

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА

С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ХОЛЛА

Цель работы: определение магнитной индукции вдоль оси соленоида с помощью датчика Холла.

Приборы и принадлежности: лабораторная установка, включающая в себя датчик Холла, соленоид, источник постоянного тока УНИП, выпрямитель, миллиамперметр.

Объект измерений: сила тока через соленоид, э. д. с. Датчика Холла.

Средства измерений: милливольтметр, амперметр.

1. Теоретическая часть

Соленоид – это разновидность катушек индуктивности, представляющая собой пустотелый цилиндр с нанесенной на него обмоткой в один или несколько слоев. Название этого элемента происходит от греческих слов «*солинас*» («труба») и «*эйдос*» («подобный»). Соленоиды широко применяются в технике и служат для создания в определенном объеме однородного поля или используются для компенсации внешних магнитных полей. Соленоиды применяются, в основном, в тех случаях, когда необходимо создать достаточно интенсивное поле, а размеры устройства, создающего это поле, ограничены.

Получим выражения для индукции магнитного поля на оси кругового тока и оси соленоида с помощью закона Био-Савара-Лапласа (рис. 1). Предположим, что виток круглый и можно пренебречь поперечным сечением провода. Для этих условий вектор индукции магнитного поля в вакууме будет равен:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi R} \frac{[d\vec{l}, \vec{\rho}_0]}{\rho^3},$$

где $d\vec{l}$ – элемент проводника с током; $\vec{\rho}_0$ — единичный вектор, направленный от элемента dl к исследуемой точке M ; ρ – длина

отрезка, соединяющего элемент контура dl с точкой M .

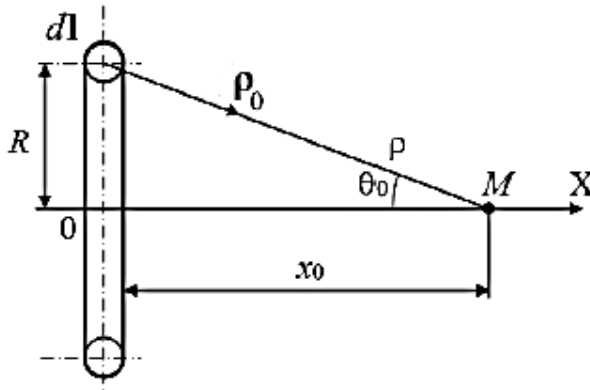


Рис. 1. Схема для расчета индукции магнитного поля на оси соленоида для одного витка

Интегрирование ведется по замкнутой линии тока, создающего магнитное поле. В точках, лежащих на оси кругового тока, вектор индукции по условиям симметрии направлен вдоль этой оси, и поэтому достаточно просуммировать проекции на ось векторов индукций от каждого элемента $d\vec{l}$. Поскольку элемент $d\vec{l}$ составляет с вектором ρ_0 прямой угол, то:

$$[d\vec{l}, \vec{\rho}_0] = dl.$$

Кроме того, как видно из рис. 1 следует:

$$\rho^2 = R^2 + x_0^2, \quad \sin \theta_0 = \frac{R}{\rho},$$

причем как угол θ_0 , так и расстояние ρ до точки M одинаковы для всех элементов длины кольца.

Проекция на ось X индукции dB_x , создаваемой отдельным элементом длины:

$$dB_x = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi \rho^2} \cdot \sin \theta_0,$$

поэтому сумма этих проекций будет определяться выражением:

$$\begin{aligned}
 B = dB_x &= \frac{\mu_0 I \sin \theta_0}{4\pi \rho^2} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 I \sin \theta_0}{4\pi \rho^2} \cdot 2\pi R = \\
 &= \frac{\mu_0 I R^2}{2\rho^3} = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x_0^2)^{3/2}}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Выражение (1) позволяет определить индукцию магнитного поля на оси соленоида (цилиндрической катушки) с равномерно распределенными витками. Действительно индукция магнитного поля в точке M (рис. 2), лежащей на оси соленоида, направлена вдоль этой оси и равна сумме индукций магнитного поля, создаваемых в точке M всеми витками.

