

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Факультет «Фундаментальные науки»
Кафедра «Физика»

Л.И. Баландина, М.Ю. Докукин

**ИССЛЕДОВАНИЕ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ КАТУШЕК
ГЕЛЬМГОЛЬЦА**

*Методические указания к лабораторной работе Э-82
по дисциплинам «Физика», «Физика и естествознание»*

Под редакцией *Б.Е. Винтайкина*

Москва
2014

Цель работы – изучить системы, позволяющие создавать в пространстве однородные магнитные поля; экспериментально исследовать распределение магнитного поля вдоль оси системы катушек Гельмгольца.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Магнитное поле в вакууме

Движущиеся заряды (проводники с токами) изменяют свойства окружающего их пространства – создают в нем магнитное поле. Это поле проявляется в том, что на движущиеся в нем заряды действуют силы. Силовую характеристику магнитного поля называют *магнитной индукцией* и обозначают как \mathbf{B} . Единица магнитной индукции в СИ – тесла [Тл].

Опыт показывает, что магнитное поле имеет направленный характер, поэтому индукция магнитного поля – векторная величина. Для магнитного поля справедлив *принцип суперпозиции*: магнитное поле, создаваемое несколькими движущимися зарядами или токами, равно векторной сумме магнитных полей, создаваемых каждым зарядом или током в отдельности, т.е.

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^N \mathbf{B}_i \quad (1)$$

Ж. Био и Ф. Савар провели в 1820 г. исследование магнитных полей токов различной формы. Они установили, что магнитная индукция во всех случаях пропорциональна силе тока, создающей магнитное поле и зависит от расстояния до той точки, в которой определялась величина вектора \mathbf{B} .

П. Лаплас проанализировал экспериментальные данные, полученные Ж. Био и Ф. Саваром, и нашел, что магнитное поле любого тока может быть вычислено как векторная сумма (суперпозиция) полей, создаваемых отдельными элементарными участками тока. Так для магнитной индукции поля, создаваемого элементом тонкого проводника с током I и длиной dl (рис. 1), он получил формулу:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I [dl, \mathbf{r}]}{4\pi r^3} \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), $d\mathbf{l}$ – вектор, совпадающий с элементарным участком тока и направленный по току, \mathbf{r} – радиус-вектор, проведенный от токового элемента в точку P , в которой определяется поле $d\mathbf{B}$.

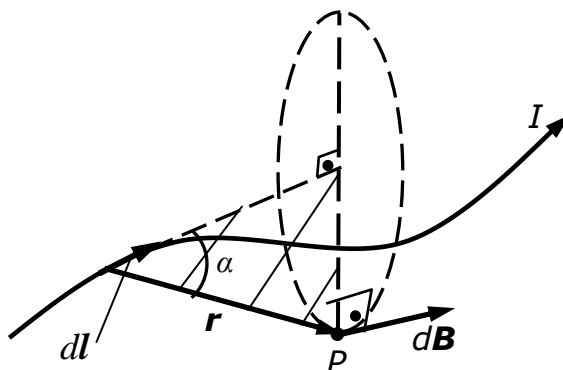


Рис. 1. Магнитная индукция от элемента проводника с током

Затем проинтегрировав формулу (2) по всем элементам, П. Лаплас пришел к выражению для результирующего поля от всего проводника:

$$\mathbf{B} = \int \frac{\mu_0 I [d\mathbf{l}, \mathbf{r}]}{4\pi r^3} \quad (3)$$

Формула (3) является одним из аналитических выражений *закона Био – Савара – Лапласа*.

Поле вектора \mathbf{B} можно представить наглядно с помощью линий магнитной индукции, которые проводятся так, чтобы касательная к этим линиям в каждой точке совпадала с направлением вектора \mathbf{B} , а густота линий соответствовала модулю этого вектора в данном месте.

Исходя из закона Био – Савара – Лапласа можно доказать, что *циркуляция вектора \mathbf{B} по произвольному замкнутому контуру Γ равна произведению магнитной постоянной μ_0 на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром, т.е.*

$$\oint \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^N I_i \quad (4)$$

Выражение (4) справедливо только для поля в вакууме. Вычисляя сумму токов, положительным нужно считать ток, направление которого связано с направлением обхода по контуру правилом правого винта. Выражение (4) называют *теоремой о циркуляции вектора \mathbf{B}* . Тот факт, что циркуляция

вектора \mathbf{B} не равна нулю, означает, что магнитное поле не потенциально. Такое поле называют *вихревым*.

Близкое к однородному магнитное поле может быть создано с помощью катушек с током – соленоидов и катушек Гельмгольца.

Соленоидом называется цилиндрическая катушка с обмоткой (провод, навитый на цилиндрический каркас). Внутри длинного соленоида, с отношением длины соленоида к его диаметру не меньше 10, магнитное поле однородно и его индукция равна

$$B = \mu_0 n I, \quad (5)$$

где n – число витков соленоида, приходящееся на единицу его длины, I – сила тока в соленоиде.

