

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

## Отчёт о выполнении лабораторной работы 3.1.1 Магнитометр

Автор:  
Тихонов Дмитрий Романович,  
студент группы Б01-206

Долгопрудный, 2023

# 1 Введение

**Цель работы:** определить горизонтальную составляющую магнитного поля Земли и установить количественное соотношение между единицами электрического тока в системах СИ и СГС.

**В работе используются:** магнитометр, осветитель со шкалой, источник питания, вольтметр, электромагнитный переключатель, конденсатор, намагниченный стержень, прибор для определения периода крутильных колебаний, секундомер, рулетка, штангенциркуль.

## 2 Теоретические сведения и методика измерений

### 2.1 Экспериментальная установка

*Магнитометром* называют прибор для магнитных измерений. В нашей установке используется электромагнитный магнитометр (рис. 1), который состоит из нескольких последовательно соединённых круговых витков К, расположенных вертикально. В центре кольца К радиусом  $R$  на тонкой неупругой вертикальной нити подвешена короткая магнитная стрелка С. Жёстко связанная со стрелкой крыльчатка погружена в масло и служит для демпфирования колебаний.

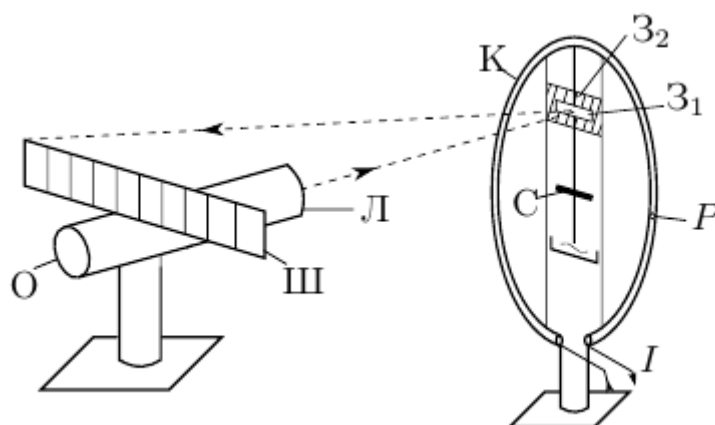


Рис. 1: Схема магнитометра

В отсутствие других магнитных полей стрелка располагается по направлению горизонтальной составляющей земного магнитного поля  $\mathbf{B}_0$ , т. е. лежит в плоскости магнитного меридиана.

Прибор настраивают с помощью световых зайчиков, отражённых от двух зеркал:  $Z_1$ , прикреплённого к стрелке (подвижный зайчик), и  $Z_2$ , расположенного в плоскости кольца К и жёстко связанного с ним (неподвижный зайчик). Оба зеркала освещаются одним и тем же осветителем О. Вращением кольца вокруг вертикальной оси можно совместить оба зайчика. При этом плоскость витков совпадает с плоскостью магнитного меридиана.

При появлении дополнительного горизонтального магнитного поля  $\mathbf{B}_\perp$  стрелка С установится по равнодействующей обоих полей  $\mathbf{B}_\Sigma$  (рис. 2). В нашей установке дополнительное поле может быть создано либо малым ферромагнитным стержнем, расположенным на кольце на его горизонтальном диаметре ( $\mathbf{B}_1$ ), либо током, проходящим по кольцу ( $\mathbf{B}_2$ ). В обоих случаях дополнительное поле можно считать однородным, так как размеры стрелки много меньше радиуса кольца.

Поле намагниченного стержня вдали от него может быть приближённо вычислено как поле точечного диполя:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{r^5} - \frac{\mathbf{m}}{r^3} \right), \quad (1)$$

где  $\mathbf{m}$  – магнитный момент стержня,  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор, проведённый из центра диполя в точку наблюдения.

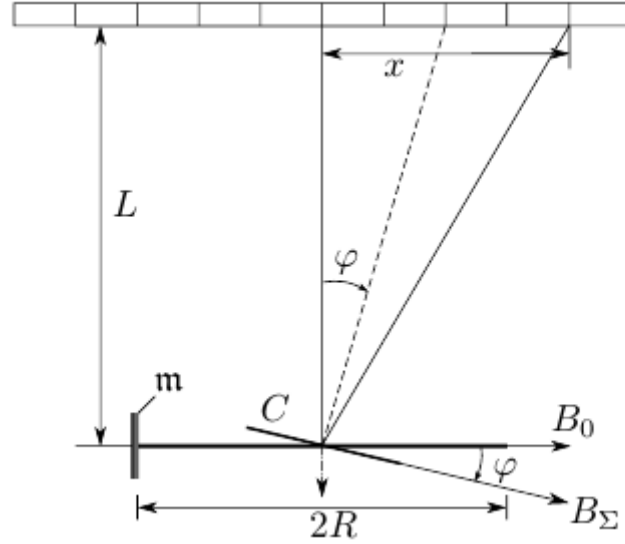


Рис. 2: Схема измерения угла отклонения магнитной стрелки

На оси, перпендикулярной стержню, имеем

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m}{R^3}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус кольца.