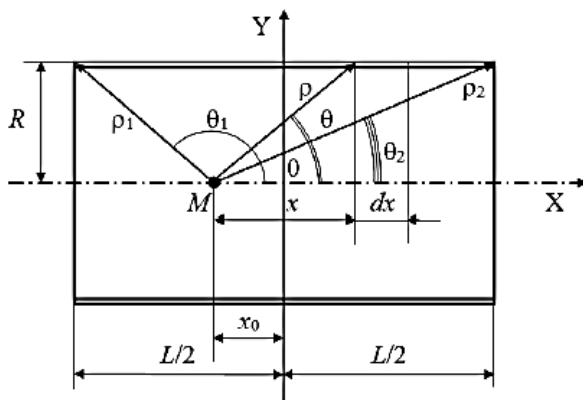


Рис. 2. Схема для расчета индукции магнитного поля на оси соленоида

Если ω – число витков, приходящееся на единицу длины соленоида, то на малый участок длины dx приходится ωdx витков, создающих в точке M поле, индукция которого:

$$dB_x = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x_0^2)^{3/2}} \cdot \omega dx.$$

Как следует из рис. 2:

$$\rho = \sqrt{R^2 + x^2} = \frac{R}{\sin \theta}, \quad x = R \cdot \operatorname{tg} \theta,$$

откуда:

$$dx = -R \frac{d\theta}{\sin^2 \theta}.$$

С учетом этих соотношений получим:

$$dB_x = -\mu_0 \frac{\omega I}{2} \sin \theta d\theta.$$

Интегрируя это выражение по всем значениям угла θ , получим:

$$B_x = -\mu_0 \frac{\omega I}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \mu_0 \frac{\omega I}{2} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1),$$

где:

$$\cos \theta_1 = -\frac{0,5L - x_0}{\sqrt{R^2 + (0,5L - x_0)^2}},$$

$$\cos \theta_2 = -\frac{0,5L + x_0}{\sqrt{R^2 + (0,5L + x_0)^2}}.$$

Пока точка наблюдения находится внутри соленоида и не слишком близко к его краям, магнитное поле остается приблизительно однородным. Нетрудно заметить, что максимальная величина магнитной индукции будет в центре соленоида при $x_0 = 0$.

Если длина соленоида во много раз больше его радиуса ($L \gg R$), то соленоид можно считать бесконечно длинным. Для точек, расположенных на оси такого соленоида и достаточно удаленных от его концов, $\theta_1 \approx \pi$ и $\theta_2 = 0$, и, следовательно, индукция магнитного поля в вакууме будет равна:

$$B = \mu_0 \omega I. \quad (2)$$

Так как магнитная проницаемость воздуха приблизительно равна единице ($\mu \approx 1$), можно считать верной эту формулу и для расчета B в воздухе.

Для изучения распределения индукции магнитного поля по длине соленоида в данной работе применяются полупроводниковые элементы, использующие эффект Холла — явление, заключающееся в возникновении э. д. с. при воздействии магнитного поля на ток, протекающий через полупроводник.

Получим выражение для э. д. с. Холла в полупроводнике. Выберем направление вектора B и тока I_x , как указано на рис. 3. Тогда силу Лоренца F , которая действует на носители тока в полупроводнике n -типа, движущиеся в магнитном поле, можно записать в виде:

$$\vec{F} = -e[\vec{v}, \vec{B}],$$

где v – средняя скорость носителей тока в направлении линии тока.

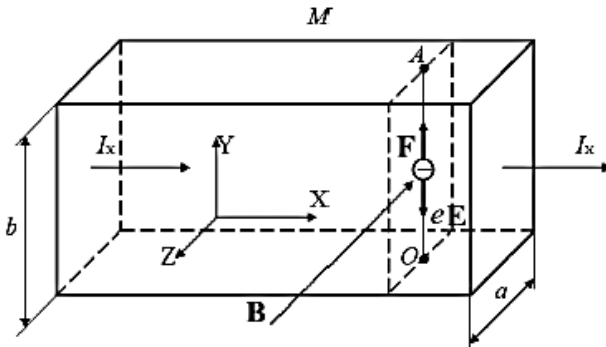


Рис. 3. Силы, действующие на носитель тока в полупроводнике

Под влиянием этой силы электроны отклоняются к верхней грани пластины. В результате того, что у нижней грани образуется недостаток электронов, а у верхней избыток, в пластине возникает поперечное электрическое поле с напряженностью \vec{E} , направленное для выбранных направлений тока и вектора \vec{B} снизу вверх. Сила $e\vec{E}$, действующая на электрон, направлена в сторону, противоположную направлению силы Лоренца \vec{F} . В случае равновесного процесса протекания тока по полупроводнику эти силы уравниваются, то есть (в проекциях на ось Y);