Катушками Гельмгольца называется система, состоящая из двух одинаковых тонких катушек, расположенных соосно на расстоянии, равном их радиусу. В пространстве между катушками создается почти однородное магнитное поле, и его индукцию можно рассчитать по формуле:

$$B = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{I N}{R}, \quad (6)$$

где N – число витков в каждой катушке, I – сила тока, проходящего через последовательно соединенные катушки, R – средний радиус катушки.

В лабораторной установке исследуется магнитное поле катушек Гельмгольца. Для измерения магнитной индукции используется датчик на основе эффекта Холла.

Магнитное поле катушек Гельмгольца

Получим приведенную выше формулу (6) магнитной индукции в центре катушек Гельмгольца.

Рассмотрим сначала магнитное поле, создаваемое током, протекающим по тонкому проводу, имеющему форму окружности радиуса R (круговой ток). Найдем магнитную индукцию \mathbf{B} на оси кругового тока на расстоянии z от центра контура (рис. 2). Элемент тока $d\mathbf{l}$ создает в точке A согласно закону Био – Савара – Лапласа индукцию, модуль которой равен

$$dB = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2}.$$

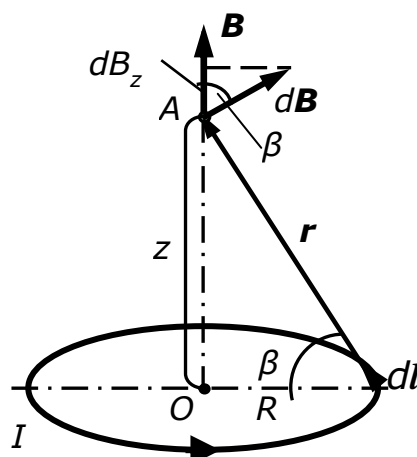


Рис. 2. Поле кругового тока

От всех элементов тока будет образовываться конус векторов $d\mathbf{B}$. Из соображений осевой симметрии можно заключить, что результирующий вектор \mathbf{B} в точке A будет направлен по оси z вверх. Это значит, что для нахождения модуля этого вектора необходимо сложить проекции векторов $d\mathbf{B}$ на ось z :

$$dB_z = dB \cos\beta = \frac{\mu_0 I dl R}{4\pi r^2 r} \quad (7)$$

Интегрируя выражение (7) по всему токовому контуру и учитывая, что $r = \sqrt{z^2 + R^2}$, получим

$$B = B_z = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (8)$$

Формула (8) определяет величину магнитной индукции на оси кругового тока.

Рассмотрим далее систему из двух кольцевых проводников одинакового радиуса R , соосно расположенных на оси z на расстоянии a друг от друга. Поместим начало координат в центре одного из колец (рис. 3). Если токи в каждом кольце одинаково направлены и равны по величине, то индукция магнитного поля в точке A на расстоянии z от первого кольца равна сумме магнитных индукций полей, создаваемых токами первого 1 и второго 2 колец. Согласно формуле (8) имеем:

$$B_{1z} = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}}; \quad B_{2z} = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{[(z-a)^2 + R^2]^{3/2}}.$$

Тогда индукция магнитного поля на оси колец в точке с координатой z равна

$$B_z = \frac{\mu_0 I R^2}{2} \left\{ \frac{1}{(z^2 + R^2)^{3/2}} + \frac{1}{[(z-a)^2 + R^2]^{3/2}} \right\}, \quad (9)$$

где I – сила тока в каждом кольце, R – радиус кольца.

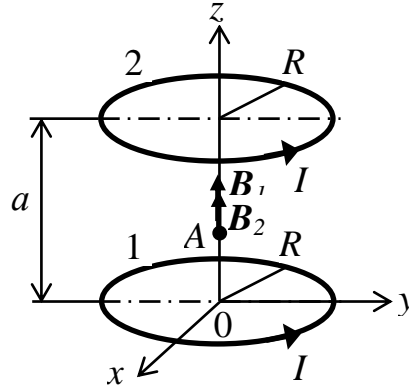


Рис. 3. Поля кольцевых проводников

Неоднородность B_z в первом приближении характеризуется первой производной

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} = \frac{3\mu_0 I R^2}{2} \left\{ \frac{-z}{(z^2 + R^2)^{5/2}} + \frac{-(z-a)}{[(z-a)^2 + R^2]^{5/2}} \right\} \quad (10)$$

При $z = \frac{a}{2}$ получаем $\frac{\partial B_z}{\partial z} = 0$. Найдем вторую производную:

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} = \frac{3\mu_0 I R^2}{2} \left\{ \frac{5z^2}{(z^2 + R^2)^{7/2}} - \frac{1}{(z^2 + R^2)^{5/2}} + \frac{5(z-a)^2}{[(z-a)^2 + R^2]^{7/2}} - \frac{1}{[(z-a)^2 + R^2]^{5/2}} \right\} \quad (11)$$

В точке с $z = \frac{a}{2}$ вторая производная $\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2}$ обращается в нуль при условии, что $a = R$.

Условия обращения в нуль выражений (10) и (11) позволяют утверждать, что для получения наилучшей однородности поля расстояние между кольцами должно равняться их радиусу. Два коаксиальных кольцевых проводника одинакового радиуса, расположенные в параллельных плоскостях, расстояние между которыми равно радиусу колец, называют *кольцами Гельмгольца*. Магнитное поле на оси колец Гельмгольца вблизи точки $z = \frac{R}{2}$ обладает высокой степенью продольной однородности. Можно также показать, что высокая однородность поля будет и в поперечном

направлении. Таким образом, поле однородно в значительной части объема пространства между кольцами Гельмгольца.

