

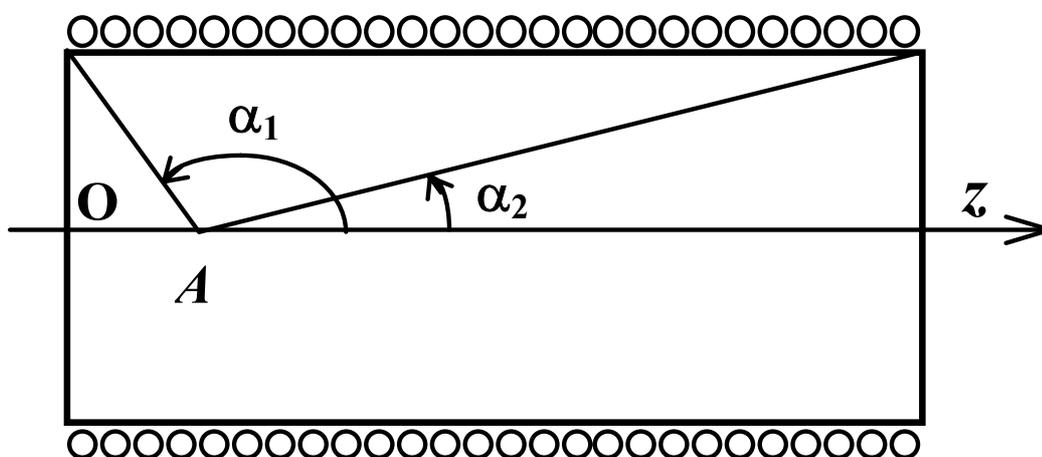


Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

Лабораторный практикум по общей физике

Электричество и магнетизм

Изучение магнитного поля в соленоиде



МОСКВА 2008

# Изучение магнитного поля в соленоиде

**Цель работы:** Изучение лабораторных методов получения и измерения однородных магнитных полей.

## Теоретическое введение

Получение однородного магнитного поля в определенном объеме – это задача, часто встречающаяся как в постановке физического эксперимента, так и для обеспечения работы ряда электронных устройств. В зависимости от требуемой величины магнитной индукции  $B$ , размеров рабочей области, расходуемой мощности, веса и конструктивных требований эта проблема решается разными способами. Магнитное поле может быть создано с помощью катушек с током, электромагнитов и постоянных магнитов. Постоянные магниты не требуют энергозатрат, но не дают возможности эффективно и просто управлять величиной магнитного поля. Величина получаемой магнитной индукции для них определяется остаточной намагниченностью материала магнита и для разных материалов может иметь разные значения до величин порядка тесла. Постоянные магниты широко применяются в электронной технике в приборах, где требуется неизменное поле определенной величины. В лабораторной практике, где энергозатраты не являются главным критерием, а важно удобство управления, более распространены первые два метода. Рассмотрим особенности их применения.

Для получение относительно слабых полей порядка десятков-сотен миллитесла вплоть до 0.1 Тл чаще всего используются катушки с током, при этом поле высокой степени однородности можно получить, используя соленоид или катушки Гельмгольца. При данных значениях поля необходимые токи невелики и легко обеспечиваются простыми лабораторными средствами.

Поля средней интенсивности порядка 0.1 - 1 Тл получить предыдущим способом труднее, поскольку сила тока при этом пропорционально возрастает, а рассеиваемая тепловая мощность и мощность источников питания растет как квадрат тока, что и порождает ряд технических проблем. Для получения таких полей в лабораторной практике широко используются электромагниты, т.е. катушки с током, одетые на ферромагнитный сердечник с зазором, чаще всего железный. Как известно, относительная магнитная проницаемость железа может достигать нескольких тысяч. Таким образом, сравнительно малым током можно вызвать большую намагниченность сердечника и получить в зазоре электромагнита магнитное поле с индукцией на несколько порядков большей, чем в его отсутствие. Физическим ограничением для получения сильных полей данным методом является величина намагниченности насыщения магнетика, достигая которую магнетик перестает вносить дальнейший вклад в величину индукции магнитного поля.

