

## Лабораторная работа №1

# Определение напряженности магнитного поля Земли, изучение магнитных полей проводников с током

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение магнитных полей проводников с током различной формы.

### ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. проводники: круг, квадрат, треугольник, соленоид;
2. компас;
3. миллиамперметр;
4. источник питания.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**Магнитное поле** – одна из форм проявления электромагнитного поля.

Магнитное поле действует только на *движущиеся* электрически заряженные частицы или тела, на проводники с током и на частицы или тела, обладающие магнитным моментом, и создается этими же объектами.

Основными характеристиками магнитного поля являются магнитная индукция  $B$ , напряженность  $H$ , магнитный поток  $\Phi$ .

**Магнитная индукция  $B$**  – *силовая* характеристика магнитного поля, численно равная силе, действующей на единицу длины проводника, по которому течет ток единичной силы и который расположен перпендикулярно к направлению силовых линий.

$$B = \frac{F}{I \cdot l} \quad (1)$$

Другой *силовой* характеристикой магнитного поля является **напряженность  $H$** , которая не зависит от магнитных свойств среды и которая связана с  $B$  соотношением:

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;

$\mu_0$  – магнитная постоянная.

### Закон Био-Савара-Лапласа

Расчет  $B$  и  $H$  обычно проводят с помощью **закона Био-Савара-Лапласа**, который в дифференциальной форме записывается:

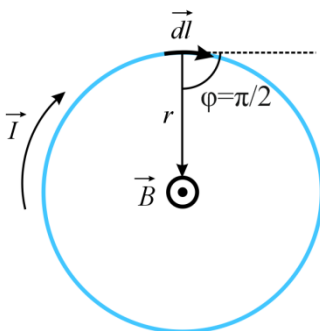
$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl \sin \varphi}{r^2} \quad (3)$$

### Поле кругового тока

Для магнитного поля в центре **кругового витка** радиуса  $R$  (**рис.1**), по которому течет ток  $I$ , имеем

$$r = R, \quad \varphi = \frac{\pi}{2}, \quad \sin \varphi = 1$$

$$B_{\text{виток}} = \int dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R^2} \int_0^{2\pi R} dl = \mu\mu_0 \frac{I}{2R} \quad (4)$$



**Рис.1.** Расчет поля кругового витка

Напряженность  $H$  для  $N$  круговых витков, используя формулы (4), (2) и принцип суперпозиции полей, записать:

$$H_{\text{виток}} = \frac{B}{\mu\mu_0} = \frac{NI}{2R} \quad (5)$$

### Поле квадратной рамки и треугольника

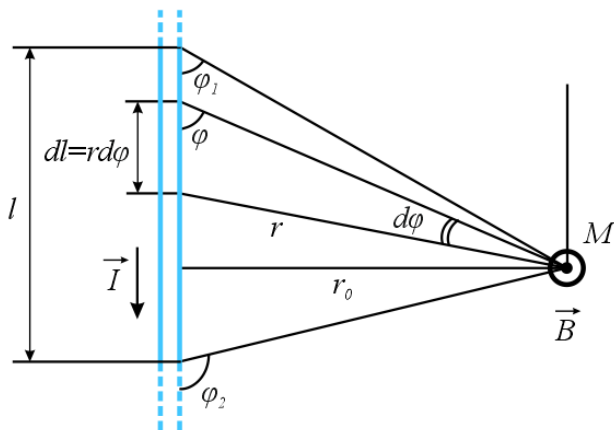
Чтобы найти  $H$  в центре **квадрата и треугольника**, необходимо ознакомиться с расчетом  $B$  для прямолинейного проводника с током (**рис.2**).

$$B = \int dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\ell \cdot \sin\varphi}{r^2}$$

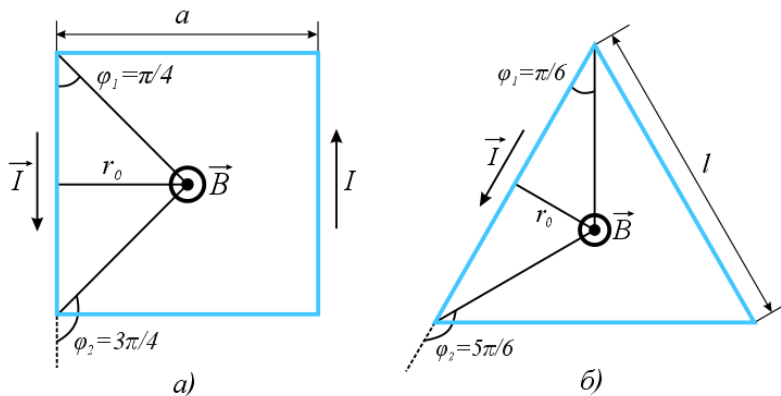
Для того чтобы произвести интегрирование, необходимо выразить  $d\ell$ ,  $r$  через одну независимую переменную  $\varphi$ . Из **рис.2** видно, что

$$r = \frac{r_0}{\sin\varphi}, \quad d\ell = \frac{dr}{\sin\varphi} = \frac{r \cdot d\varphi}{\sin\varphi},$$

где  $d\varphi$  – угол, под которым виден из точки  $M$  элемент длины  $d\ell$ .