Графически результат сложения магнитных полей на оси колец Гельмгольца показан на рис. 4.

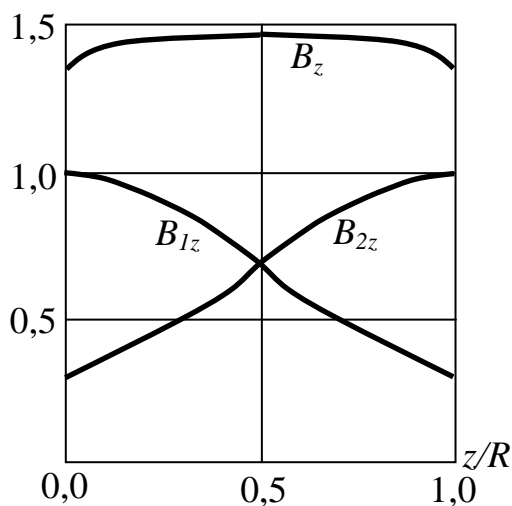


Рис. 4. Распределения магнитных полей между кольцами Гельмгольца

На рисунке представлены графики изменения B_{1z} и B_{2z} (в условных единицах) магнитных полей на оси каждого из колец Гельмгольца, а также суммарное поле B_z на оси системы колец.

На рис. 5 изображены силовые линии магнитного поля колец Гельмгольца. Показаны лишь линии, лежащие в одной из плоскостей,

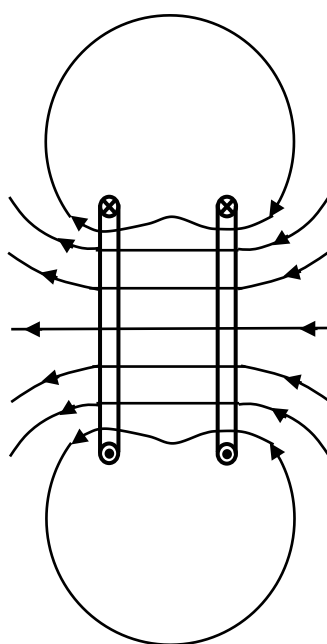


Рис. 5. Силовые линии от колец Гельмгольца

проходящей через ось системы колец. Подобная картина имеет место в любой из этих плоскостей.

Данный результат получен для двух тонких колец с током. На практике такую систему колец использовать нельзя, так как величина тока, необходимая для получения даже небольших полей будет слишком велика. Поэтому для получения однородных полей используют катушки с большим числом витков, которые называют *катушками Гельмгольца*. Катушки должны выполняться так, чтобы размеры сечения катушек были малы по сравнению с их средним радиусом. Расстояние между катушками, отсчитываемое от их центров, равно среднему радиусу катушек. Несмотря на конечный размер сечения катушек, высокая степень однородности магнитного поля сохраняется в большом объеме пространства между катушками Гельмгольца.

В лабораторной установке используют катушки Гельмгольца с фиксированным расстоянием между катушками. Пару катушек несложно разъединить и тогда можно исследовать магнитное поле одной катушки и магнитное поле двух катушек, находящихся на произвольном расстоянии друг от друга.

Если катушка имеет N витков и по ней течет ток I , то формула (9) может быть записана для двух катушек с током, соединенных последовательно и находящихся на расстоянии a друг от друга

$$B_z = \frac{\mu_0 IN R^2}{2} \left\{ \frac{1}{(z^2 + R^2)^{3/2}} + \frac{1}{[(z-a)^2 + R^2]^{3/2}} \right\}. \quad (12)$$

Из формулы (12) следует, что если $a < R$, то индукция магнитного поля на оси катушек имеет максимальное значение. Если же $a > R$, то индукция магнитного поля имеет минимальное значение. В этом можно убедиться, выполнив эксперимент.

Для катушек Гельмгольца ($a = R$) в средней точке ($z = \frac{R}{2}$) по формуле (12) получим

$$B_z = \frac{\mu_0 IN R^2}{2} \frac{2}{\left(\frac{5}{4}R^2\right)^{3/2}} = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{IN}{R} = 0,716\mu_0 \frac{IN}{R} \quad (13)$$

Неточность калибровки датчика Холла и невозможность правильной установки геометрических параметров при выполнении эксперимента приводит к отклонению реальных результатов от расчетных примерно на 0,15 мТл.

Применение эффекта Холла для определения индукции магнитного поля катушек Гельмгольца

Для экспериментального исследования магнитного поля катушек Гельмгольца в лабораторной работе применяют датчики, работающие на основе эффекта Холла. Этот эффект состоит в том, что при внесении пластинки, вдоль которой течет постоянный ток, в перпендикулярное к ней магнитное поле между гранями пластинки, параллельными направлениям тока и поля, возникает разность потенциалов, которую называют *холловской разностью потенциалов*. Величина ее определяется выражением:

$$U_H = R_H b j B, \quad (14)$$

где R_H – постоянная Холла, b – расстояние между гранями пластинки, j – плотность тока, B – индукция магнитного поля.

