## 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.

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

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

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

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:

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

## Поле кругового тока

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

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

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

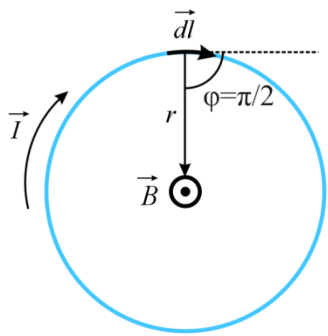


**Рис.1.** Расчет поля кругового витка

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

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

### 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 $dl$, $r$ через одну независимую переменную $\varphi$. Из **рис.2** видно, что

$$r = \frac{r_0}{\sin\varphi}, \qquad dl = \frac{dr}{\sin\varphi} = \frac{r \cdot d\varphi}{\sin\varphi},$$

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

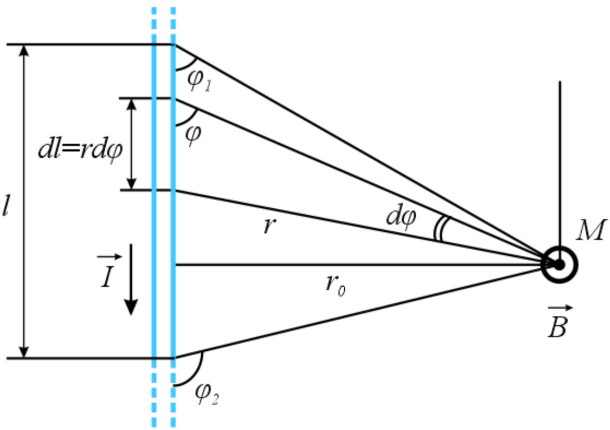


**Рис.2.** Расчет поля прямолинейного проводника

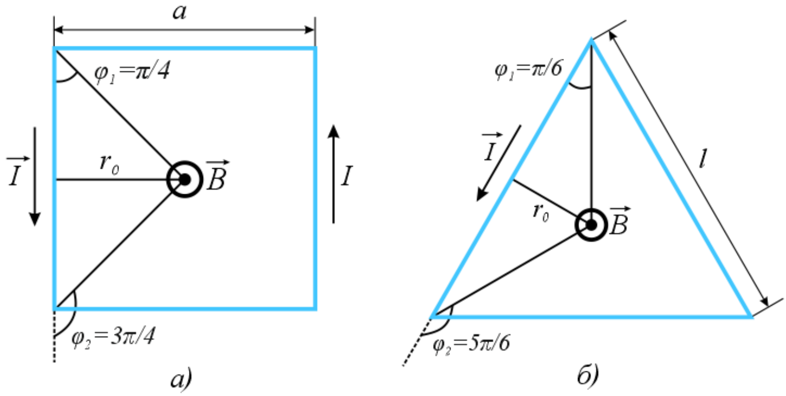


**Рис.3.** Расчет поля квадратной рамки и треугольника

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

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

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

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

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

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

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

Формула (6) запишется:

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

## Поле соленоида

Для нахождения $B$ и $H$ в точке, лежащей **на оси кругового то**ка (**рис.4**), необходимо вектор $dB$ разложить на составляющие $dB_{II}$ 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 $dB_{II}$, которую можно выразить через $dB$ из подобия треугольников (**рис.4**) следующим образом:

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

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

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

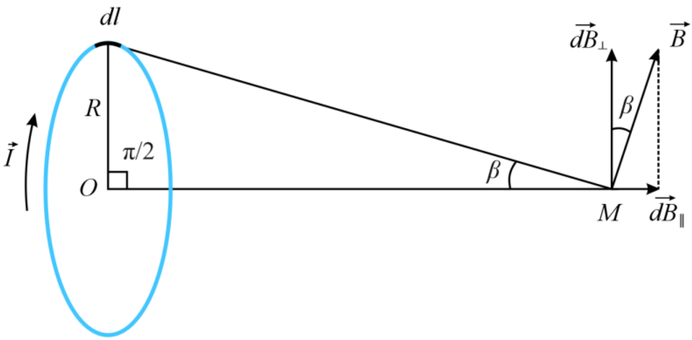


**Рис.4.** Расчет поля соленоида

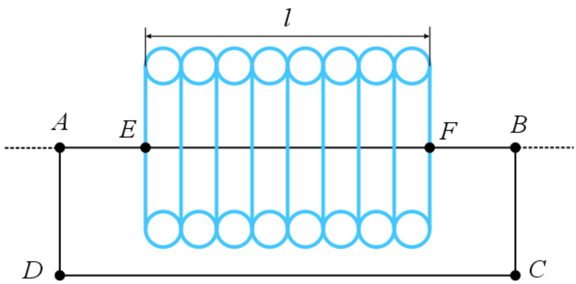


**Рис.5.** Соленоид

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

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

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

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

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:

$$\oint\limits_{ABCD} (H, dl) = H \int\limits_{E}^{F} dl = NI, \qquad H \cdot l = N \cdot I$$

Откуда получаем:

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

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

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

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, замерить углы отклонения $\alpha_i$ стрелки компаса от направления линий напряженности магнитного поля Земли (**рис.6**).

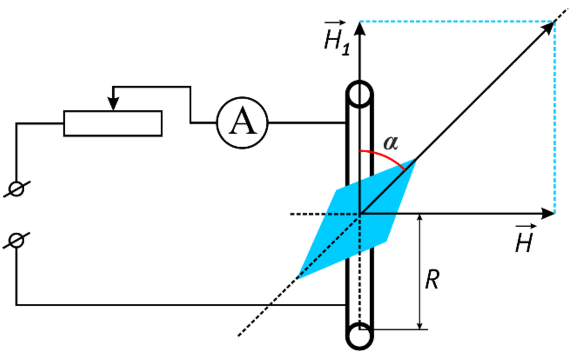


**Рис.6.** Схема установки

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:

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

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

где $H_1 = \dfrac{I \cdot N}{2R}$ – 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 | | | | | | | | | | |
| $T_i = tg\alpha_i$ | | | | | | | | | | |
| $H_1, A/м$ | | | | | | | | | | |
| $H_0, A/м$ | | | | | | | | | | |
| Среднее значение $H_{0\,сред}, A/м$ | | | | | | | | | | |

## 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):

$$H_{2Э} = H_{0\,сред}\, tg\alpha$$

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 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_i$, А | | | | | | | | | | |
| $\alpha_i$, градус | | | | | | | | | | |
| $tg\alpha$ | | | | | | | | | | |
| $H_{2Э}$, А/м | | | | | | | | | | |
| $H_{2T}$, А/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):

$$H_{3Э} = H_{0\,сред}\, tg\alpha$$

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

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

где $N$ – число витков;

$l$ – длина стороны треугольника.

3. На оси **кругового тока**:

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

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):

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

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

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

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 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_i$, А | | | | | | | | | | |
| $\alpha_i$, градус | | | | | | | | | | |
| $tg\alpha$ | | | | | | | | | | |
| $H_{ЗЭ}$, А/м | | | | | | | | | | |
| $H_{ЗТ\,бесконеч}$, А/м | | | | | | | | | | |
| $H_{ЗТ\,конеч}$, А/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?