Магнитное поле в центре кольца с током  $I$  по закону Био-Савара-Лапласа равно

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2R} N, \quad (3)$$

где  $I$  – сила тока в единицах СИ,  $N$  – число витков в кольце.

Измерив угол отклонения  $\varphi$ , можно связать поля  $B_0$  и  $B_{\perp}$ :

$$B_{\perp} = B_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (4)$$

## 2.2 Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

Для определения горизонтальной составляющей земного магнитного поля  $B_0$  тонкий короткий намагниченный стержень устанавливается в отверстие Р на горизонтальном диаметре кольца (рис. 1). Измерив тангенс угла отклонения стрелки

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{x_1}{2L}, \quad (5)$$

можно с помощью уравнений (2), (4) и (5) рассчитать поле  $B_0$ , если исключить величину  $m$  – магнитный момент стержня.

Для исключения магнитного момента предлагается измерить период крутильных колебаний стержня в поле Земли. Подвешенный горизонтально за середину на тонкой длинной нити стержень в положении равновесия установится по полю Земли (упругость нити пренебрежимо мала). Если ось стержня отклонить в горизонтальной плоскости от направления  $B_0$  на малый угол  $\alpha$ , то под действием возвращающего механического момента

$$M_{\text{мех}} = |\mathbf{m} \times \mathbf{B}| = mB_0 \sin \alpha \approx mB_0 \alpha \quad (6)$$

стержень с моментом инерции  $J$  в соответствии с уравнением  $J\ddot{\alpha} + mB_0\alpha = 0$  будет совершать крутильные колебания с периодом

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mB_0}}. \quad (7)$$

Момент инерции цилиндрического стержня относительно оси вращения

$$J = m \left( \frac{l^2}{12} + \frac{r^2}{4} \right) = \frac{ml^2}{12} \left[ 1 + 3 \left( \frac{r}{l} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где  $m$  – масса стержня,  $l$  – длина, а  $r$  – его радиус.

Таким образом, рассчитав момент инерции  $J$  и измерив тангенс угла отклонения стрелки  $\varphi_1$  и период малых крутильных колебаний стержня  $T$ , можно определить горизонтальную составляющую магнитного поля Земли:

$$B_0 = \frac{2\pi}{TR} \sqrt{\frac{\mu_0 J L}{2\pi R x_1}} \quad [\text{ед. СИ}]. \quad (9)$$

Поскольку магнитометр установлен в железобетонном здании, магнитное поле в нём может не только сильно отличаться от поля Земли, но и заметно меняться от места к месту, поэтому период колебаний следует измерять непосредственно вблизи магнитометра. Кроме того, для обеспечения максимальной однородности магнитного поля в области измерений следует удалить на максимальное расстояние возможные источники сильного магнитного поля.

### 2.3 Определение электродинамической постоянной

Ток в цепи кольца можно измерить двумя независимыми способами: по магнитному действию тока на стрелку магнитометра и по заряду, протекающему через цепь в единицу времени. Первый способ измерения соответствует тому, как эталон тока определён в системе СИ, а второй в СГС. По отношению результатов этих измерений можно определить электродинамическую постоянную  $c$ .

Пропуская некоторый ток через витки магнитометра, измерим тангенс угла отклонения стрелки ( $\text{tg } \varphi_2 = x_2/2L$ ) и по формулам (3) и (4) рассчитаем силу тока:

$$I = \frac{2B_0 R}{\mu_0 N} \text{tg } \varphi_2 \quad [\text{ед. СИ}]. \quad (10)$$

Тот же ток можно измерить абсолютным образом по прошедшему в единицу времени заряду, что соответствует определению эталона тока в СГС. Если разрядить конденсатор известной ёмкости  $C$ , заряженный до напряжения  $U$ , через витки, то через них протечёт заряд  $q = CU$  (рис. 3). Если  $\nu$  раз в секунду последовательно заряжать конденсатор от источника и разряжать через витки, то через них за секунду протечёт заряд  $CU\nu$ . Средний ток, прошедший через витки, равен при этом

$$I = CU\nu \quad [\text{абс. ед.}]. \quad (11)$$

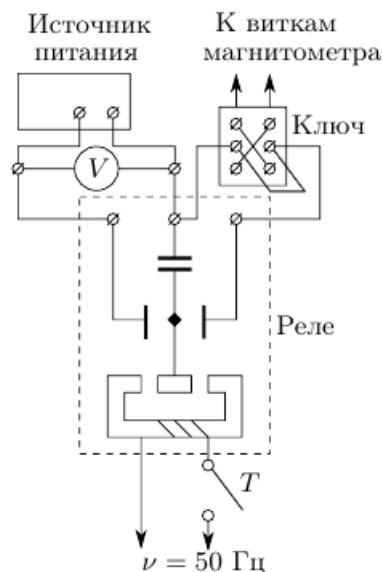


Рис. 3: Схема питания катушки магнитометра

Таким образом, абсолютное измерение тока сводится к нахождению величин  $C$  и  $U$ , которые тоже могут быть определены абсолютным образом.

Итак, для вычисления абсолютного значения тока по (11) необходимо измерить напряжение  $U$  на конденсаторе известной ёмкости  $C$ . Напряжение необходимо выразить в *единицах СГС*. Ёмкость конденсатора  $C$  должна быть выражена в сантиметрах.

По отношению численных значений одного и того же тока, выраженных в единицах СИ и СГС по формулам (10) и (11) соответственно, можно определить значение электродинамической постоянной:

$$c \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right] = \frac{1}{10} \frac{I_{[\text{СГС}]}}{I_{[\text{СИ}]}}. \quad (12)$$

## 3 Результаты измерений и обработка данных

### 3.1 Измерение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

1. Включим осветитель и получим на горизонтальной шкале два чётких световых *зайчика*. Плавным поворотом кольца К (рис. 1) вокруг вертикальной оси совместим зайчики.
2. В отверстие Р на горизонтальном диаметре кольца (рис. 1) вставим намагниченный стержень и измерим смещение подвижного зайчика  $x_1$  (рис. 2):

$$x_1 = (0.6 \pm 0.1) \text{ см.}$$

Поменяв ориентацию стержня, измерим отклонение зайчика в другую сторону  $x'_1$ :

$$x'_1 = (-3.0 \pm 0.1) \text{ см.}$$

Усредняя результаты, получим:

$$\bar{x} = \frac{x_1 - x'_1}{2} = (1.75 \pm 0.05) \text{ см.}$$

3. Измерим расстояние  $L$  от шкалы до зеркала:

$$L = (96 \pm 1) \text{ см.}$$

4. Измерим период малых колебаний стержня  $T$  в магнитном поле Земли. Для этого поставим стеклянный сосуд *вблизи* магнитометра и опустим на дно привязанный за середину намагниченный стержень.

$$t = (217 \pm 1) \text{ с}, N = 10 \Rightarrow T = \frac{t}{N} = (21.7 \pm 0.1) \text{ с.}$$

5. С помощью штангенциркуля измерим линейные размеры стержня. Кроме того, запишем его массу и параметры магнитометра:

$$m = 4.350 \text{ г}, \quad d = (0.40 \pm 0.01) \text{ см}, \quad l = (4.00 \pm 0.01) \text{ см}, \quad R = 20 \text{ см.}$$

6. Рассчитаем величину горизонтальной составляющей магнитного поля Земли  $B_0$  и оценим погрешность результата:

$$J = \frac{ml^2}{12} \left[ 1 + 3 \left( \frac{d}{2l} \right)^2 \right] = (5.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$B_0 = \frac{2\pi}{TR} \sqrt{\frac{\mu_0 J L}{2\pi R \bar{x}}} = (8.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-6} [\text{ед.СИ}].$$

### 3.2 Определение электродинамической постоянной

1. Уберём намагниченный стержень из гнезда магнитометра и соберём электрическую схему, изображённую на рис. 3.
2. Убедимся, что зайчики совмещены в отсутствие тока через витки.
3. Включим в сеть источник питания и установим рабочее напряжение  $U \approx 90$  В.
4. Замкнув ключ, подключим к цепи витки магнитометра.
5. Включив кнопкой К электровибратор, измерим напряжение  $U$  на конденсаторе и отклонение  $x_2$  зайчика на шкале. Поменяв полярность, повторим измерения.

$$x_2 = (-12.5 \pm 0.1) \text{ см}, \quad x'_2 = (16.6 \pm 0.1) \text{ см} \Rightarrow \bar{x} = \frac{x'_2 - x_2}{2} = (14.55 \pm 0.05) \text{ см}$$

6. Запишем характеристики приборов и параметры  $N$ ,  $C$  и  $\nu$ , указанные на установке:

$$N = 44, \quad C = (9.0 \pm 0.2) \cdot 10^5 \text{ см}, \quad \nu = 50 \text{ Гц}.$$

7. Рассчитаем токи по формулам (10) и (11):

$$I_{[\text{СИ}]} = \frac{2B_0 R}{\mu_0 N} \cdot \frac{\bar{x}}{2L} = (4.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} [\text{ед. СИ}],$$

$$I_{[\text{СГС}]} = CU\nu = (1.35 \pm 0.03) \cdot 10^7 [\text{ед. СГС}].$$

Наконец, вычислим *электродинамическую постоянную*  $c$ :

$$c \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right] = \frac{1}{10} \frac{I_{[\text{СГС}]}}{I_{[\text{СИ}]}} = (3.0 \pm 0.1) \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

## 4 Заключение

В результате выполнения лабораторной работы получили значение электродинамической постоянной  $c = (3.0 \pm 0.1) \cdot 10^8$  м/с, что, с учётом погрешности, сходится с табличным значением  $c_{\text{табл}} = 2.998 \cdot 10^8$  м/с.

Неточность в измерении может быть связана с влиянием разных источников магнитного поля (источники питания, токонесущие провода, сотовые телефоны, металлические предметы и т.п.).