Эффект Холла объясняется действием силы Лоренца на движущиеся электрические заряды, создающие ток. Рассмотрим прямоугольный проводник с положительными носителями тока (рис. 6). По проводнику в направлении оси z течет постоянный ток плотности j . При включении магнитного поля индукции \mathbf{B} , направленной вдоль оси y , на движущиеся заряды действует магнитная сила Лоренца

$$\mathbf{F}_L = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}],$$

где q – заряд положительного носителя тока, \mathbf{v} – скорость упорядоченного движения носителей, \mathbf{B} – магнитная индукция.

В результате положительные заряды смещаются в направлении верхней грани проводника, т.е. противоположно оси x . Это приводит к

появлению поперечного электрического поля напряженности E_H , действующего на заряд силой $F_э = q E_H$.

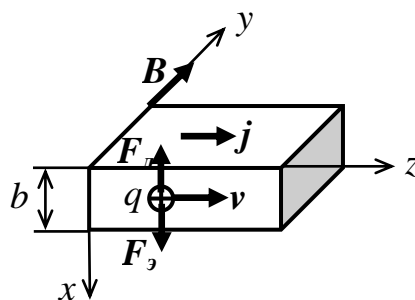


Рис. 6. Пластика с током в магнитном поле

Когда напряженность электрического поля E_H достигает такой величины, что электрическая сила полностью скомпенсирует силу магнитную, установится стационарное распределение зарядов в поперечном направлении. Тогда $F_л = -F_э$. Приравнявая величины этих сил, получим $E_H = vB$. Электрическое поле напряженности E_H вызывает появление разности потенциалов между верхней и нижней гранями проводника (ЭДС Холла) равной $U_H = bE_H$. Учитывая что плотность тока равна $j = q n v$, где n – концентрация носителей тока, получим

$$U_H = b \frac{1}{qn} j B = R_H b j B, \quad (15)$$

где $R_H = \frac{1}{qn}$ – постоянная Холла.

Из формулы (15) следует, что ЭДС Холла прямо пропорциональна индукции магнитного поля, если ток через проводник при измерениях имеет строго определенную величину. Таким образом, измерив ЭДС Холла U_H при неизменном токе и зная характеристики используемого датчика b и R_H , можно определить величину индукции магнитного поля B в данной точке пространства.

В лабораторной установке используется полупроводниковый датчик Холла в связи с тем, что у полупроводников концентрация носителей тока n на несколько порядков меньше, чем у проводников, и соответственно согласно формуле (15) U_H во столько же раз больше. В датчиках Холла

применяются не чистые, а легированные полупроводники с преобладанием носителей тока одного знака.

Преимуществами датчиков Холла являются их малые размеры (1 мм² и менее) и очень малая инерционность.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание установки

Работа выполняется на установке, разработанной и созданной фирмой RHYWE (Германия). В состав установки входит следующее оборудование и программное обеспечение (рис. 7):

- 1 – пара одинаковых катушек Гельмгольца ($D_{cp} = 400$ мм, $l/D = 1/20$, $N = 154$);
- 2 – универсальный регулируемый источник питания постоянного тока;
- 3 – датчик Холла;
- 4 – датчик перемещений;
- 5 – многофункциональный блок-преобразователь сигналов Cobra 3 с подключенными модулем «Тесла» и датчиком тока;
- 6 – персональный компьютер с Windows 7 и программным обеспечением фирмы RHYWE.

