

Лабораторный практикум по общей физике
(электричество и магнетизм)

Исследование магнитного поля катушек Гельмгольца



Краткая историческая справка

Магнитные явления, связанные с магнитным железняком (магнетитом) человечеству были известны уже 4000 лет до нашей эры, например, в Китае. А в конце второго тысячелетия до н.э. китайские мореплаватели всюду пользовались компасом в морской навигации. Сохранился компас в виде ложки на гладкой поверхности “Ложка, смотрящая на юг”, которым китайцы пользовались во времена правления династии Хань в III веке до н.э. (см. рисунок на обложке).

Магнетит был хорошо известен древним грекам. Тит Лукреций Кар в своём сочинении “О природе вещей” (лат. *De rerum natura*, I век до н.э.) писал, что камень, притягивающий железо назывался в Греции магнитом по имени провинции Магнисия в Фессалии. Впервые в Европе компас был упомянут в 1187 году англичанином Александром Неккамом в своих трудах *De utensilibus* и *De naturis rerum*. Во времена мрачного средневековья накопления новых знаний и теорий о природе магнетизма практически не происходило. Лишь монахами высказывались некоторые теологические предположения о магнитных явлениях.

Угол, на который отклоняется магнитная стрелка от направления север — юг, называют магнитным склонением. Христофор Колумб установил, что магнитное склонение зависит от географических координат, что послужило толчком к исследованию этого нового свойства магнитного поля Земли.

Первую материалистическую теорию магнетизма создал Рене Декарт. Теорию магнетизма развил Шарль Кулон, который в 1788 году перенес открытый им закон для взаимодействия электрических зарядов на взаимодействие точечных магнитных зарядов.

Наиболее важным событием в истории науки явилось открытие Гансом Христианом Эрстедом в 1820 году связи между электрическими и магнитными явлениями. (Действие тока в проводнике на магнитную стрелку компаса). Эксперимент Эрстеда послужил катализатором для последующих многочисленных опытов и открытий. Андре Мари Ампер исследовал и установил закон о действии силы на проводник с током, Майкл Фарадей открыл закон электромагнитной индукции, который был им опубликован в 1831 году. В описании закона электромагнитной индукции Фарадей впервые ввел понятие поля. В 1834 году русским академиком Эрнестом Христовичем Ленцем закон электромагнитной индукции был дополнен правилом о направлении индукционного тока и магнитного поля, создаваемого им. Наконец, эпохальным итогом развития науки об электричестве и магнетизме явилась теоретическая работа Джеймса Клерка Максвелла, опубликованная им в 1873 году,

под названием “Трактат об электричестве и магнетизме”, которую блестяще экспериментально подтвердил Генрих Герц в 1888 году, показав существование электромагнитных волн. В настоящее время теория электромагнетизма Максвелла является классической электродинамикой (в отличие от современной квантовой электродинамики Ричарда Фейнмана), которая описывает взаимодействие всех электрических и магнитных явлений в природе. Эта фундаментальная теория позволила совершить прорыв в понимании электромагнитных явлений, электромагнитных полей и волн самой разной природы – радиоволн, световых, рентгеновских и создать принципиально новые образцы техники, например, радио, радиолокацию и т.д.

Опираясь, в частности, на электродинамику Максвелла, Хендрик Антон Лоренц разработал электродинамику движущихся зарядов за двадцать лет до открытия электрона предсказав, что причиной электромагнитных явлений являются дискретно заряженные частицы с вполне определенной массой и зарядом. На основе теоретических работ Лоренца Альберт Эйнштейн создал теорию относительности, которая была опубликована в 1905 году под названием “Об электродинамике движущихся тел”.

Теоретическое введение.

Термин “физическое поле” или просто поле, означает некое пространство в котором материя ведет себя “необычным” образом. При этом поле, будучи одной из форм материи, должно быть однозначно описано физической величиной, непрерывно изменяющейся в пространстве. Поле может взаимодействовать как с другими полями, так и с веществом. Так, например, в магнитном поле некоторые вещества могут изменять форму и размеры – это эффект магнитострикции, изменять проводимость электрического тока – магниторезистивный эффект, изменять траекторию движения заряженных частиц – эффект проявления силы Лоренца и т.д.