$$\begin{aligned} eE &= evB, \\ E &= vB. \end{aligned}$$

Если пластина M достаточно длинная и широкая, то поперечное электрическое поле можно считать однородным. Тогда разность потенциалов U_Y между точками A и O равна:

$$U_Y = -Eb = -vBb. \quad (3)$$

Ток в пластине I_x обусловлен упорядоченным движением электронов. Если число их в единице объема пластинки равно n_0 , а их средняя величина скорости в направлении линии тока равна v , то силу тока I_x можно выразить с помощью формулы:

$$I_x = evn_0S = evn_0ab, \quad (4)$$

где $S = ab$ – площадь поперечного сечения пластинки.

Заменив в формуле (4) v из соотношения (3), получим:

$$U_Y = -\frac{1}{en_0} \cdot \frac{I_x B}{a} = R_x \cdot \frac{I_x B}{a}. \quad (5)$$

Константа R_x в выражении (5) называется коэффициентом Холла. Она имеет размерность $[м^3/А \cdot с]$. Как видно, коэффициент Холла определяется концентрацией и знаком носителей тока в полупроводнике.

Из формулы (5) следует, что разность потенциалов, возникающая при прохождении тока через полупроводник, помещенный в магнитное поле, пропорциональна индукции магнитного поля при постоянной силе тока через датчик.

Это явление в настоящее время широко используется для измерения магнитной индукции. Действительно, измерив силу тока в полупроводнике и э. д. с. Холла, можно рассчитать значение магнитной индукции поля, в котором находится полупроводник, по формуле:

$$B = \frac{U_Y a}{I_x R_x}.$$

2. Методика проведения измерений и описание установки

В работе необходимо проверить линейность зависимости магнитной индукции поля соленоида от величины силы тока, протекающего через него, и рассмотреть распределение индукции магнитного поля вдоль оси соленоида.

Изучение магнитного поля соленоида проводится с помощью датчика Холла на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 4.

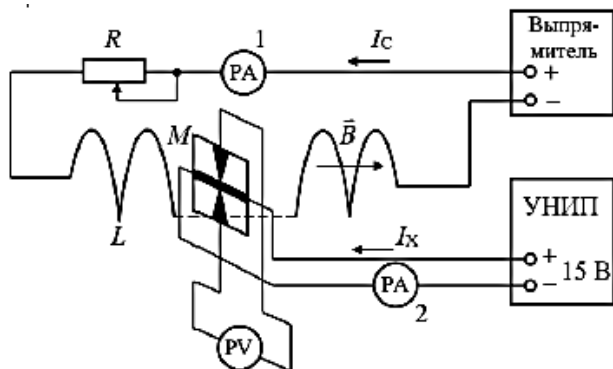


Рис. 4. Схема лабораторной установки

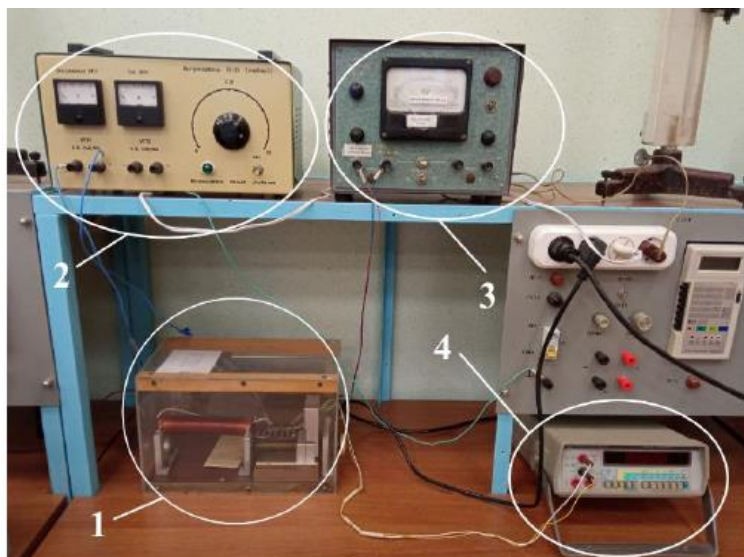


Рис. 5. Вид лабораторной установки: 1 – соленоид с датчиком Холла, 2 – выпрямитель с амперметром, 3 – источник постоянного тока УНИП с миллиамперметром, 4 – милливольтметр

