

Работа 3.12

Измерение индукции постоянного магнитного поля

У п р а ж н е н и е 1. Измерение индукции магнитного поля соленоида.

Оборудование: исследуемый и нормальный соленоиды с измерительными катушками, аккумулятор, реостат (30 Ом), амперметр, зеркальный гальванометр, переключатель, соединительные провода.

Введение

Величина магнитной индукции в любой точке O_1 соленоида (рис. 3.38) определяется по формуле:

$$B = \mu_0 \mu \frac{nI}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; μ — магнитная проницаемость среды, заполняющей соленоид; I — величина тока в обмотке соленоида; n —

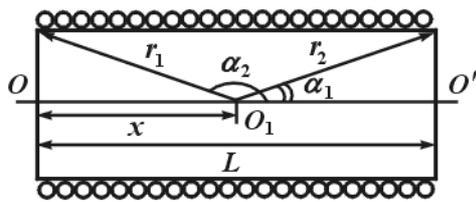


Рис. 3.38

число витков на единицу длины соленоида; α_1 и α_2 — углы, образующие радиус-векторы \vec{r}_1 и \vec{r}_2 , проведенные к крайним виткам соленоида, с его осью OO' . Выразив $\cos \alpha_1$ и $\cos \alpha_2$ через диаметр соленоида d и его длину L для точки O_1 , расположенной на оси соленоида на расстоянии x от его конца, получим:

$$B = \mu_0 \mu n I \left(\frac{L-x}{\sqrt{d^2 + 4(L-x)^2}} + \frac{x}{\sqrt{d^2 + 4x^2}} \right). \quad (2)$$

Если точка O_1 находится на середине оси соленоида ($x = L/2$), то

$$B = \mu_0 \mu n I \frac{L}{\sqrt{d^2 + L^2}}. \quad (3)$$

Учитывая, что

$$n = \frac{N}{L},$$

где N — число витков соленоида, можно записать:

$$B = \mu_0 \mu \frac{NI}{\sqrt{d^2 + L^2}}. \quad (4)$$

Соленоид, у которого $L \gg d$, это значит, длина L значительно больше диаметра (не менее чем в 25 раз), считается бесконечно длинным и называется *нормальным соленоидом*.

Внутри нормального соленоида в точках, достаточно отдаленных от его концов, индукция магнитного поля

$$B = \mu_0 \mu n I. \quad (5)$$

Из выражения (2) следует, что в точках, находящихся на концах соленоида ($x = 0$, $x = L$),

$$B = \mu_0 \mu n I \frac{L}{\sqrt{d^2 + 4L^2}} \quad (6)$$

или с учетом того, что $N = nL$,

$$B = \mu_0 \mu \frac{NI}{\sqrt{d^2 + 4L^2}}. \quad (7)$$

Если соленоид длинный (нормальный), то

$$B = \mu_0 \mu \frac{nI}{2}. \quad (8)$$

В работе исследуется зависимость магнитной индукции соленоида от положения точки O_1 на его оси.

Для определения магнитной индукции B внутри соленоида находится измерительная катушка, замкнутая на зеркальный гальванометр. Катушка расположена так, что плоскость ее витков перпендикулярна направлению вектора магнитной индукции. При этом *магнитный поток*, проходящий через каждый из ее витков,

$$\Phi = BS_1, \quad (9)$$

где S_1 — площадь витков измерительной катушки.

При изменении магнитного потока в измерительной катушке возникает *ЭДС индукции*

$$\mathcal{E} = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (10)$$

где N_1 — число витков измерительной катушки.

В цепи гальванометра возникает ток

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} = -\frac{N_1}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (11)$$

где R — сопротивление измерительной катушки и гальванометра.