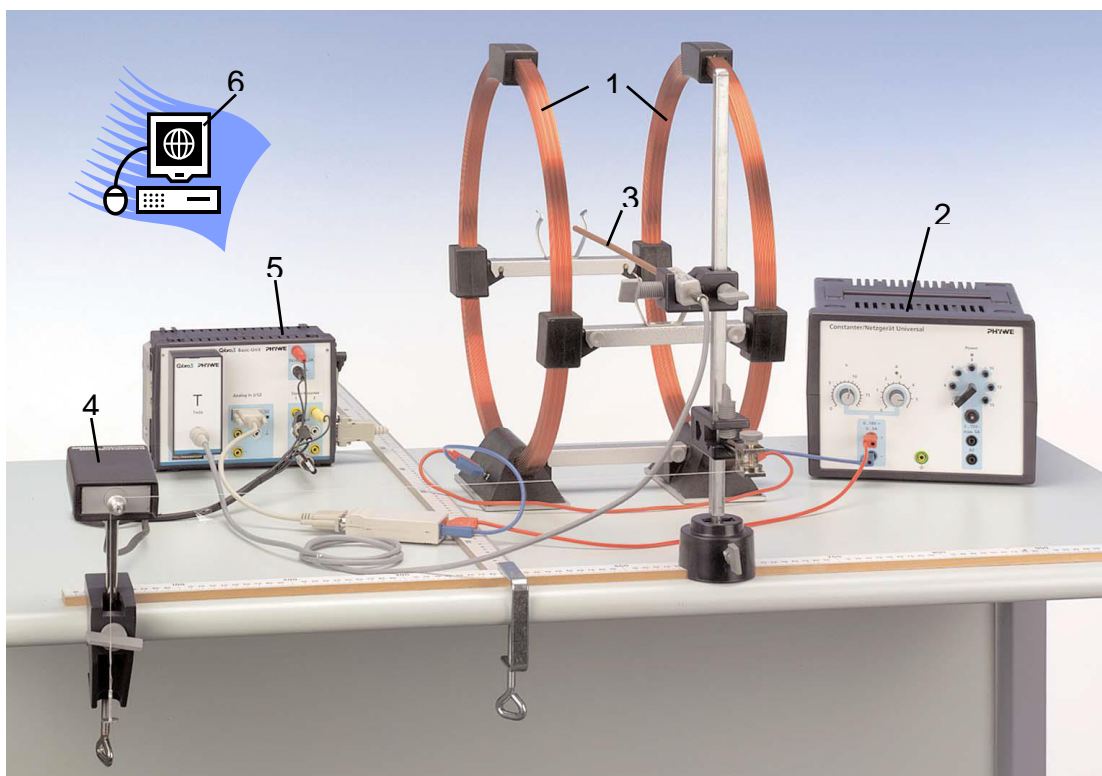


Рис. 7. Экспериментальная установка

Короткие соосные катушки расположены на расстоянии $a = R$ (радиус катушек $R = 200$ мм) друг от друга и включены последовательно, образуя магнитную систему, известную как катушки Гельмгольца. Катушки (1к и 2к) питаются от регулируемого источника ($0 - \pm 18$ В, $0 - 5$ А), работающего в режиме стабилизации по току (рис. 8). Максимальный устанавливаемый ток не должен превышать $3,5$ А! Ток измеряется специальным **датчиком тока** (Дт), сигнал с которого поступает на преобразователь Cobra 3 и далее через USB порт попадает в компьютер. Запустив программу измерения Measure и разрешив вывод тока на экран компьютера, можно оперативно контролировать устанавливаемый ток через катушки.

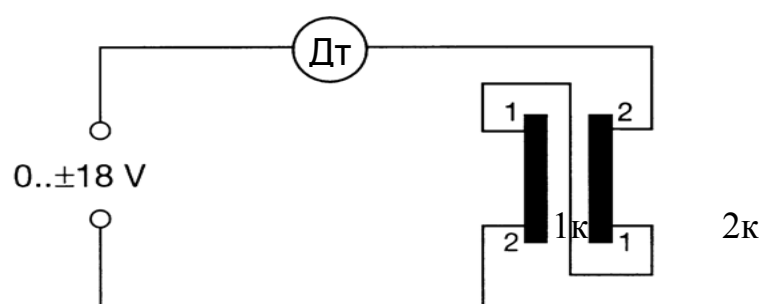



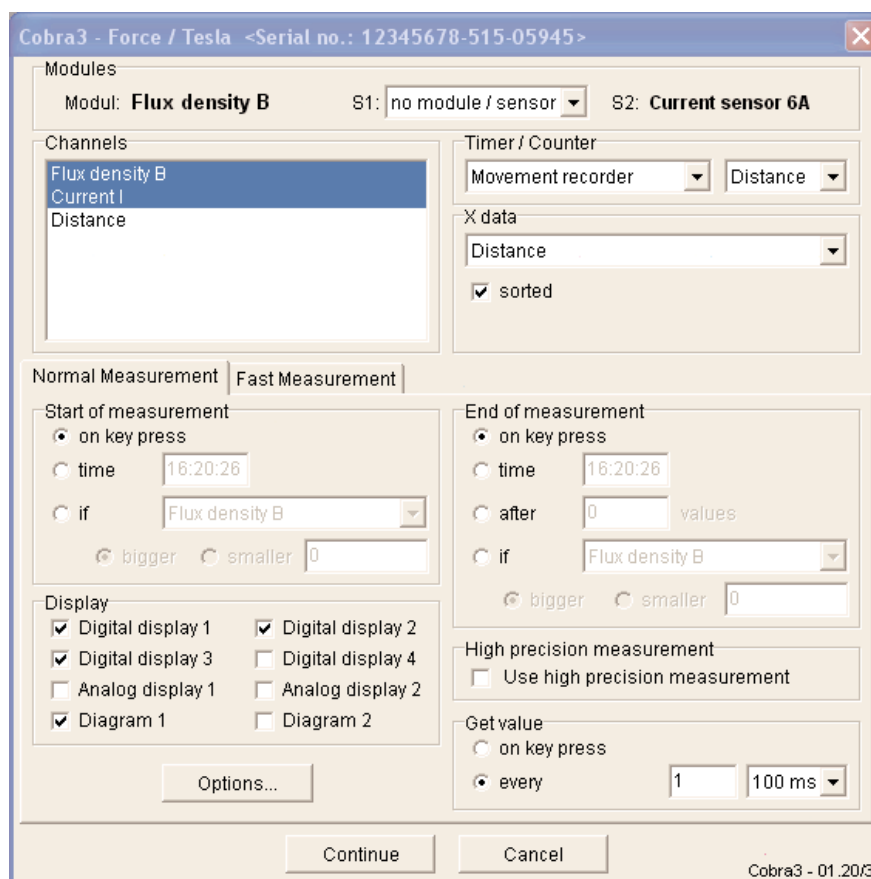
Рис. 8. Схема подключения катушек Гельмгольца