Датчик Холла M расположен внутри соленоида L и может перемещаться из центра соленоида к одному из его краев с

помощью координатного механизма. Для создания тока через датчик Холла используется источник постоянного тока УНИП. Контроль силы тока через датчик осуществляется при помощи миллиамперметра (на рис. 4. он обозначен как РА 2). В качестве источника питания соленоида используется выпрямитель. Контроль силы тока через соленоид производится с помощью амперметра РА 1, установленного на передней панели выпрямителя. Э. д. с. Холла измеряется при помощи милливольтметра РВ. В исследуемое магнитное поле помещают датчик Холла, устанавливают номинальное значение силы тока через датчик и измеряют э. д. с. Холла, которая, согласно (5), пропорциональна индукции магнитного поля.

Общий вид установки представлен на рис. 5.

Окончательный расчет величины индукции магнитного поля соленоида производится по формуле:

$$B = \frac{U_Y}{I_x k}, \quad (6)$$

где:

$$k = \frac{R_x}{a} \left(\frac{B}{A \cdot Tл} \right).$$

Для каждой лабораторной установки численные значения k и силы тока через датчик I_x заданы.

3. Порядок выполнения работы

1. Занести численные характеристики используемой лабораторной установки в поля перед табл. 1: I_x, k, L, R .

2. Датчик Холла в центре соленоида.

2.1. Установить датчик Холла в центр соленоида с помощью координатного механизма (винта) так, чтобы центральный штрих на механизме совпадал с отметкой $x_0 = 0$ мм (рис. 6).

2.2. Включить в сеть стенд, выпрямитель с амперметром 2 (рис. 7), источник постоянного тока УНП с миллиамперметром 3 (рис. 8) и милливольтметр 4 (рис. 9).

2.3. Установить величину силы тока I_x через датчик Холла, указанную на установке, с помощью ручки «Регулировка датчика Холла» на источнике питания (рис. 8) на максимум шкалы.

Таблица 1

Экспериментальные данные

№ п/п	$x_0 = 0$ мм				$x_0 = 75$ мм			
	Сила тока через соленоид I_c , А	Э.Д.С. Холла U_H , В $\times 10^{-3}$	Индукция B , Тл 10^{-3}	ω , м $^1 \times 10^3$	Сила тока через соленоид I_c , А	Э.Д.С. Холла U_H , В $\times 10^{-3}$	Индукция B , Тл 10^{-3}	ω , м $^1 \times 10^3$
1	1,5				1,5			
2	2,0				2,0			
3	2,5				2,5			
4	3,0				3,0			
5	3,5				3,5			
среднее $\langle \omega \rangle$					среднее $\langle \omega \rangle$			

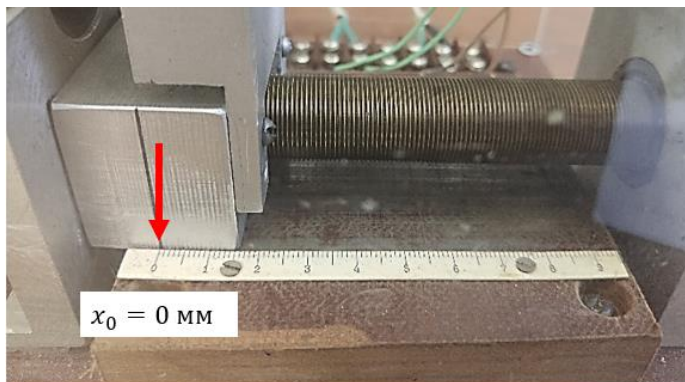
Рис. 6. Установка датчика Холла в точку $x_0 = 0$ мм



Рис. 7. Выпрямитель с амперметром



Рис. 8. Источник постоянного тока



Рис. 9. Милливольтметр

2.4. Установить на выпрямителе с амперметром с помощью поворотной ручки «Регулятор тока соленоида» силу тока $I_c = 1,5$ А. Измерить соответствующее значение э. д. с. Холла U_Y на милливольтметре.

2.5. Выполнить п. 2.4. для других значений тока соленоида с шагом 0,5 А и записать экспериментальные данные в табл. 1.

3. Перемещение датчика Холла от центра к краю.