В настоящее время наиболее изучены четыре вида полей:

- поле ядерных сил или поле сильного взаимодействия, удерживающее протоны и нейтроны в ядрах атомов,
- электромагнитное поле,
- поле слабого взаимодействия, ответственное за распад ядер атомов и взаимодействие элементарных частиц,
- гравитационное поле, ответственное за притяжение тел, обладающих массой.

Если принять действие сил в поле сильного взаимодействия за единицу, то силы действующие в электромагнитном поле будут в 10^3 раз слабее, силы поля слабого взаимодействия в 10^{14} раз слабее, а гравитационные силы в 10^{40} раз слабее.

В данной работе предстоит исследовать некоторые свойства электромагнитного поля, в частности, магнитного поля, которое является частью электромагнитного поля. Как же образуется магнитное поле? Как уже было отмечено первые наблюдения Эрстеда за поведением магнитной стрелки компаса вблизи проводника с током показали, что свойства среды вокруг проводника изменяются при протекании электрического тока по проводнику и возникает некое поле действия сил, влияющих на магниты и другие проводники с током, рис.1.

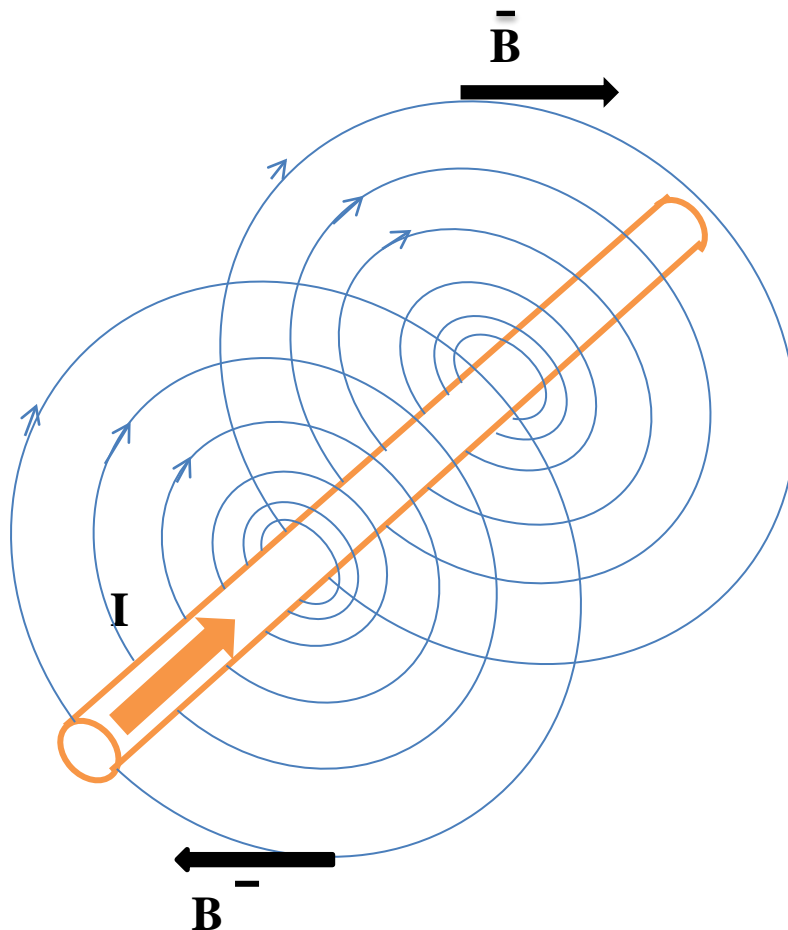


Рис. 1.