Датчик Холла смонтирован в торце диэлектрического цилиндрического стержня длиной 300 мм и диаметром 6 мм и позволяет измерять осевую компоненту магнитного поля (вдоль оси стержня). Противоположная сторона стержня заделана в жесткий пластиковый футляр, в котором размещены электровыводы с датчика, согласующие элементы и закреплен выходной кабель. Выходной кабель своим штекером подключен к гнезду модуля «Тесла». В модуле происходит первичная обработка сигналов (напряжение Холла и ток через холловский элемент), дальнейшая обработка сигналов идет в блоке Cobra 3, через USB-порт которого сигналы поступают в компьютер. Сам футляр как державка стержня с датчиком закрепляется в призматическом зажиме на вертикальной стойке подвижного рейтера. Рейтер может перемещаться вдоль масштабной линейки, закрепленной на плоскости стола.

Датчик перемещений выполнен в отдельном корпусе, посредством вертикальной стойки и специальной трубки закреплен неподвижно на столе. Внешняя механическая часть датчика представляет небольшой шкив, насаженный на горизонтальную ось вращения. Через шкив перекинута шелковая нить, горизонтальный участок которой связан с перемещающимся рейтером, а вертикальный участок оканчивается небольшим грузом-противовесом, обеспечивающим постоянное натяжение нити. В отсутствие проскальзывания нити на шкиве линейные перемещения рейтера будут пропорциональны угловым поворотам шкива. При установке датчика на столе следует обеспечить параллельность плоскости шкива и горизонтального участка нити направлению перемещения рейтера с датчиком Холла. П посредством специального кабеля датчик перемещений связан с устройством Cobra 3, с которого поступает электропитание и управляющие сигналы на датчик, а также на которое приходят через БНЦ разъемы измеряемые сигналы о перемещениях. Обработанные в блоке Cobra 3 сигналы через USB-порт поступают в компьютер.

Задание 1. Измерение зависимости осевой компоненты магнитного поля B_z от координаты z на оси одной катушки

1. Установить катушки на столе в собранном виде (лицевые панели оснований катушек развернуты в противоположные стороны, плоскости катушек параллельны друг другу, катушки – соосны, расстояние между соответствующими плоскостями катушек $a = R$ и выдерживается закрепленными распорками) с общей осью параллельной масштабной линейке. При этом следует также обеспечить соосность стержня датчика Холла, перемещаемого с рейтером, и оси катушек.
2. Собрать электрическую цепь питания одной, первой катушки. Для этого (рис. 8) закорачивающий гнезда 1 – 1 провод исключить из схемы, а на вход 1 первой катушки подать сигнал с датчика тока.
3. Включить компьютер и после загрузки системы Windows 7 запустить программу Measure. После запуска в разделе «Прибор» выбрать «Cobra3 Force / Tesla» и подать команду «Новое измерение», кликнув . В открывшемся окне установить параметры для работы с модулем Tesla и датчиком перемещений как показано на рис. 9.



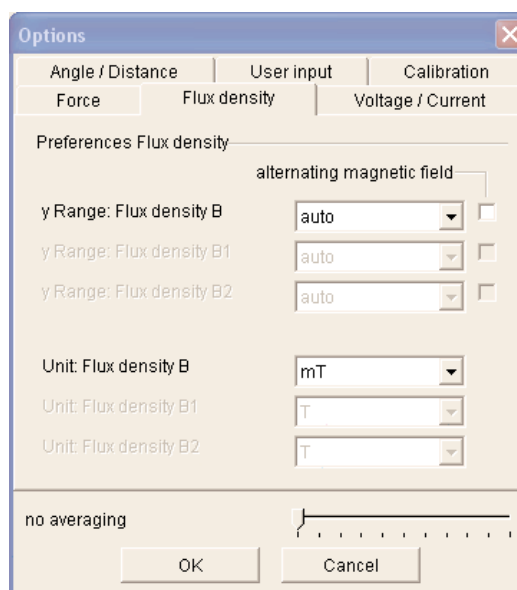


Рис. 9. Экран с установками для модуля Force / Tesla

Рис. 10. Установки Flux density

4. При первом запуске программы Measure следует провести настройки и калибровки используемых датчиков (датчик Холла, датчик перемещений, датчик тока). Соответствующие установки показаны в представленных окнах (рис. 10, 11, 12), которые появляются после нажатия кнопки «Options - Параметры» (рис. 9) и выбора соответствующего раздела (Flux density – Плотность потока, Angle/Distance – Угол/Расстояние, Voltage/Current – Напряжение/Ток).