**Рис.2.** Расчет поля прямолинейного проводника



**Рис.3.** Расчет поля квадратной рамки и треугольника

После постановки  $r$  и  $dl$  и интегрирования получаем:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi \cdot r_0} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi \cdot r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (6)$$

Для **квадратной рамки**, содержащей  $N$  витков (**рис.3а**), имеем:

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{4}, \varphi_2 = \frac{3\pi}{4}, r_0 = \frac{a}{2}$$

$$H_{\text{квадрат}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot I \cdot N}{\pi \cdot a} \quad (7)$$

Для **равностороннего треугольника** (**рис.3б**):

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{6} \quad \varphi_2 = \frac{5\pi}{6} \quad r_0 = \left(\frac{l}{2}\right) \operatorname{tg}(30^\circ)$$

Формула (6) запишется:

$$H_{\text{треугол}} = \frac{9N \cdot I}{2\pi l} \quad (8)$$

### Поле соленоида

Для нахождения  $B$  и  $H$  в точке, лежащей на оси кругового тока (рис.4), необходимо вектор  $dB$  разложить на составляющие  $dB_{||}$  и  $dB_{\perp}$ .

Сумма  $dB_{\perp}$  равна нулю, так как любые два диаметрально противоположные элементы тока будут создавать одинаковые  $dB_{\perp}$ , направленные в противоположные стороны.

Результирующая  $B$  получается в результате интегрирования  $dB_{||}$ , которую можно выразить через  $dB$  из подобия треугольников (рис.4) следующим образом:

$$\frac{dB_{||}}{dB} = \frac{R}{r} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + h^2}}$$

$$B = \int dB_{||} = \int \frac{dB \cdot R}{\sqrt{R^2 + h^2}} = \frac{\mu\mu_0 IR}{4\pi(R^2 + h^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} dl$$

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(R^2 + h^2)^{3/2}} \quad (9)$$

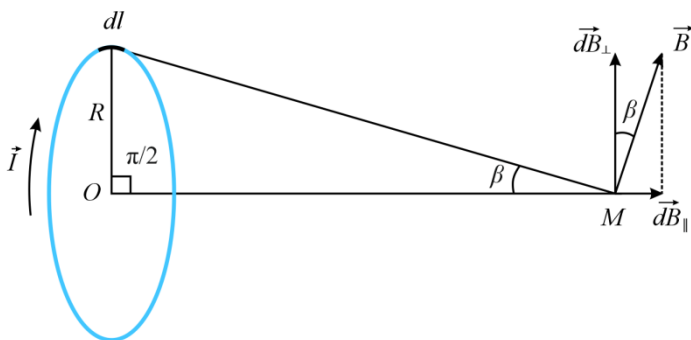
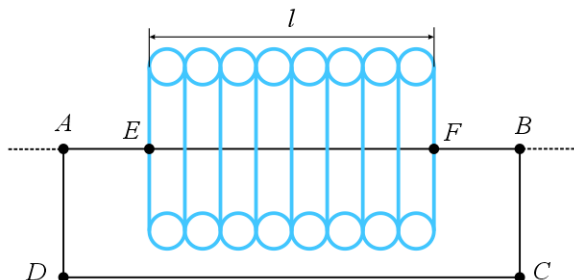


Рис.4. Расчет поля соленоида



**Рис.5.** Соленоид

Для  $N$  витков выражение для напряженности  $H$  запишется:

$$H = \frac{IR^2N}{2(R^2 + h^2)^{3/2}} \quad (10)$$

Для соленоида рассчитать  $B$  и  $H$  удобнее с использованием закона полного тока, который записывается:

$$\oint (H, dl) = \sum_{i=1}^N I_i \quad (11)$$

На **рис.5** дан разрез соленоида длиной  $l$  и числом витков  $N$ , по которым течет ток  $I$ , а также произвольный контур  $ABCD$ , охватывающий эти витки.

Предполагая, что  $H$  постоянна на участке  $EF$ , а во всех других точках контура равна нулю, закон полного тока (11) для указанного контура можно записать:

$$\oint_{ABCD} (H, dl) = H \int_E^F dl = NI, \quad H \cdot l = N \cdot I$$

Откуда получаем:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (12)$$

Для соленоида конечной длины выражение для  $H$  имеет вид:

$$H_{\text{соленоид}} = \frac{N \cdot I}{2l} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2), \quad (13)$$

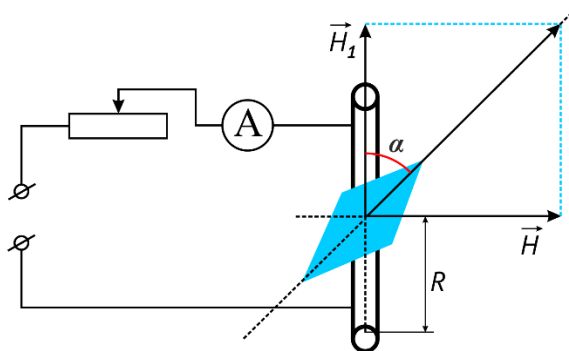
где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы между осью и линиями, соединяющими крайние витки с серединой соленоида.