Из (11) следует, что

$$|d\Phi| = \frac{R}{N_1} i dt. \quad (12)$$

Это означает, что при изменении магнитного потока в цепи гальванометра возникает импульс тока. Если за время τ магнитный поток изменяется от Φ_1 до Φ_2 , то

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \frac{R}{N_1} \int_0^\tau i dt = \frac{R}{N_1} Q. \quad (13)$$

Таким образом, изменение магнитного потока $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ пропорционально заряду, проходящему через гальванометр:

$$\Delta\Phi = \frac{R}{N_1} Q. \quad (14)$$

При определении $\Delta\Phi$ необходимо изменять магнитный поток так, чтобы были известны его первоначальное и конечное значения Φ_1 и Φ_2 .

Например, при включении тока соленоида магнитный поток изменяется от 0 до Φ , а при выключении — от Φ до нуля. Тогда изменение потока $\Delta\Phi = \Phi$. Если изменять направление тока, то магнитный поток изменится от значения Φ до $-\Phi$, тогда $\Delta\Phi = 2\Phi$.

В данной работе магнитный поток изменяется при включении и выключении тока в цепи соленоида. При этом $\Delta\Phi = \Phi$ и, согласно (9) и (14), можно записать:

$$B = \frac{R}{N_1 S_1} Q. \quad (15)$$

Формула (15) дает возможность определить магнитную индукцию B , если измерить заряд Q , проходящий через рамку гальванометра при включении и выключении тока в цепи соленоида.

Если гальванометр работает в баллистическом режиме (см. работу 3.7), т. е. выполнено условие, когда время включения и выключения тока в соленоиде значительно меньше периода собственных колебаний рамки гальванометра, то можно записать:

$$Q = C_6 n, \quad (16)$$

где n — баллистическое отклонение светового указателя гальванометра, C_6 — его баллистическая постоянная.

С учетом (16) вместо (15) получим:

$$B = \frac{R}{N_1 S_1} C_6 n. \quad (17)$$

Баллистическую постоянную гальванометра C_6 можно определить, разряжая через гальванометр конденсатор известной емкости C , заряженный до напряжения U .

Однако при разрядке конденсатора движение рамки гальванометра будет происходить в режиме свободных колебаний (цепь разомкнута), а при измерении магнитного потока — в режиме, близком к критическому (рамка замкнута на

измерительную катушку), вследствие чего при одном и том же значении Q баллистическое отклонение светового указателя будет разным.

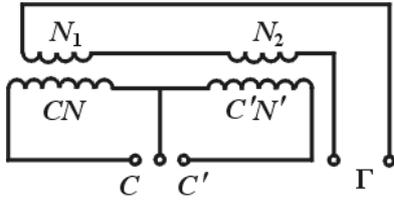


Рис. 3.39

Поэтому измерение магнитной индукции B обычно выполняют иначе: ее сравнивают с индукцией нормального соленоида, индукция которого известна. В качестве нормального соленоида используют длинный соленоид без сердечника с плотно намотанными витками. Индукцию B' магнитного поля такого соленоида с достаточной точностью можно вычислить по формуле (5):

$$B' = \mu_0 \mu n' I' = \mu_0 \mu \frac{N'}{l'} I', \quad (18)$$

где I' — ток в нормальном соленоиде, l' — его длина, N' — число витков.

На нормальном соленоиде расположена своя измерительная катушка с числом витков N_1' и площадью сечения S_1' , которая также замкнута на гальванометр. При включении и выключении тока в нормальной катушке согласно (17) имеем:

$$B' = \frac{R'}{S_1'} C_6 n'. \quad (19)$$

Выразив C_6 из (19) и подставив в формулу (17), получим:

$$B = B' \frac{N_1' S_1'}{N_1 S_1} \frac{n}{n' R'} \quad (20)$$

Измерительные катушки N_1 и N_2 (рис. 3.39) соединены последовательно и постоянно замкнуты на гальванометр, поэтому независимо от того, измеряется B или B' , сопротивление цепи гальванометра остается постоянным, т. е. $R = R'$. Поэтому вместо (20) с учетом (18) можно записать:

$$B = \mu_0 \mu \frac{N'}{l'} \frac{N_1' S_1'}{N_1 S_1} \frac{I'}{n'} n \quad (21)$$