По этой причине для получения сильных магнитных полей порядка десятков тесла применение магнитных сердечников не дает никакого выигрыша, поскольку требуемые поля намного превосходят намагниченность насыщения всех известных магнетиков. Поэтому для получения сильных полей используются только катушки с током. Проблемы мощности решаются либо применением кратковременного, импульсного, режима работы, либо использованием сверхпроводящих катушек. Подобно постоянным магнитам, сверхпроводящие магниты после возбуждения поля теоретически не требуют дальнейшего энергоснабжения. Однако значительная мощность должна тратиться на охлаждение обмоток, поскольку известные в настоящее время и пригодные к изготовлению катушек материалы обладают сверхпроводимостью только при низких, криогенных температурах.

В данной работе изучается магнитное поле соленоида. Измерение индукции магнитного поля осуществляется с использованием датчика на эффекте Холла.

**Соленоидом** называется цилиндрическая катушка с обмоткой. Индукция поля на его оси определяется известной формулой (здесь и далее все формулы приводятся в системе единиц СИ)

$$B = 0.5\mu_0 nI(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1), \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1.2566 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $n$  – число витков на 1 метр длины соленоида,  $I$  – сила тока через катушку,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы, под которыми видны концы соленоида из точки  $A$ , для которой ищется поле (рис.1).

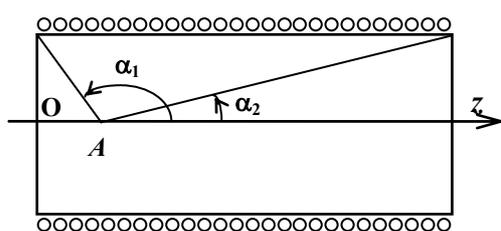


Рис.1

В центре длинного соленоида с большим отношением длины к диаметру  $L/D \geq 10$  поле близко к предельному значению  $B = \mu_0 nI$  и характеризуется высокой степенью однородности как в продольном, как и в радиальном направлении.

Соленоиды позволяют получать поля до 0.2 Тл, а при специальном охлаждении и больше. К недостаткам соленоида можно отнести то, что исследуемый объект должен задвигаться далеко в его центр, где доступ к нему ограничен.

### **Измерение магнитного поля с помощью эффекта Холла.**

Для измерения индукции магнитного поля широкое применение находят датчики на основе эффекта Холла. Этот эффект состоит в возникновении поперечного электрического поля в проводнике с протекающим током при приложении магнитного поля, перпендикулярного к направлению тока. Рассмотрим прямоугольный проводник с электрическим током плотности  $j$ , текущим вдоль оси  $ox$  (рис. 2). При приложении поперечного магнитного поля с индукцией  $B$  вдоль оси  $oz$  на движущиеся заряды сразу начинает действовать сила Лоренца  $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , направленная перпендикулярно к скорости  $\mathbf{v}$ , в нашем случае вверх. В первый момент она вызывает смещение всех зарядов вверх, благодаря чему на верхней поверхности появляется положительный

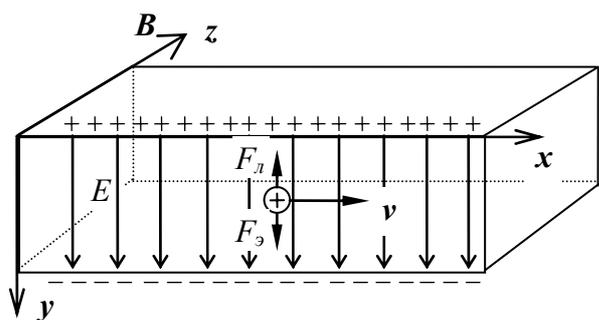


Рис. 2

поверхностный заряд, на нижней – отрицательный. Эти заряды порождают электрическое поле  $E$ , такое, что электрическая сила  $F_э = qE$  полностью компенсирует силу Лоренца, и все заряды дальше будут двигаться строго по оси  $ox$ . Приравнявая эти силы, получаем  $E = vB$ .

Электрическое поле вызывает появление разности потенциалов между верхней и нижней поверхностью  $U = Ed = vBd$ , которая прямо пропорциональна индукции поля  $B$ . Это напряжение – ЭДС Холла – можно измерить вольтметром, шкалу которого можно проградуировать в единицах магнитной индукции. Поскольку ЭДС прямо пропорциональна также и току  $I$  через проводник ( $v \propto I$ ), при всех измерениях ток должен быть строго определенной величины.