Всякое поле имеет свои источники. Более поздние исследования магнитного поля позволили установить, что источниками магнитного поля являются не только проводники с током, а также:

- движущиеся заряженные частицы,
- электрические токи или поток заряженных частиц,
- изменяющиеся во времени электрические поля.

Основной характеристикой магнитного поля является индукция магнитного поля. Это векторная величина, которая характеризует силовое воздействие поля на объекты, которыми могут быть:

- другие магнитные поля,
- вещества,
- движущиеся заряды,
- токи в проводниках.

Другим важным параметром магнитного поля является магнитный поток, который может быть представлен в графической форме в виде виртуальных замкнутых линий, рис.1. Такую интерпретацию поля предложил Майкл Фарадей, введя понятие силовых линий магнитного поля. Силовые линии магнитного поля – это линии, направление касательных к которым в каждой точке поля совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля в той же точке. С силовыми линиями отождествляются следующие свойства магнитного поля:

- в отличие от потока вектора напряженности электрического поля поток вектора магнитной индукции через произвольно замкнутый контур всегда равен нулю, т.е. сколько их входит в контур, столько и выходит. Они не могут начинаться в произвольной точке пространства и заканчиваться. Это значит, что магнитные силовые линии замкнуты. Это также значит, что магнитных зарядов, подобных электрическим, не существует, т.е. магнитное поле возникает не благодаря наличию магнитных зарядов, а благодаря движению электрических зарядов или наличию электрического тока. Неподвижные электрические заряды не создают магнитное поле и, следовательно, не взаимодействуют с внешним магнитным полем.
- число силовых линий, пронизывающих контур, обладающий единичной площадью поверхности перпендикулярной силовым линиям, численно равно величине индукции магнитного поля, т.е.

$$\Phi = B * S, \text{ где:}$$

Φ – магнитный поток [Веббер, Вб],

B – индукция магнитного поля [Тесла, Т],

S – площадь контура, которую пронизывает магнитный поток [м^2].

А какова природа возникновения магнитного поля у постоянных магнитов? В соответствии с гипотезой, которую сформулировал Лоренц, магнетизм в веществе создают замкнутые токи. Рассмотрим отдельный атом. В соответствии с классическим представлением о строении атома вокруг положительно заряженного ядра вращаются отрицательно заряженные электроны. Движение электронов по орбите можно представить как электрический ток I , текущий по замкнутому контуру площадью S , рис.2.