Если обозначить

$$C = \mu_0 \mu \frac{N'}{l'} \frac{N_1' S_1'}{N_1 S_1}, \quad (22)$$

то

$$B = C \frac{I'}{n'} n. \quad (23)$$

Коэффициент C в выражении (23) для данной установки можно вычислить еще до начала измерений. Необходимые для этого данные указаны на панели установки. Выражение (23) можно записать в виде:

$$B = An, \quad (24)$$

где

$$A = C \frac{I'}{n'} \quad (25)$$

для данной установки также величина постоянная и может быть определена экспериментально.

Описание установки и метода. Исследуемый соленоид C (рис. 3.40) и нормальный C' закреплены на одной подставке. Одни концы их обмоток соединены между собой и подведены к общей клемме, а другие к клеммам C и C' соответственно. На нормальном соленоиде C' закреплена неподвижная измерительная катушка N_1' . Измерительная катушка N_1 находится внутри исследуемого соленоида C . При помощи веньерного устройства ее можно перемещать вдоль соленоида. Положение измерительной катушки определяется при помощи шкалы, прикрепленной над соленоидом, и подвижного указателя, перемещаемого вместе с измерительной катушкой.

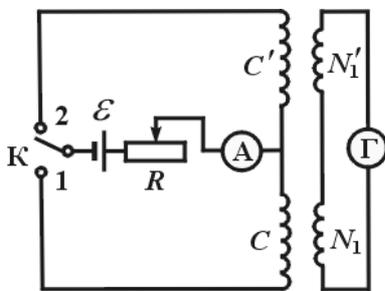


Рис. 3.40

Измерительные катушки N_1 и N_1' соединены последовательно, и их свободные концы подключены к клеммам, расположенным на панели, и обозначены буквой Γ . Для питания установки используется аккумулятор \mathcal{E} .

Ток исследуемого и нормального соленоидов регулируется реостатом R и измеряется амперметром A . Поочередное включение исследуемого соленоида C и нормального C' осуществляется при помощи переключателя K . При замыкании его в положение 1 включается исследуемый соленоид C , а в положение 2 — нормальная катушка C' . К клеммам Γ присоединяется зеркальный гальванометр.

Порядок выполнения упражнения

1. Соберите схему согласно рис. 3.40. Включите вилку шнура зеркального гальванометра в сеть 220 В. Поставьте переключатель в положение «х1», а световой указатель — на нулевое деление шкалы.
2. Установите максимальное сопротивление реостата R , переключатель K поставьте в положение 2 . Передвигая ползунок реостата, установите ток в цепи нормального соленоида 0,5 А.
3. Последовательно замыкайте и размыкайте переключатель K и каждый раз записывайте отклонение светового указателя гальванометра n' , соответствующее данному току I . Результаты измерений запишите в таблицу 1. Повторите измерения при токах 0,6 и 0,7 А.

Таблица 1

№ п/п	I', A	$n', \text{дел.}$	$C, \text{Тл/А}$	$A, \text{Тл/дел.}$	$\bar{A}, \text{Тл/дел.}$
-------	----------------	-------------------	------------------	---------------------	---------------------------

4. Используя формулы (22) и (25), вычислите коэффициент C и постоянную A . Найдите среднее значение A . Результаты измерений запишите в таблицу 1.

5. Переключатель K поставьте в положение 1. Перемещением подвижного контакта реостата R установите ток I в цепи исследуемого соленоида C , равным 0,6 А. При помощи веньерного устройства расположите измерительную катушку N_1 возле одного из его концов.

6. Переключателем K последовательно замыкайте и размыкайте цепь исследуемого соленоида C . Каждый раз записывайте максимальное отклонение светового указателя n и найдите его среднее значение. По формуле (24) вычислите магнитную индукцию B . Результаты измерений запишите в таблицу 2.