Таблица 2

Экспериментальные данные

№ п/п	Координата x , мм ($x_0 = 0$)	Э.Д.С. Холла $U_Y, \text{В} \cdot 10^{-3}$	Индукция B , $\text{Тл} \cdot 10^{-3}$
1	0		
2	5		
3	10		
...	...		
17	80		

3.1. Установить силу тока через соленоид тока $I_c = 2,5$ А. Оставаясь на отметке $x_0 = 0$ мм измерить величину э. д. с. Холла. Перемещая датчик из центра соленоида к краю с помощью

винта, производить замеры э. д. с. Холла через каждые 5 мм. Экспериментальные данные записывают в табл.2.

4. Датчик Холла на краю соленоида.

4.1. Установить датчик Холла на край соленоида с помощью координатного механизма так, чтобы центральный штрих на механизме совпадал с отметкой $x = 75$ мм.

4.2. Установить на выпрямителе с амперметром с помощью поворотной ручки «Регулятор тока соленоида» силу тока $I_c = 1,5$ А. Измерить соответствующее значение э. д. с. Холла U_Y на милливольтметре.

4.3. Выполнить п. 4.2. для других значений тока соленоида с шагом 0,5 А и записать экспериментальные данные в табл. 1.

5. Выключить установку.

4. Обработка результатов измерений

1. Используя формулу (6), рассчитать значение магнитной индукции поля на оси соленоида для $x_0 = 0$ мм и $x_0 = 75$ мм, и результаты занести в табл. 1.

2. Рассчитать число витков ω на единицу длины соленоида для случаев $x_0 = 0$ мм и $x_0 = 75$ мм, используя выражение (2). Результаты занести в табл. 1.

4. Рассчитать относительную погрешность вычисления магнитной индукции для опытов № 1, 3, 5 табл.1 при $x_0 = 0$ мм:

$$\delta_{Bi} = \frac{\Delta B_i}{B_i} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta I_x}{I_{xi}} + \frac{\Delta U_Y}{U_{Yi}}, \quad (7)$$

где ΔI_x и ΔU_Y – абсолютные приборные погрешности. Относительную погрешность для a принять равной: $\frac{\Delta a}{a} = 0,05$.

5. Рассчитать абсолютную погрешность для каждого из указанных опытов по формуле:

$$\Delta B_i = \delta_{Bi} \cdot B_i. \quad (8)$$

6. Записать результат в стандартном виде для каждого опыта:

$$B = B_i \pm \Delta B_i, \text{ ед. изм.}$$

7. По данным табл. 1 построить график зависимости $B = f(I_c)$ для случаев $x_0 = 0$ мм и $x_0 = 75$ мм.

8. По данным табл.2 построить график зависимости индукции магнитного поля соленоида от координаты $B = f(x)$. Отметить на графике участки, соответствующие однородному и неоднородному характеру зависимости магнитной индукции от координаты.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект Холла?
2. Дайте определение вектора магнитной индукции. Какова единица измерения этой величины в СИ?
3. Запишите выражение для силы Лоренца.
4. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа.
5. Выведите выражение для магнитной индукции в центре кругового тока.
6. При каком условии соленоид можно считать бесконечно длинным?
7. Получите формулу для э. д. с. Холла.
8. Как изменится индукция магнитного поля на оси соленоида при увеличении числа витков на единицу длины в два раза при прочих равных условиях?
9. Как изменится э. д. с. Холла при увеличении в два раза продольного тока через датчик и уменьшении в два раза индукции магнитного поля?
10. Как изменится направление силы Лоренца в случае изменения знака носителей заряда, если направление продольного тока через датчик не изменилось?
11. Как должна быть ориентирована плоскость датчика Холла относительно магнитных силовых линий соленоида?
12. Начертите схему экспериментальной установки и поясните назначение отдельных элементов.

Рекомендуемая литература

В качестве литературы по магнитному полю и соленоидам можно рекомендовать [1, § 6.2-6.5; 3, § 110-117]. Там же можно найти ответы на некоторые контрольные вопросы.

1. Савельев И. В. Курс общей физики. В 5 тт. Т. 2. Электричество и магнетизм: Учебное пособие для вузов. 5-е изд., стер. СПб.: Издательство «Лань», 2021. — 352 с.

2. Яворский Б.М, Детлаф А.А. Курс физики. – М.: Издательский центр «Академия», 2015. – 720 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 560 с.