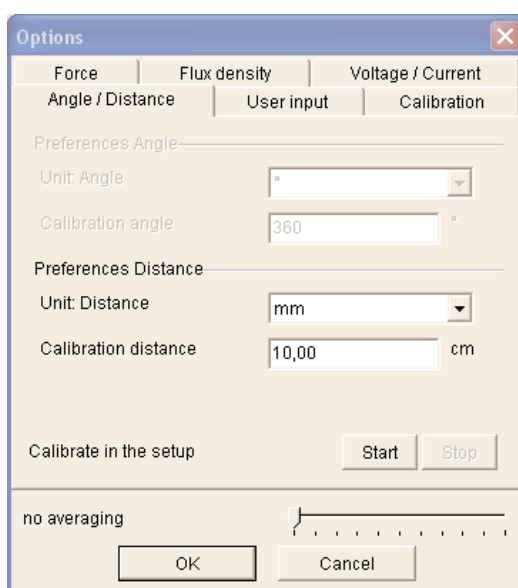


Рис. 11. Установки Distance

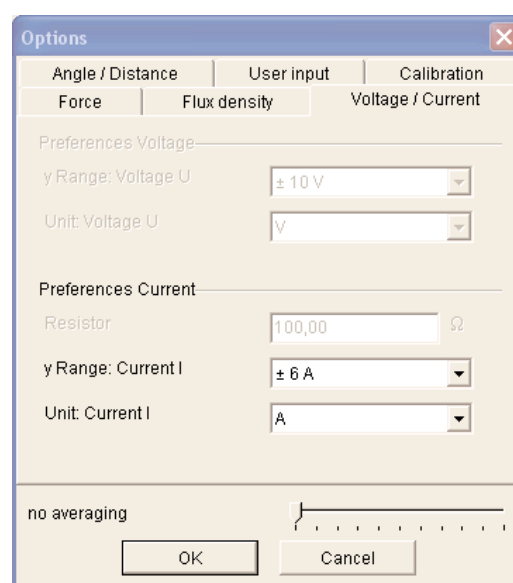


Рис. 12. Установки Current

В каждом из этих окон следует установить осреднение соответствующих измеряемых величин, поставив бегунок на 50 точек.

Калибровка датчика перемещений проводится после настройки его механической части (см. описание) в самом открывшемся окне (рис. 11). При нажатии кнопки «Start - Старт» следует переместить рейтер с датчиком Холла на 10 см (в одну или другую сторону), после чего нажать кнопку «Stop – Стоп».

Калибровка датчика Холла проводится при обесточенных катушках Гельмгольца; при этом сам датчик должен находиться в том месте пространства, где запланированы измерения. Программа калибровки осуществляется в специальном разделе Calibration - Калибровка. Сначала следует нажать «Сброс» и поставить «√» у плотности потока, после чего нажать «Калибровать». Появится резолюция «откалибровано».

5. Установите датчик Холла в точке, отвечающей положению внешней плоскости второй катушки, на оси системы катушек. Кликните кнопку «Continue - Продолжить» на экране рис. 9 для перехода в режим измерения. На экране появятся транспаранты «Ток 0 мА», «Плот. потока ± 0 мТл», «Расстояние 0 мм», кнопки «Start measurement – Начать измерение», «Stop measurement – Остановить измерение» и система координат будущего графика $B(z)$. Включите источник питания катушек и установите с помощью его ручек управления (V, A) напряжение на выходе 18 В (крайне правое положение ручки V) и ток через катушки 3,5 А по лимбу (соответствующее положение ручки A). При этом должна гореть лампочка у токовой ручки, сигнализирующая о том, что источник находится в режиме стабилизации по току. Чтобы не допустить перегрева катушек, ток не должен превышать 3,5 А! Контроль за током осуществляется по экрану компьютера.

6. Проведите измерение распределения осевой компоненты магнитного поля первой катушки B_{Iz} вдоль оси системы катушек Гельмгольца, нажав на экране кнопку «Start measurement – Начать измерение» и

одновременно начав плавное перемещение рейтера с датчиком Холла вдоль масштабной линейки. Программа Measure примет по умолчанию исходное положение датчика Холла за нуль координаты z оси системы катушек. Перемещение датчика из исходной точки следует осуществлять справа налево по направлению к первой катушке. При пересечении датчиком положения внешней плоскости первой катушки измерения следует остановить, нажав на экране кнопку «Stop measurement – Остановить измерение» и прекратив перемещения. Программа Measure перейдет к построению графика $B_{Iz}(z)$ на отдельном экране. Установить нулевое значение тока через катушку. Выключить источник питания.

7. Зарисуйте (сфотографируйте) график $B_{Iz}(z)$ для последующего переноса его в отчет по лабораторной работе.
8. Собрать электрическую цепь питания одной, второй катушки. Для этого (рис. 8) закорачивающий гнезда 1 – 1 провод исключить из схемы, провод от источника питания переключить со входа 2 первой катушки на вход 2 второй катушки, а провод от датчика тока подключить к входу 1 второй катушки.
9. Проведите подготовительные операции с датчиком Холла, источником питания и программой Measure согласно п. 5.
10. Проведите измерение распределения осевой компоненты магнитного поля B_{2z} второй катушки вдоль оси системы катушек Гельмгольца, нажав на экране кнопку «Start measurement - Начать измерение» и одновременно начав плавное перемещение рейтера с датчиком Холла вдоль масштабной линейки. Программа Measure примет по умолчанию исходное положение датчика Холла за нуль координаты z оси системы катушек. Перемещение датчика из исходной точки следует осуществлять справа налево по направлению к первой катушке. При пересечении датчиком положения внешней плоскости первой катушки измерения следует остановить, нажав на экране кнопку «Stop

measurement – Остановить измерение» и прекратив перемещения. Программа Measure перейдет к построению графика $B_{2z}(z)$ на отдельном экране. Установить нулевое значение тока через катушку. Выключить источник питания.