Таблица 2

№ п/п	I, A	$x, \text{см.}$	$n, \text{дел.}$	$B, \text{мТл}$
-------	---------------	-----------------	------------------	-----------------

7. Вращением ручки веньерного устройства перемещайте измерительную катушку N_1 от одного конца соленоида к другому (через 2 см.) и каждый раз определяйте магнитную индукцию B . Результаты записывайте в таблицу 2.

8. Постройте график $B = f(x)$, где x — расстояние от одного из концов соленоида C до точки, в которой определяется магнитная индукция B .

9. По формуле (4) вычислите магнитную индукцию B в центре соленоида и сравните ее с результатами опытов.

У п р а ж н е н и е 2. *Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.*

Оборудование: тангенс-гальванометр, миллиамперметр, реостат (500 Ом), аккумулятор, двойной переключатель, соединительные провода.

Введение

Земля является естественным магнитом. Поэтому в окружающем ее пространстве существует магнитное поле. Природа магнитного поля Земли еще окончательно не выяснена. Существование магнитного поля в любой точке Земли можно установить при помощи магнитной стрелки. Если подвесить магнитную стрелку на нити (рис. 3.41), закрепленной в ее центре тяжести, то стрелка расположится вдоль вектора индукции \vec{B} магнитного поля в данной точке. В северном полушарии северный конец стрелки расположится ниже центра тяжести.

Ось стрелки образует с горизонтом некоторый угол θ , который называется углом наклона (на экваторе этот угол равен нулю).

Вертикальная плоскость, в которой расположится стрелка, называется плоскостью магнитного меридиана.

Одноименные магнитные и географические полюса Земли расположены диаметрально противоположно. Северный магнитный полюс находится вблизи южного географического полюса, и наоборот. Из-за несовпадения магнитных и географических полюсов Земли не совпадают и плоскости магнитного и географического меридианов. Угол между магнитным и географическим меридианами, который проходит через данную точку поверхности, называется углом магнитного склонения. Вектор магнитной индукции (рис. 3.41) можно разложить на две составляющие: вертикальную \vec{B}_B и горизонтальную $\vec{B}_Г$. Магнитная стрелка, закрепленная на вертикальной оси, под действием горизонтальной составляющей $B_Г$ располагается в плоскости магнитного меридиана.

В данной работе горизонтальная составляющая индукции магнитного поля Земли определяется при помощи тангенс-гальванометра.

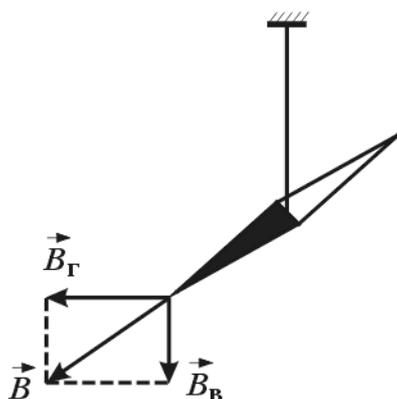


Рис. 3.41



Рис. 3.42

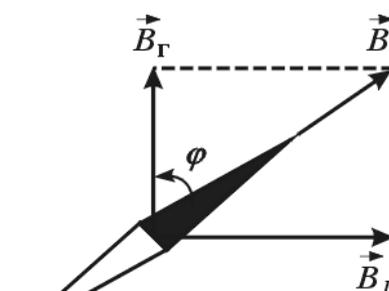


Рис. 3.43

Описание установки метода. Устройство тангенс-гальванометра схематично показано на рис. 3.42. Он состоит из несколько вертикально расположенных круговых витков проволоки, закрепленных на подставке. В центре витков на вертикальной оси расположена магнитная стрелка. При отсутствии в витках тока магнитная стрелка под действием горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли располагается в плоскости магнитного меридиана. При наличии в витках тока на магнитную стрелку действует горизонтальная составляющая магнитного поля Земли $\vec{B}_Г$ и магнитного поля тока \vec{B}_I . Стрелка располагается в направлении равнодействующей этих полей:

$$\vec{B} = \vec{B}_Г + \vec{B}_I.$$

Для удобства расчетов при выполнении работы тангенс-гальванометр располагается таким образом, чтобы его витки находились в плоскости магнитного меридиана. В этом случае на стрелку действуют два взаимноперпендикулярных