Обычно датчики Холла изготавливаются из полупроводников, где, в отличие от металлов, движение зарядов хорошо описывается приведенной выше классической (т.е. не квантовой) теорией и экспериментальная ЭДС Холла действительно с хорошей точностью прямо пропорциональна величине поля. Преимуществами датчиков Холла являются их малые размеры ( $1 \text{ мм}^2$  и менее) и очень малая инерционность, что позволяет использовать их на высоких частотах до  $10^{10}$  Гц.

## Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из соленоида, и датчика Холла, которые могут закрепляться на опорах, скользящих по направляющему рельсу со шкалой, позволяющей устанавливать их положение с точностью до миллиметра. Источник стабилизированного тока для создания магнитного поля и схема, обслуживающая датчик Холла, размещены в одном электронном блоке, питающемся от сети переменного тока 220 В. Датчик Холла подключается к

блоку специальным разъемом. В комплект установки входят два цифровых мультиметра М-830В с отдельными блоками питания, один из которых используется как амперметр для измерения силы тока, создающего магнитное поле, а второй как вольтметр для измерения сигнала с датчика Холла, предварительно усиленного инструментальным усилителем постоянного тока с коэффициентом усиления 100.

## Методика измерений.

Датчик Холла, соленоид устанавливаются на опорном рельсе и визуально ориентируются вдоль его оси, после чего закрепляются стопорными винтами. В процессе измерений датчик может перемещаться как вдоль рельса, так и в поперечном направлении. Высота установки всех элементов в держателях фиксирована и не требует регулировки. Электрическая схема установки показана на рис.3.

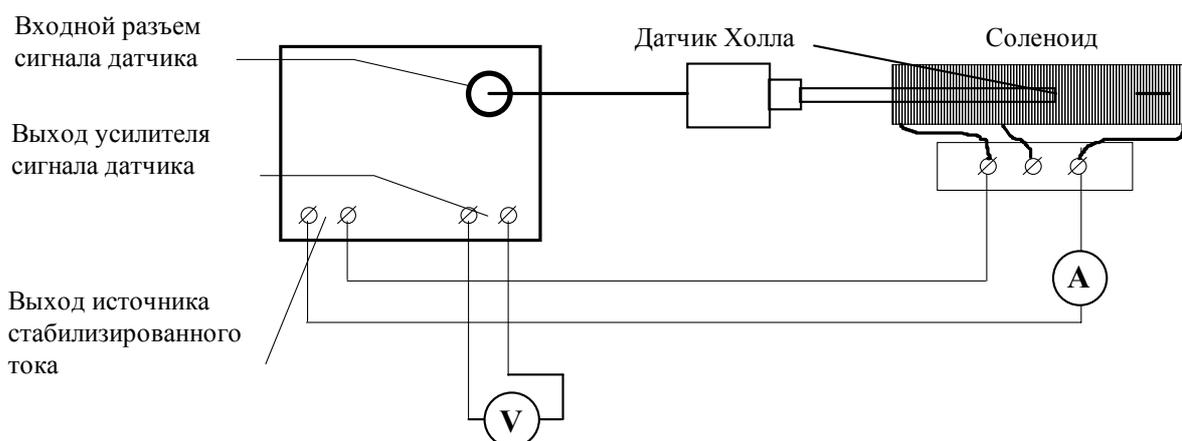


Рис. 3 Электрическая схема экспериментальной установки.

### Правила техники безопасности.

**При включенном источнике тока никаких изменений в схеме производить нельзя.**

*Блок питания включаются в последнюю очередь после сборки схемы и отключаются перед ее разборкой. До включения источников и перед их выключением регуляторы выходного тока должны быть установлены на минимум.*

## **Упражнение 1. Калибровка датчика Холла**

Для создания эталонного магнитного поля, необходимого калибровки датчика Холла, целесообразно использовать соленоид, поскольку необходимые для расчета индукции поля его геометрические размеры и плотность намотки – легко и точно измеряемые величины. Имеющийся соленоид имеет трехслойную намотку с плотностью  $n = 6000$  витков на метр, его длина  $L = 190$  мм и диаметр  $D = 20$  мм. Соленоид состоит из двух секций: секция 1 имеет длину 60 мм, секция 2 – длину 130 мм. Калибровку лучше проводить в центре максимально длинного соленоида с  $L = 190$  мм, поскольку с увеличением отношения  $D/L$  погрешности в измерении  $D/L$  меньше сказываются на расчете поля, так как входящие в формулу (3)  $\cos\alpha_1$  и  $\cos\alpha_2$  приближаются с ростом  $D/L$  к 1.