11. Зарисуйте (сфотографируйте) график $B_{2z}(z)$ для последующего переноса его в отчет по лабораторной работе.

Задание 2. *Измерение зависимости осевой компоненты магнитного поля B_z от координаты z на оси системы катушек Гельмгольца*

1. Собрать электрическую цепь питания системы катушек, представленную на схеме рис. 8, используя прилагаемые монтажные провода.
2. Установите датчик Холла в точке, отвечающей положению внешней плоскости второй катушки, на оси системы катушек. Проведите подготовительные операции к измерению магнитного поля по п. 5 задания 1 с учетом питания двух последовательно включенных катушек током в 3,5 А.
3. Проведите измерение распределения осевой компоненты магнитного поля B_z вдоль оси системы катушек Гельмгольца, нажав на экране кнопку «Start measurement - Начать измерение» и одновременно начав плавное перемещение рейтера с датчиком Холла вдоль масштабной линейки. Программа Measure примет по умолчанию исходное положение датчика Холла за нуль координаты z оси системы катушек. Перемещение датчика из исходной точки следует осуществлять справа налево по направлению к первой катушке. Пройдя всю систему катушек, следует остановиться в точке, отвечающей положению внешней плоскости первой катушки, и прекратить измерения, подав команду «Stop measurement – Остановить измерение». Программа Measure перейдет к построению графика $B_z(z)$ на отдельном экране. Установить нулевое значение тока через катушки.

4. Зарисуйте (сфотографируйте) график $B_z(z)$ для последующего переноса его в отчет по лабораторной работе.

Задание 3. *Измерение зависимости осевой компоненты магнитного поля B_z от координаты z на оси системы катушек Гельмгольца при разных расстояниях между ними*

1. Провести аналогичные измерения $B_z(z)$ по пп. 2 – 3 задания 2 для других расстояний a между катушками: $a = R/2 = 100$ мм и $a = 1,2R = 240$ мм. Для этого следует убрать распорки между катушками и установить катушки на соответствующее расстояние a , выдерживая соосность катушек и параллельность их оси и направления масштабной линейки. В ходе установки катушек рекомендуется перемещать вторую катушку, оставляя первую катушку неподвижной.
2. Зарисуйте (сфотографируйте) последовательно график $B_z(z)$ при $a = R/2 = 100$ мм и график $B_z(z)$ при $a = 1,2R = 240$ мм для последующего переноса их в отчет по лабораторной работе.

Обработка результатов эксперимента

1. Для одной катушки (катушка № 1) построить в одних координатных осях график измеренной экспериментальной зависимости B_{1z} и теоретическую зависимость $B(z)$, рассчитанную по формуле (8). Причем, так как в эксперименте использовалась катушка с числом витков N , в формулу (8) вместо тока I надо подставить произведение NI (ампер-витки).
2. Для системы катушек Гельмгольца построить в одних координатных осях графики зависимостей B_{1z} и B_{2z} , полученные экспериментально. Сложить графически эти две зависимости, получив результирующую зависимость $B(z)$. Сравнить зависимость $B(z)$ с графиком, полученным в задании 2.
3. По формуле (13) рассчитать величину индукции магнитного поля в средней точке системы катушек Гельмгольца. Сравнить полученный результат с величиной магнитной индукции, которую следует

определить по графику $B(z)$ для соответствующей координаты z .
 Определить отклонение экспериментальных данных от расчетных.

4. Сравнить экспериментальные графики $B(z)$ системы катушек для разных расстояний a . Сделать заключение об области однородности магнитного поля катушек Гельмгольца.

Контрольные вопросы

1. Что называется индукцией магнитного поля и в каких единицах она измеряется?
2. Как создать однородное магнитное поле?
3. Чему равна индукция магнитного поля внутри длинного соленоида?
4. Пользуясь законом Био – Савара – Лапласа получите формулу для индукции магнитного поля на оси кругового витка с током.
5. Что называется кольцами Гельмгольца?
6. Чему равна индукция магнитного поля на оси колец Гельмгольца?
7. Как устроена система катушек Гельмгольца?
8. Чему равна индукция магнитного поля в центре катушек Гельмгольца?
9. Почему индукция магнитного поля на оси двух одинаковых соосных катушек с током имеет минимум, если расстояние между катушками больше их радиуса?
10. Какая сила действует на движущийся заряд в однородном магнитном поле?
11. В чем заключается эффект Холла?
12. Как эффект Холла используется для измерения индукции магнитного поля?

Литература

1. Мартинсон Л.К., Морозов А.Н., Смирнов Е.В. Электромагнитное поле: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.

2. Савельев И.В. Курс общей физики: Учебное пособие для вузов. В 5 кн. Кн. 2: Электричество и магнетизм. – М.: Изд-во Астрель – АСТ, 2001.
3. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Оникс 21 век, 2005.