

Магнитометр

Каспаров Николай, Б01-304

September 21, 2024

Цель работы:

- Определить горизонтальную составляющую магнитного поля Земли;
- Установить количественное соотношение между единицами электрического тока в системах СИ и СГС.

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

1 Экспериментальная установка

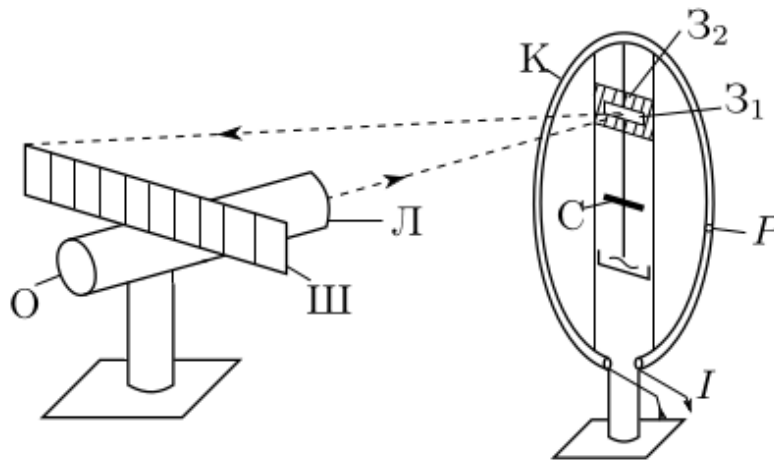


Рисунок 1: Схема магнитометра

Магнитометр (рис. 1) 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.

В отсутствие других магнитных полей стрелка располагается по направлению горизонтальной составляющей земного магнитного поля B_0 .

Прибор настраивают с помощью световых зайчиков, отражённых от двух зеркал: 3_1 , прикреплённого к стрелке (подвижный зайчик), и 3_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 B_{\perp} , стрелка С установится по равнодействующей обоих полей B_{Σ} (рис. 2). В нашей установке дополнительное поле может быть создано либо малым ферромагнитным стержнем, расположенным на кольце на его горизонтальном диаметре (B_1), либо током, проходящим по кольцу (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:

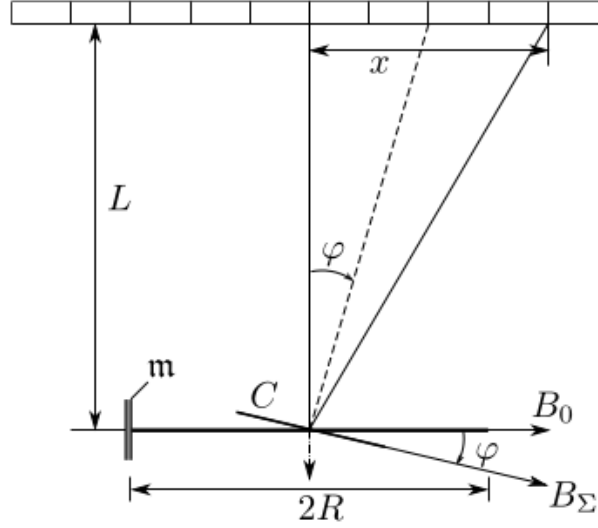


Рисунок 2: Схема измерения угла отклонения магнитной стрелки

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

где \vec{m} - магнитный момент стержня,

\vec{r} - радиус-вектор, проведённый из центра диполя в точку наблюдения.

На оси, перпендикулярной стержню, имеем:

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m}{R^3}, \quad (1)$$

где R - радиус кольца.

Магнитное поле в центре кольца с током I по закону Био — Савара — Лапласа равно:

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

где N - число витков в кольце, I [A] - сила тока.

Измерив угол отклонения стрелки φ , можно связать поля B_0 и B_{\perp} (B_1 или B_2):

$$B_{\perp} = B_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (3)$$

1.1 Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

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

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{x_1}{2L}, \quad (4)$$

можно с помощью уравнений (1), (3) и (4) 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. Если ось стержня отклонить в горизонтальной плоскости от направления B_0 на малый угол α , то под действием возвращающего механического момента

$$M_{\text{мех}} = |\vec{m} \times \vec{B}| = mB_0 \sin \alpha \approx mB_0 \alpha$$

стержень с моментом инерции J в соответствии с уравнением

$$J\ddot{\alpha} + mB_0 \alpha = 0$$

будет совершать крутильные колебания с периодом

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mB_0}}. \quad (5)$$

Момент инерции цилиндрического стержня относительно оси вращения

$$J = m \left(\frac{l^2}{12} + \frac{r^2}{4} \right) = \frac{ml^2}{12} \left[1 + 3 \left(\frac{r}{l} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Таким образом, из (1), (3), (4) и (5) следует:

$$B_0 = \frac{2\pi}{RT} \sqrt{\frac{\mu_0 J L}{2\pi R x_1}} \quad [\text{ед. СИ}] \quad (7)$$

1.2 Определение электродинамической постоянной

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

$$I = \frac{2B_0 R}{\mu_0 N} \text{tg } \varphi_2 = A \text{tg } \varphi_2 \quad [\text{ед. СИ}], \quad (8)$$

где A - постоянная прибора и места.