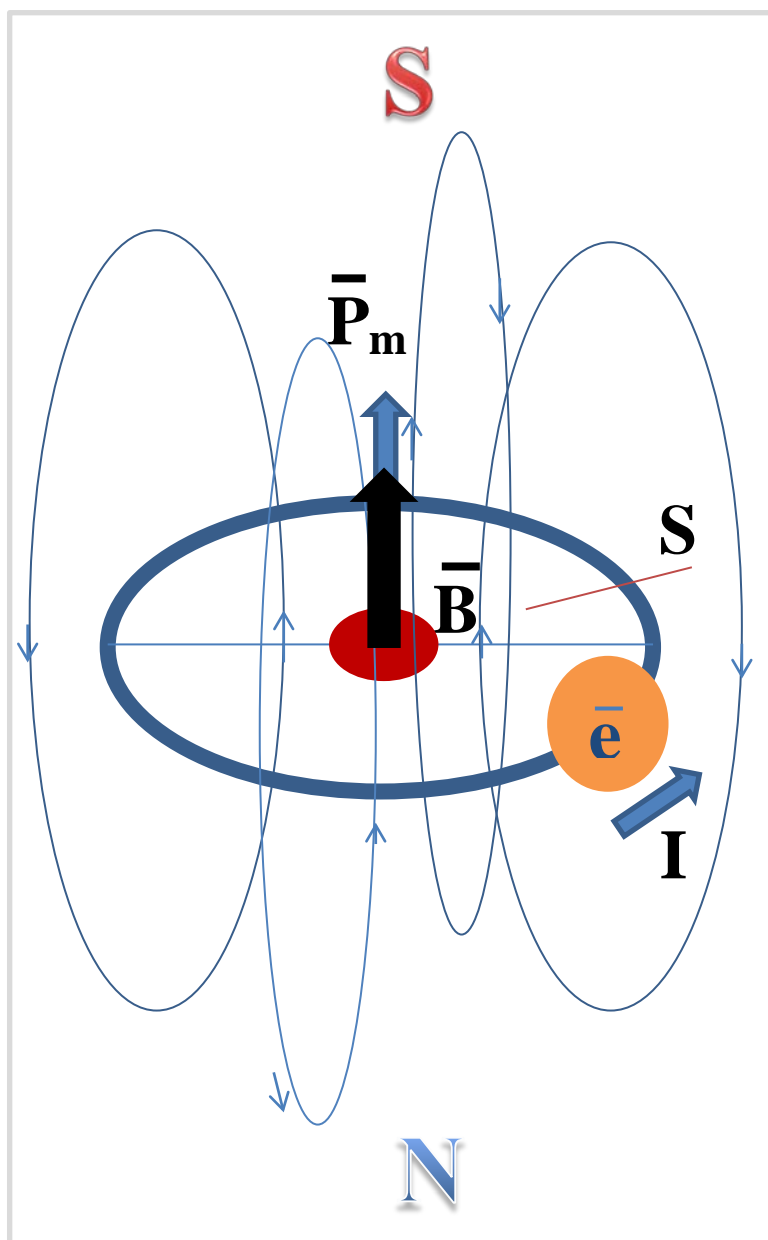


Рис.2.

Такой замкнутый контур с током характеризуется магнитным моментом P_m , равным:

$$P_m = I S, \text{ где:}$$

I – ток в контуре, т.е. вращающийся по орбите электрон, [А],

S – площадь контура, [м²].

Магнитный момент – это векторная величина. Направление вектора определяется правилом правого буравчика (правого винта). Вектор магнитного момента направлен через центр контура, перпендикулярно плоскости контура, рис.2. Правило правого буравчика гласит. Если буравчик вращать вправо, т.е. по часовой стрелке, в ту же сторону, что и направление кругового тока, то направление поступательного движения буравчика покажет направление вектора магнитного момента. Возможна также инверсная формулировка. Если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением вектора магнитного момента контура с током, при вращении буравчика вправо, то направление вращения буравчика укажет на направление тока в контуре.

Таким образом, атом, представленный в виде контура с током, с магнитным моментом P_m можно представить как маленький, а точнее, элементарный магнитик, который, как любой магнит, обладает южным и северным полюсами. Однако эти магнетики никак не проявляют себя в веществе. Дело в том, что из-за теплового, хаотического движения атомов в веществе их магнитные моменты направлены в разные стороны, поэтому общий, результирующий магнитный момент равен нулю. Но если поместить вещество во внешнее магнитное поле, то магнитные моменты атомов сориентируются вдоль магнитных силовых линий внешнего поля. В некоторых веществах, например, ферромагнетиках магнитные моменты атомов сохраняют полученную ориентацию и образец из такого вещества становится магнитом.

Как же вычислить индукцию магнитного поля в любой точке пространства в окружении витка (витков) с током. Эту задачу решили французские физики XIX века Био Жан Батист, Феликс Савар и Лаплас Пьер Симон, получившую название закона Био-Савара-Лапласа. Рассмотрим этот закон. Для этого необходимо представить бесконечно малый элемент Δl электрического тока, текущего по замкнутому контуру, который создает вокруг себя магнитное поле, рис.3. Тогда индукция магнитного поля создаваемого элементом тока согласно закону Био-Савара-Лапласа, полученного ими эмпирическим путем, в системе СИ будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta B_{zi} = [\mu_0 I / 4 \pi R^3] \Delta l r \cos \beta \quad \text{где} \quad (1)$$

μ_0 - магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м,

I - сила тока в контуре,

R - радиус контура,

Δl - длина элемента тока

r - радиус - вектор.

