭДС можно вычислить амплитудное значение магнитной индукции в месте расположения измерительной катушки.

Индукция магнитного поля соленоида в работе изменяется по гармоническому закону:

$$B(t) = B_m \cos(2\pi\nu t), \quad (6)$$

где  $B_m$  – амплитудное значение магнитной индукции,  $t$  – время,  $\nu$  – частота. Если ось измерительной катушки совпадает с осью симметрии соленоида, то суммарный магнитный поток поля соленоида через все витки измерительной катушки равен

$$\Phi(t) = \frac{\pi d^2}{4} N_{\text{ик}} B(t), \quad (7)$$

где  $d$  – средний диаметр измерительной катушки,  $N_{\text{ик}}$  – число её витков. По закону электромагнитной индукции в измерительной катушке наводится ЭДС  $\mathcal{E}(t) = -\frac{d\Phi}{dt}$ . Предполагается, что ток в самой измерительной катушке достаточно мал, и самоиндукцией в ней можно пренебречь.

$$\mathcal{E}(t) = \frac{\pi d^2 \nu}{2} N_{\text{ик}} B_m \sin(2\pi\nu t). \quad (8)$$

Если сопротивление вольтметра подключенного к катушке значительно больше, чем сопротивление катушки, то его показания фактически совпадают с ЭДС в цепи измерительной катушки. Вольтметр для переменного гармонического сигнала показывает действующее значение ЭДС  $\mathcal{E}_d$ , которое меньше амплитудного значения в  $\sqrt{2}$  раз.

$$\mathcal{E}_d = \frac{\pi d^2 \nu}{2\sqrt{2}} N_{\text{ик}} B_m. \quad (9)$$

$$B_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2 d^2 \nu N_{\text{ИК}}} \mathcal{E}_d. \quad (10)$$

### Результаты измерений и их обработка.

№ точки	$z_{\text{ш}}, \text{ мм}$	$\mathcal{E}_d, \text{ мВ}$	$B_m^{(\Theta)}, \text{ мТл}$	$B_m^{(\Gamma)}, \text{ мТл}$
1	-100	0,163	2,24	1,78
2	-90	0,232	3,20	2,54
3	-80	0,286	3,94	3,20
4	-70	0,319	4,39	3,65
5	-60	0,340	4,68	3,93
6	-50	0,352	4,85	4,09
7	-40	0,362	4,99	4,19
8	-30	0,366	5,04	4,24
9	-20	0,368	5,07	4,27
10	-10	0,369	5,08	4,28
11	0	0,369	5,08	4,27
12	10	0,366	5,04	4,24
13	20	0,359	4,94	4,19
14	30	0,351	4,83	4,09
15	40	0,336	4,63	3,93
16	50	0,312	4,30	3,65
17	60	0,270	3,72	3,20
18	70	0,208	2,86	2,54
19	80	0,138	1,90	1,78
20	90	0,090	1,24	1,16

Средний диаметр намотки соленоида  $D = (0,059 \pm 0,0005) \text{ м}$ .

$L = (0,168 \pm 0,001) \text{ м}$ .

$N = 2600$ .

$d = (0,0204 \pm 0,0002) \text{ м}$ .

Толщина измерительной катушки  $\delta = (0,003 \pm 0,0001) \text{ м}$ .

$N_{\text{ИК}} = 1000$ .

$\nu = 50 \text{ Гц}$ .

Действующее значение тока  $I_d = 0,165 \text{ А}$ .

Предел измерения амперметра  $D_I = 0,25 \text{ А}$ .

Класс точности амперметра  $k_I = 0,5$ .

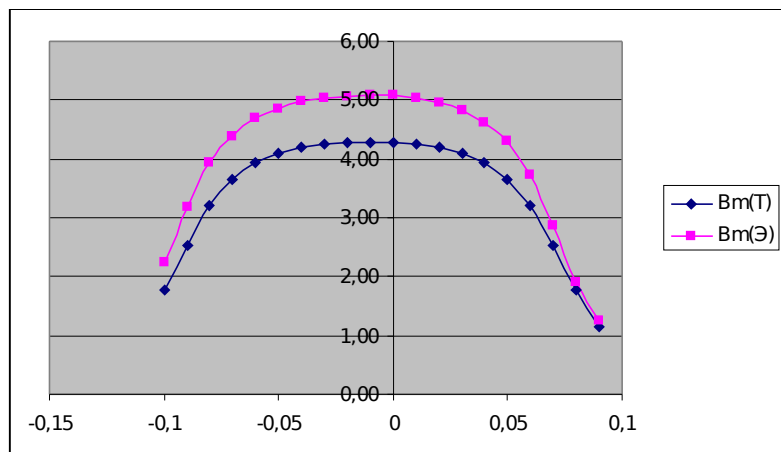
$\Delta \mathcal{E}_d = 0,002$ .

$\Delta I_d = I_d D_I k_I = 0,021 \text{ А}$ .

$I_m = I_d \times \sqrt{2} = 0,233 \text{ А}$ .

$z_0 = -10 \text{ мм}$ .

$\Delta z = 1 \text{ мм}$ .



$$\frac{\Delta B_m^{(\Theta)}}{B_m^{(\Theta)}} = \sqrt{\left(2 \frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mathcal{E}_d}{\mathcal{E}_d}\right)^2}.$$

$$\Delta B_m^{(\ominus)}(0)=0,1\text{ мТл.}$$

$$\Delta B_m^{(\text{T})}=\sqrt{\left(\left(\frac{\mu_0N}{2L}\left(\frac{L/2-z}{\sqrt{R^2+(L/2-z)^2}}+\frac{L/2+z}{\sqrt{R^2+(L/2+z)^2}}\right)\Delta l\right)^2+\left(\frac{\mu_0NID}{8L}\left(\frac{L/2-z}{(D^2/4+(L/2-z)^2)^{3/2}}+\frac{L/2+z}{(D^2/4+(L/2+z)^2)^{3/2}}\right)\Delta D\right.\right.}\\
+\left.\left.\left(\frac{\mu_0NI}{4L^2}\left(\frac{L(L/2-z)^2}{(D^2/4+(L/2-z)^2)^{3/2}}+\frac{L(L/2+z)^2}{(D^2/4+(L/2+z)^2)^{3/2}}-\frac{2z}{\sqrt{R^2+(L/2-z)^2}}+\frac{2z}{\sqrt{R^2+(L/2+z)^2}}\right)\Delta L\right)^2+\right.}\\
+\left.\left(\frac{\mu_0NI}{2L}\left(\frac{(L/2-z)^2}{(D^2/4+(L/2-z)^2)^{3/2}}-\frac{(L/2+z)^2}{(D^2/4+(L/2+z)^2)^{3/2}}-\frac{1}{\sqrt{R^2+(L/2-z)^2}}+\frac{1}{\sqrt{R^2+(L/2+z)^2}}\right)\Delta z\right)^2\right.}\\
\left. B_m^{(\text{T})}(0)=0,4\text{ мТл.}\right.$$