**Измерения и обработка результатов.** Помещаем датчик в центр соленоида, подключенного на максимальную длину 190 мм. Меняя силу тока  $I$  в соленоиде от 0.1 до 1.5 А, измеряем вольтметром напряжение  $U_\delta$  на выходе усилителя датчика Холла. Результаты записываем в таблицу и наносим на график  $U_\delta(I)$  на миллиметровой бумаге. Параметры этой прямой лучше всего найти методом наименьших квадратов, но это можно сделать и графически, проведя на диаграмме прямую линию максимально близко к экспериментальным точкам. Тангенс наклона данной прямой является коэффициентом пропорциональности между  $U_\delta$  и силой тока  $I$ :

$$U_\delta = k_{UI} I. \quad (2)$$

Теперь можно найти и коэффициент пропорциональности между индукцией поля  $B$  и  $U_\delta$ . Из формулы (1) по приведенным выше параметрам соленоида рассчитываем теоретический коэффициент пропорциональности между индукцией магнитного поля в центре соленоида и током

$$B = k_{BI} I, \quad k_{BI} = \mu_0 n \cos\alpha, \quad (3)$$

где  $\cos\alpha = \frac{\sqrt{L^2 + D^2}}{L}$  (см. рис.1). Из (3) и (2) и находим искомый коэффициент

пересчета напряжения  $U_\delta$  с датчика Холла в величину магнитной индукции:

$$k = B/U_\delta = k_{BI}/k_{UI} .$$

Величина этого коэффициента и является окончательным результатом данного упражнения.

Образец оформления

Таблица 1 Калибровка датчика Холла в соленоиде с длиной  $L = 190$  мм.

Сила тока, $A$				
Напряжение датчика Холла, $B$				

Экспериментальный коэффициент пропорциональности  $k_{UI} = U_\delta/I = \dots$

Теоретический коэффициент соленоида  $k_{BI} = B/I = \dots$

Калибровочный коэффициент датчика Холла  $k = B/U_\delta = \dots$

**Упражнение 2. Изучение магнитного поля соленоида**

В упражнении измеряется распределение магнитного поля на оси соленоидов с разным отношением диаметр/длина  $D/L$ .

Сначала измерения проводятся на соленоиде максимальной длины  $L = 190$  мм. Для этого, ничего не меняя после упражнения 1, устанавливаем ток силой  $I = 1$  А, который будет использоваться и во всех последующих упражнениях. Выдвигая датчик из середины соленоида с шагом  $1$  см, измеряем зависимость магнитной индукции от координаты  $z$  вплоть до уменьшения поля на 20% от максимального значения. При передвижении датчика отмечаем и потом наносим на график значение координаты, где датчик пересекает торец соленоида. Полученные данные записываем в таблицу и наносим на график  $B(z)$ . Величину  $B(z)$  рассчитываем, используя найденный выше коэффициент  $k$ .

Образец оформления

Таблица 2. Индукция магнитного поля по оси соленоида длиной  $L = 190$  мм

Координата по шкале, см			
Расстояние от начала соленоида, см			
Напряжение датчика Холла, В			
Индукция, мТ			

Аналогичные измерения проводим для случая короткого соленоида, для чего, не меняя положения соленоида, переключаем ток на секцию 1 с длиной  $L_1 = 60$  мм (перед переключением проводов ток от источника нужно уменьшить до нуля!). При измерениях датчик перемещаем с шагом 1 см через всю секцию 1, начиная снаружи с расстояния порядка 4 см от левого торца и кончая тем же расстоянием после правого торца. По параметрам секции 1 рассчитываем теоретическую зависимость  $B(z)$  по формуле (1), которую, подставляя значения  $\cos\alpha_1$  и  $\cos\alpha_2$ , можно преобразовать к виду:

$$B(z) = 0.5\mu_0 nI \left( \frac{L-z}{\sqrt{(L-z)^2 + (D/2)^2}} + \frac{z}{\sqrt{z^2 + (D/2)^2}} \right),$$

где координата  $z$  отсчитывается от левого торца соленоида (см. *рис.1*). Расчет достаточно сделать до середины соленоида, т.к. распределение поля симметрично относительно его центра.

Все три зависимости надо нанести на один график, который и является результатом упражнения 2.

## Литература

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М., Высшая школа, 1983, § 10, примеры 10.2-4, § 35, 38, 40.
2. Калашников С.Г. Электричество. М., Наука.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество.