

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«Дальневосточный федеральный университет»
(ДФУ)

Школа естественных наук

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КАТУШЕК ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Учебно-методическое пособие

к лабораторной работе № 3.11К

по дисциплине «физический практикум»

Владивосток

Издательский дом Дальневосточного федерального университета

2015

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КАТУШЕК ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Цель работы

Изучение лабораторных методов получения и измерения однородных магнитных полей.

Идея эксперимента

В данной работе изучаются магнитное поле, созданное электрическим током в одной и двух катушках Гельмгольца. Для измерения магнитной индукции используется измерительный датчик на эффекте Холла.

Теоретическое введение

Методы создания магнитных полей

Получение однородного магнитного поля в определенном объеме – это задача, часто встречающаяся в постановке физического эксперимента. В зависимости от требуемой величины магнитной индукции B , размеров рабочей области, мощности установки, 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 энергии, 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 (максимально – 1.38 Тл для магнитов Nd-Fe-B). Постоянные магниты широко применяются в приборах электронной техники, где требуется неизменное поле определенной величины. В лабораторной практике, где энергозатраты не являются главным критерием, а важно удобство управления, более распространены первые два метода – магнитное поле создается с помощью катушек с током и электромагнитов. Рассмотрим особенности этих методов получения магнитного поля.

Для получения относительно слабых полей, модуль вектора магнитной индукции которых не превышает 0.1 Тл ($B \leq 0,1\text{Тл}$) чаще всего применяют катушки с током, при этом поле высокой степени однородности ($B = \text{const}$) можно получить, используя соленоид или катушки Гельмгольца. При указанных величинах магнитной индукции (B) магнитное поле может быть получено сравнительно небольшими токами, которые легко генерируются лабораторными средствами.

Поля средней величины ($0.1 \leq B \leq 1$ Тл) получить предыдущим способом труднее, поскольку требуемые при этом токи пропорционально возрастают, а рассеиваемая тепловая мощность и мощность источников питания растет как квадрат тока, что порождает ряд технических проблем. Для получения таких полей в лабораторной практике широко используются электромагниты, т.е.

катушки с током, одетые на ферромагнитный сердечник, чаще всего из железа. Относительная магнитная проницаемость железа может достигать величины нескольких тысяч (у чистого железа до 20000). Таким образом, сравнительно малым током можно вызвать большую намагниченность сердечника и получить в зазоре электромагнита магнитное поле с величиной индукции на несколько порядков большей, чем она была бы в такой же катушке без сердечника. Физическим ограничением для получения сильных полей данным методом является величина магнитной индукции насыщения магнетика, достигая которую, магнетик перестает вносить дальнейший вклад в величину магнитного поля (для железа индукция насыщения равна 2.18 Тл).

По этой причине для получения сильных магнитных полей порядка десятков тесла применение магнитных сердечников теряет смысл, поскольку такие поля намного превосходят намагниченность насыщения всех известных ферромагнетиков. 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 энергии. 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. Например, сверхпроводящие магниты Большого адронного коллайдера дают индукцию до 8.5 Тл при температуре жидкого гелия. В настоящее время сверхпроводящие магниты позволяют получить поля свыше 20 Тл.

Катушки Гельмгольца

Катушками Гельмгольца называется система из двух одинаковых тонких катушек, расположенных соосно на расстоянии, равном их радиусу. В пространстве между катушками с электрическим током получается магнитное поле высокой однородности, причем, в отличие от магнитного поля соленоида, доступ в рабочую область открыт со всех сторон. Платой за это удобство является проигрыш в величине поля при том же токе и числе витков.

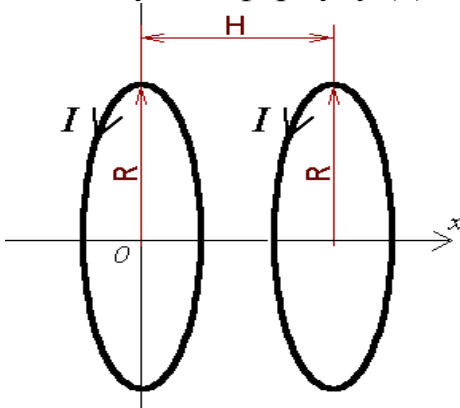
Магнитную индукцию в центре одного витка (ток идет только по одной катушке) системы можно рассчитать по формуле [1]:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (1)$$

Магнитную индукцию на оси витка в точке x (ток идет только по одной катушке) рассчитывают по формуле:

$$B(x, R) = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (2)$$

Получите формулу (1) и (2) самостоятельно



Магнитную индукцию поля, созданного двумя витками, по которым ток течет в одном направлении, рассчитывают в соответствии с принципом суперпозиции по формуле:

$$B(x, R) = B_1(x, R) + B_2(x - H, R) . \quad (3)$$

Здесь во втором слагаемом учтено, что центр второй катушки сдвинут на H относительно начала координат, выбранного в центре первой катушки (B_1 и B_2 рассчитываются соответственно по формуле 2).

Рис.1

Так как функцию (3) в окрестности точки x можно разложить в степенной ряд Тейлора, то степень неоднородности результирующего поля определится первой ненулевой производной этого ряда. Легко показать, что если $H=R$, то в окрестности точки $x=R/2$ однородность будет соблюдаться вплоть до четвертого порядка малости, что будет гораздо выше точности наших измерений. Из выше сказанного следует, что наиболее высокая степень однородности магнитного поля между катушками Гельмгольца наблюдается, если $H=R$. Подставив в формулу (3) $x=R/2$, $H=R$, получим, что поле в центре колец Гельмгольца можно рассчитать по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} I}{R} \quad (4)$$

Можно показать, что высокая однородность поля будет и в поперечном направлении. Таким образом, поле однородно в значительной части всего объема между катушками.

Формула (4) была получена для двух бесконечно тонких витков. Но реально использовать систему из двух витков нельзя, так как величина тока, необходимая для получения даже небольших полей, будет слишком велика. Учитывая, что величина поля пропорциональна полному току через сечение кольца, то есть произведению силы тока на число витков NI , то реально применяются катушки с большим числом витков и с пропорционально меньшим током. При этом размеры катушки надо делать с размером сечения обмотки, намного меньшим их среднего радиуса R_0 , и устанавливать на расстоянии $H = R_0$, отсчитываемом от центров катушек. Тогда формула (4) примет вид:

$$B = \frac{\mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} NI}{R_0} \quad (5)$$

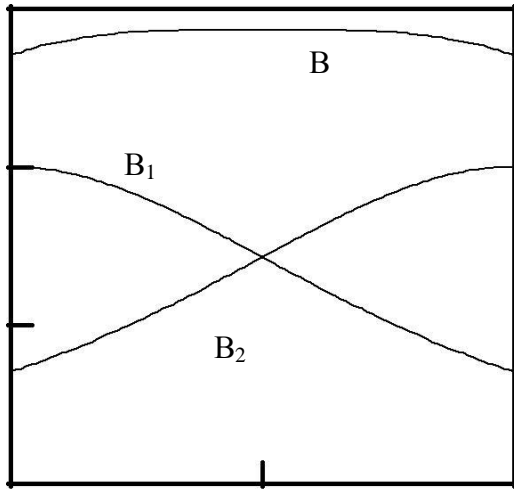


Рис. 2

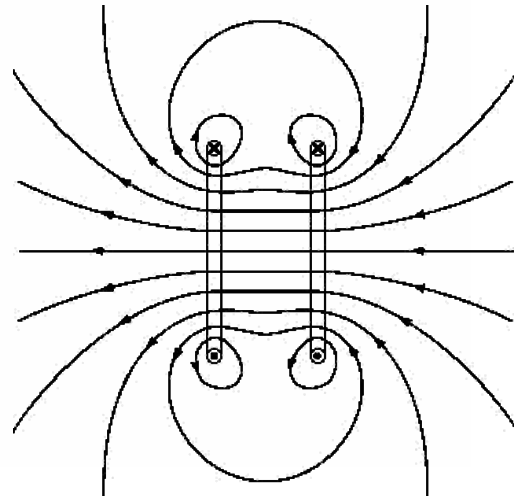


Рис.3

На рис.2 показано поле между кольцами Гельмгольца (в условных единицах). B_1 – поле, созданное левой катушкой, B_2 – поле, созданное правой катушкой, B – результирующее поле.

На рис.3 показано распределение силовых линий магнитного поля (линий магнитной индукции) между катушками Гельмгольца.

Можно показать, что высокая однородность поля будет и в поперечном направлении. Таким образом, поле однородно в значительной части всего объема между катушками.

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 электрическим током при приложении магнитного поля, перпендикулярного к направлению тока [1, 2, 3].

Рассмотрим прямоугольный проводник с положительными носителями заряда величины q , по которому течет электрический ток плотности \mathbf{j} вдоль оси Z (рис.4). При приложении поперечного магнитного поля с индукцией \mathbf{B} вдоль оси Y на движущиеся заряды сразу начинает действовать магнитная сила Лоренца $\mathbf{F}_L = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, направленная перпендикулярно вектору скорости \mathbf{v} , в нашем случае вверх, против оси X . В первый момент она вызывает поперечное смещение зарядов, благодаря чему на верхней поверхности появляется положительный поверхностный заряд, на нижней –

отрицательный. Когда электрическое поле \mathbf{E} от этих зарядов возрастет до такой величины, что электрическая сила $F_z = qE$ полностью скомпенсирует силу Лоренца, то накопление зарядов прекратится, и в толще проводника все заряды дальше будут двигаться строго по оси Z . Приравнявая эти силы, получаем $E = vB$.

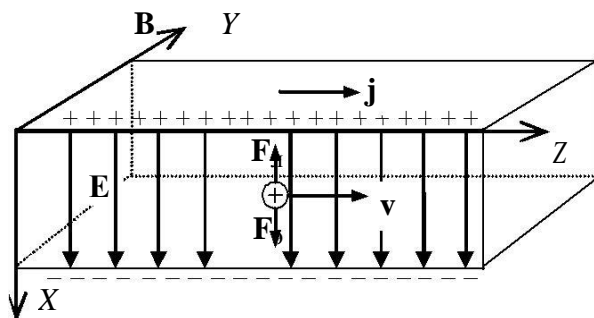


Рис.4 Проводник с током и система координат для расчета эффекта Холла

Это 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 Холла прямо пропорциональна также v – скорости движения заряженных частиц в проводнике с током. А скорость движения заряженных частиц в проводнике определяет силу тока в нем, то 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. В полупроводниках ток переносится носителями обоих знаков – электронами проводимости (знак $-$) и дырками (знак $+$), вклад которых в ЭДС Холла противоположен, так что при определенных условиях ЭДС может равняться нулю. Поэтому в датчиках Холла применяются не чистые, а легированные полупроводники с преобладанием носителей заряда одного знака. Преимуществами датчиков Холла являются их малые размеры (1 мм^2 и менее) и очень малая инерционность, что позволяет использовать их на частотах до 10^{10} Гц.

Описание лабораторной установки

Магнитное поле в данной лабораторной установке создается двумя параллельными катушками Гельмгольца, расположенными на расстоянии, равном среднему радиусу катушек (1) рис.5. От источника постоянного тока (4) на катушки можно подавать напряжение, которое вызовет постоянный ток в катушках. При этом можно подключить одну катушку к источнику тока или две катушки одновременно, в зависимости от подключения, ток может

бежать либо в одном направлении по катушкам, либо в противоположных направлениях. Разберитесь *внимательно* к каким клеммам катушек надо подключать источник тока при выполнении каждого упражнения лабораторной работы. Во время выполнения непосредственных измерений магнитной индукции поля катушек с помощью датчика Холла (2) необходимо следить, чтобы показания тока на шкале источника тока не менялись.

Для измерения магнитной индукции к датчику Холла подключен тесламетр НТ208 (3). Перед проведением измерений необходимо снять с датчика Холла навинчивающийся защитный колпачок, правильно сориентировать датчик и закрепить на штативе.

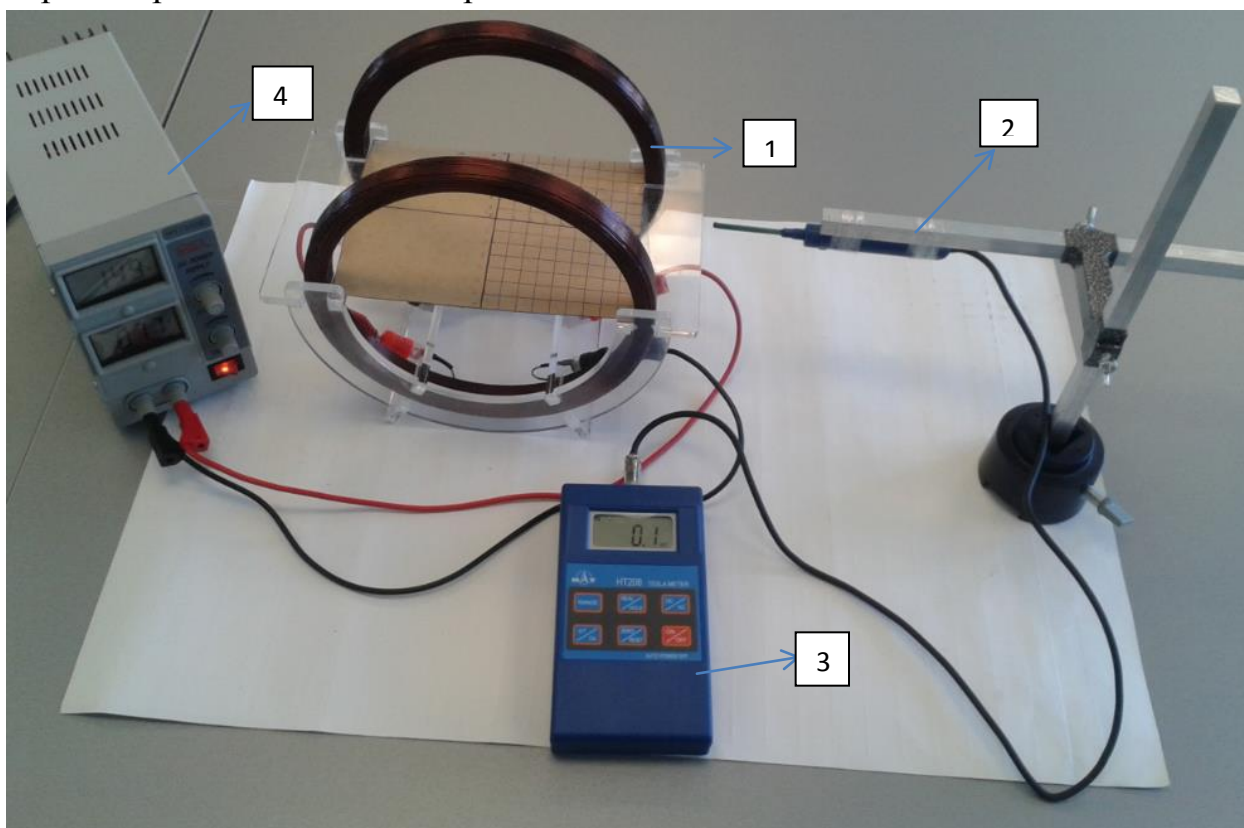


Рис. 5

Держатель датчика Холла закрепите на штативе так, чтобы пластинка датчика Холла была расположена горизонтально, силовые линии магнитного поля должны быть перпендикулярны широкой стороне этой пластинки, т.е. широкая сторона пластинки датчика должна быть расположена в вертикальной плоскости.

Непосредственно перед измерениями датчик Холла удаляют от колец Гельмгольца и устанавливают режим работы датчика, включив его кнопкой **ON/OFF**. Выждав несколько секунд, убедитесь, что:

- 1) на индикаторе **Real / Hold** не высвечивается надпись **HOLD** (это означает, что датчик будет работать в режиме непрерывного измерения);
- 2) на панели индикатора **mT / Gs** высвечивается надпись **mT** (это означает, что все измерения будут производиться в миллитеслах);
- 3) кнопкой **DC / AC** выбирают режим **DC** – режим постоянного поля, при этом на панели кнопки высвечиваются буквы **N** или **S**, определяющие направление магнитного поля;
- 4) Кнопкой **Zero / Reset** необходимо обнулить все показания тесламетра. После проведенной настройки тесламетр готов к измерениям, его помещают в область между катушками Гельмгольца и включая кнопку **Range** (измерение), приступают к непосредственным измерениям индукции магнитного поля катушек с током.

Выполнение лабораторной работы

Задание 1. Исследовать зависимость индукции магнитного поля, созданного круговым током, на его оси от расстояния до центра витка.

Численное значение вектора магнитной индукции на оси кругового тока рассчитывается по формуле (1). Если ввести новую переменную $x_1 = \frac{R^2}{(R^2+x^2)^{3/2}}$, то зависимость $B(x_1)$, будет носить линейный характер. Убедитесь в этом экспериментально.

Для этого:

- 1) соберите установку (рис. 5), подключите источник постоянного тока к одной из катушек Гельмгольца, установите $I=1,5$ А;
- 2) перемещая датчик Холла вдоль оси катушки с током, сделайте измерения B , меняя x от 0 до 16 см, смещая датчик на 1 см при каждом новом измерении; результаты измерений занесите в таблицу 1;
- 3) эксперимент повторите 2 раза при одних и тех же значениях x ;
- 4) по результатам измерений рассчитайте среднее значение B_{cp} для каждого положения x ;
- 5) постройте график зависимости $B(x_1)$.

Таблица 1.

№ п/п	x , см	$x_{1, см}^{-1}$	B_1 А/м	B_2 А/м	B_{cp} А/м
1					
...					
16					

- 2) на столик между катушками поместите квадратный лист миллиметровой бумаги со стороной 16 см, совместив его центр с центром столика, миллиметровую бумагу закрепите скрепками, систему координат на миллиметровой бумаге выберите так, чтобы точка О совпала с центром поля, ось ОХ проходила через центры катушек с током;
- 3) в каждом квадратном сантиметре миллиметровой бумаги сделайте измерения магнитной индукции с помощью датчика Холла и запишите их в таблицу 2;
- 4) проанализировав результаты измерений, выделите область, в которой с точностью до приборной ошибки измерений поле между катушками Гельмгольца можно считать однородным.

Задание 4 Рассчитайте по формуле (5) магнитное поле между катушками Гельмгольца, зная что

$$\mu_0 = 1,25663706 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \text{ магнитная постоянная,}$$

наружный диаметр кольца 206 мм,

внутренний диаметр кольца 170 мм,

количество витков катушки 170,

сила тока в катушках 1,5 А.

Результаты расчета сравните со средним значением В на оси катушек в однородной области. Которое было определено в задании 1 и в задании 2.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое магнитное поле, чем оно создается, вектор индукции магнитного поля и единицы ее измерения.
2. Закон Био и Савара для расчета магнитной индукции от протекающих линейных токов.
3. Исходя из закона Био и Савара, получить величину индукции магнитного поля на оси тонкого витка с током.
4. Исходя из закона полного тока, найти магнитную индукцию 1) вокруг бес-конечного проводника с током; 2) внутри бесконечно длинного соленоида, в центре торца полубесконечного соленоида.
5. Каковы особенности лабораторных методов получения слабых, средних и сильных магнитных полей?
6. В чем основные преимущества и недостатки методов получения однородных магнитных полей с помощью соленоида и катушек Гельмгольца?
7. Принцип устройства катушек Гельмгольца.

8. Считая, что поле внутри системы катушек Гельмгольца близко к однородному, а снаружи близко к нулю, оцените, исходя из закона полного тока, порядок величины индукции магнитного поля между катушками.
9. Какая сила действует в магнитном поле на электрический заряд? Как она направлена?
10. В чем состоит эффект Холла и как он используется для измерения магнитного поля?
11. Почему датчики Холла делают из легированных полупроводников?
12. Свойства датчиков Холла как инструмента измерения магнитных полей (точность, диапазон частот, размеры).

Литература

1. *Матвеев А.Н.* Электричество и магнетизм. – М.: Оникс 21 век, 2005. § 10, 35, 38, 40.
2. Парсел Э. Электричество и магнетизм. М.: Наука, Глава 3, § 6.5
Калашников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2003.