поля (рис. 3.43), и она расположится под углом φ к плоскости магнитного меридиана. Из рис. 3.43 имеем:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B_I}{B_\Gamma},$$

откуда

$$B_\Gamma = \frac{B_I}{\operatorname{tg} \varphi}.$$

Индукцию магнитного поля в центре витков тангенс-гальванометра определим по формуле:

$$B_I = \mu_0 \mu \frac{NI}{2R},$$

где N — число витков, R — их радиус, I — величина тока.

$$\text{Тогда } B_\Gamma = \frac{\mu_0 \mu NI}{2R \operatorname{tg} \varphi}.$$

Для выполнения работы собирают схему согласно рис. 3.44. Величина тока в тангенс-гальванометре регулируется реостатом R и измеряется миллиамперметром. Двойной переключатель служит для изменения направления тока.

Порядок выполнения упражнения

1. Установите максимальное сопротивление реостата R .
2. Расположите витки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана (по магнитной стрелке).

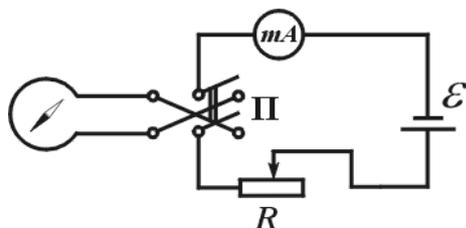


Рис. 3.44

3. Замкните переключатель Π и перемещением подвижного контакта реостата добейтесь, чтобы стрелка компаса отклонилась примерно на 45° .
4. Подождите, пока стрелка уравнивается, и сделайте отсчет угла φ_1 по шкале компаса.
5. Не изменяя величины тока, при помощи переключателя Π измените его направление на противоположное и сделайте отсчет угла φ_2 . Найдите среднее значение φ .

6. Измерения повторите 3 — 5 раз.
7. Измерьте радиус R витков тангенс-гальванометра. Число витков $N = 40$. Вычислите B_Γ и найдите ее среднее значение.
8. Повторите измерения при других значениях тока. Результаты измерений и расчетов запишите в таблицу 3.

Таблица 3

№ п/п	I, A	$\varphi_1, ^\circ$	$\varphi_2, ^\circ$	$\varphi, ^\circ$	$B_\Gamma, \text{мкТл}$
-------	---------------	---------------------	---------------------	-------------------	-------------------------

9. Конечный результат запишите в виде:

$$B_{\Gamma} = (\bar{B}_{\Gamma} \pm \Delta B_{\Gamma}) \text{ мкТл.}$$

ЗАДАНИЕ ДЛЯ УИР

Используя тангенс-гальванометр, определите магнитный момент прямолинейного постоянного магнита.

При помощи инclinатора определите угол наклона и найдите полную индукцию магнитного поля Земли.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое баллистическое отклонение гальванометра?
2. Выведите формулу (2).
3. В каких единицах измеряется магнитная индукция в СИ? Получите ее размерность.
4. Что такое баллистическая постоянная гальванометра? Как ее определить?
5. Почему при выполнении работы плоскость витков должна быть перпендикулярна вектору магнитной индукции? Стрелки компаса?
6. Как устанавливается магнитная стрелка в магнитном поле?
7. Объясните, как определить направление тока в витках по отклонению стрелки.
8. Запишите формулу, по которой определяется магнитная индукция в центре кругового тока.
9. Укажите направление вектора магнитной индукции поля Земли на экваторе и на полюсе.
10. Докажите, что относительная погрешность измерения B_{Γ} минимальная, когда угол $\varphi = 45^{\circ}$.