Для бесконечно длинного соленоида, для которого  $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \pi$ , формула (13) переходит в (12).

## ХОД РАБОТЫ

### Задание 1. Определение напряженности магнитного поля Земли по магнитному полю кругового витка

1. С помощью магнитной стрелки компаса круговые витки расположить в плоскости земного меридиана.
2. Включить источник питания  $U$ , изменяя ток  $I_i$  в цепи, измерить углы отклонения  $\alpha_i$  стрелки компаса от направления линий напряженности магнитного поля Земли (**рис.6**).



**Рис.6.** Схема установки

3. Данные измерений занести в **таблицу 1**.
4. Как видно из **рис.6** для каждого значения тока  $I_i$  и соответствующего ему угла отклонения стрелки  $\alpha_i$  напряженность  $H_0$  поля Земли вычисляется по формуле:

$$H_0 = \frac{H_1}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (14)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_1}{H_0}, \quad (15)$$

где  $H_1 = \frac{I \cdot N}{2R}$  – напряженность поля круговых витков (**рис.5**);

$I$  – сила тока;

$N$  – число витков (указано на установке);

$R$  – радиус кругового витка.

5. Найти значение  $H_1$ , согласно (5)
6. Найти значение  $H_0$ , согласно (14):

**Таблица 1**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_i$ , А										
$\alpha_i$ , градус										
$T_i = \operatorname{tg} \alpha_i$										
$H_1$ , А/м										
$H_0$ , А/м										
Среднее значение $H_{0 \text{ сред}}$ , А/м										



**Задание 2. Определение напряженности магнитного поля квадрата**

1. Расположить витки квадратной рамки в плоскости земного меридиана. Включить источник питания
2. Замерить углы  $\alpha_i$  отклонения стрелки при различных токах  $I$ . Данные занести в таблицу 2.
3. Используя значение  $H_0$ , полученное в первой части работы, вычислить напряженности  $H$  (рис.1) по формуле (2):

$$H_{2Э} = H_{0\text{сред}} \operatorname{tg} \alpha$$

4. Теоретические значения  $H$  для квадрата рассчитать по формуле (7):

$$H_{2T} = \frac{2\sqrt{2}N \cdot I}{\pi \cdot a},$$

где  $N$  – число витков квадратной рамки;

$a$  – длина стороны квадрата (указаны на установке).

5. Построить графики зависимости  $H_{2Э} = f(I)$  при помощи метода наименьших квадратов и  $H_{2T} = f(I)$ .

**Таблица 2**

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_i, \text{A}$										
$\alpha_i, \text{градус}$										
$\operatorname{tg} \alpha$										
$H_{2Э}, \text{A/м}$										
$H_{2T}, \text{A/м}$										

### Задание 3. Определение напряженности в центре равностороннего треугольника, на оси кругового тока, соленоида

Порядок выполнения работы такой же, как для поля квадрата (задание 2):

1. Экспериментальные значения  $H_{3Э}$  находятся по формуле (2):

$$H_{3Э} = H_{0\text{сред}} \operatorname{tg} \alpha$$

2. Теоретические значения  $H_{3Т}$  по соответствующим формулам для **треугольника**:

$$H_{3Т} = \frac{9 \cdot I \cdot N}{2\pi \cdot l},$$

где  $N$  – число витков;

$l$  – длина стороны треугольника.

3. На оси **кругового тока**:

$$H_{3Т} = \frac{I \cdot R^2 N}{2(R^2 + h^2)^{3/2}},$$

где  $N$  – число витков;

$R$  – радиус витка;

$h$  – расстояние от витка до магнитной стрелки.

4. Для **соленоида** теоретические расчеты провести следующим образом: сначала вычислить  $H$  по формуле для бесконечно длинного соленоида (12):

$$H_{3Т\text{бесконеч}} = \frac{N \cdot I}{l},$$

5. Затем, если различие между  $H_{3Э}$  и  $H_{3Т}$  будет значительным, по формуле для соленоида конечной длины (13) вычислить:

$$H_{3T_{\text{конеч}}} = \frac{N \cdot I}{2l} (\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2),$$

где  $N$  – число витков;

$l$  – длина соленоида;

$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы, под которыми видны из середины крайние витки соленоида.

**Таблица 3**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_i, \text{A}$										
$\alpha_i, \text{градус}$										
$tg\alpha$										
$H_{3Э}, \text{A/м}$										
$H_{3T_{\text{бесконеч}}}, \text{A/м}$										
$H_{3T_{\text{конеч}}}, \text{A/м}$										

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется магнитным полем?
2. Каковы основные характеристики магнитного поля и в каких единицах они измеряются?
3. Назовите источники магнитного поля.
4. Как формулируются законы Ампера, Био-Савара-Лапласа, полного тока, каков их физический смысл?
5. Как используются указанные законы для расчета магнитных полей проводников с током различной формы?
6. Как экспериментально определяется напряженность магнитного поля в лабораторной работе?