Тот же ток можно измерить абсолютным образом по прошедшему в единицу времени заряду, что соответствует определению эталона тока в гауссовой системе (СГС). Если разрядить конденсатор известной ёмкости C , заряженный до напряжения U , через витки, то через них протечёт заряд $q = CU$ (рис. 3). Если ν 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

$$I = CU\nu \quad [\text{абс. ед}] \quad (9)$$

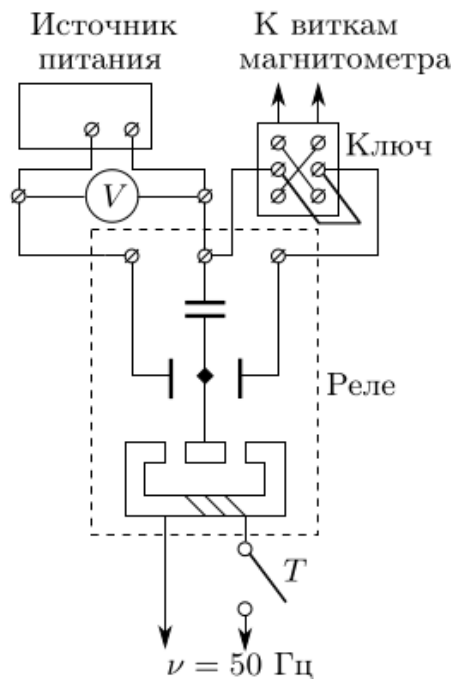


Рисунок 3: Схема питания катушки магнитометра

Таким образом, абсолютное измерение тока сводится к нахождению величин C и U , которые тоже могут быть определены абсолютным образом. По отношению численных значений одного и того же тока, выраженных в единицах СИ и СГС, можно определить значение электродинамической постоянной:

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

2 Ход работы

2.1 Измерение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

Намагниченный стержень вызвал отклонение зайчика $x_1 = (95 \pm 1)$ мм, $x_2 = (-94 \pm 1)$ мм

Параметры установки:

$$L = (0.84 \pm 0.05) \text{ м}$$

$$R = (0.25 \pm 0.01) \text{ м}$$

Параметры намагниченного стержня:

$$m = (2.84 \pm 0.01) \text{ гр}$$

$$l = (24.3 \pm 0.1) \text{ мм}$$

$$d = (4.6 \pm 0.1) \text{ мм}$$

Посчитаем момент инерции магнита по формуле (6):

$$J = \frac{ml^2}{12} \left[1 + 3 \left(\frac{r}{l} \right)^2 \right] = (1.44 \pm 0.04) \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Определим период колебания магнита в горизонтальной плоскости:

$$T = (1.79 \pm 0.09) \text{ с}$$

Горизонтальное магнитное поле Земли по формуле (7);

$$B_0 = \frac{2\pi}{RT} \sqrt{\frac{\mu_0 J L}{2\pi R x}} = (1.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$$

2.2 Определение электродинамической постоянной

Параметры установки:

$$N = 34$$

$$\nu = 50 \text{ Гц}$$

$$U = (0.336 \pm 0.001) \text{ ед. СГС}$$

$$C = (9.0 \pm 0.1) \cdot 10^5 \text{ см}$$

Смещение зайчика:

$$x_1 = (7.5 \pm 0.1) \text{ см}$$

$$x_2 = (-8.0 \pm 0.1) \text{ см}$$

Сила тока в системе СИ, формула (8):

$$I = \frac{2B_0 R}{\mu_0 N} \operatorname{tg} \varphi_2 = (5.2 \pm 0.8) \cdot 10^{-3} \text{ [A]},$$

Сила тока в системе СГС, формула (9):

$$I = CU\nu = (1.51 \pm 1) \cdot 10^7 \text{ ед. СГС.}$$

Отсюда, значение электродинамической постоянной равно:

$$c = \frac{1}{10} \frac{I_{\text{СГС}}}{I_{\text{СИ}}} = (2.9 \pm 0.4) \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

3 Вывод

Во время выполнения данной работы, удалось рассчитать величину горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

$$B_0 = (1.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$$

А также вычислить электродинамическую постоянную c :

$$c = (2.9 \pm 0.4) \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Наименее точным измерением оказалось определение периода магнита.