β - угол между плоскостью контура с током и направлением радиус - вектора в рассматриваемую точку.

Чтобы определить модуль индукции магнитного поля от всех элементов тока, составляющих контур с током, необходимо проинтегрировать уравнение, т.е. в соответствии с принципом суперпозиции полей просуммировать все значения индукции от всех элементов тока. Рассмотрим частный случай. Определим магнитную индукцию на оси контура на расстоянии Z от плоскости контура, рис. 3.

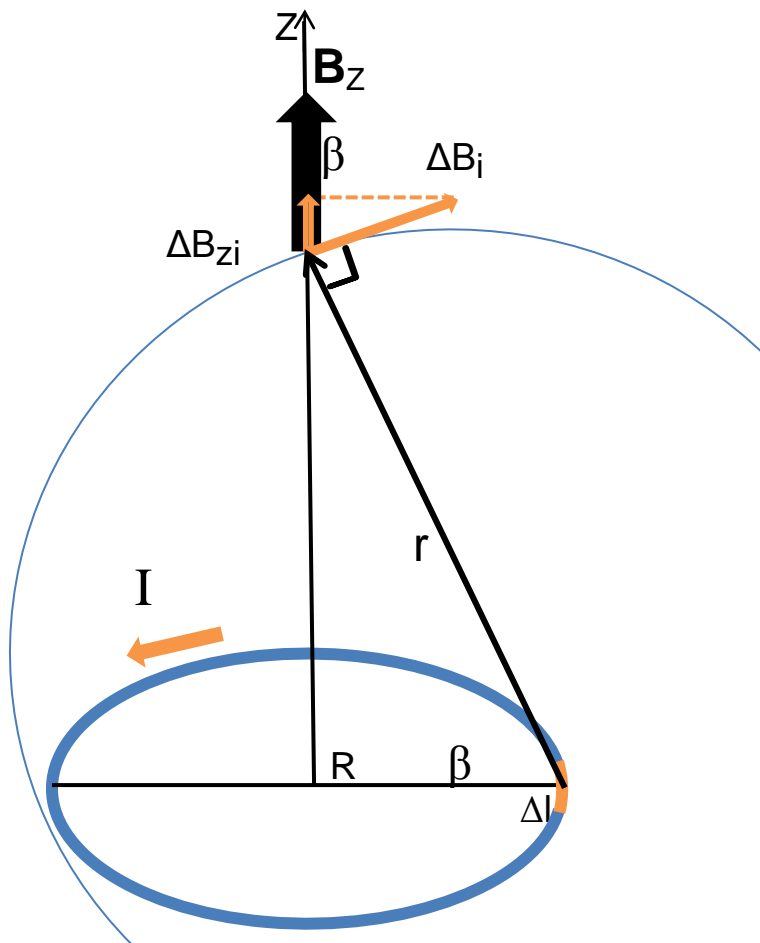


Рис. 3.

Индукция ΔB_{zi} на оси Z от всех элементов Δl равна:

$$B_z = \sum \Delta B_{zi} = \mu_0 I \cos \beta / 4\pi R^2 \sum \Delta l$$

Сделаем замену: $\cos \beta = R/r$, $r^2 = Z^2 + R^2$, $\sum \Delta l = 2\pi R$
в результате получим:

$$B_z = \mu_0 I R^2 / 2 (Z^2 + R^2)^{3/2} \quad (2)$$

Отсюда следует, что в центре витка с током, $Z = 0$

$$B_z = \mu_0 I / 2 K$$

Для $Z \gg R$

$$B_z = \mu_0 R^2 I / 2 Z^3.$$

Эти формулы справедливы также для контуров, состоящих из N компактно расположенных витков. В этом случае модуль магнитной индукции будет больше в N раз.

Рассмотрим далее систему из двух одинаковых катушек, расположенных соосно и параллельно друг другу на расстоянии равном их радиусу, рис. 4.

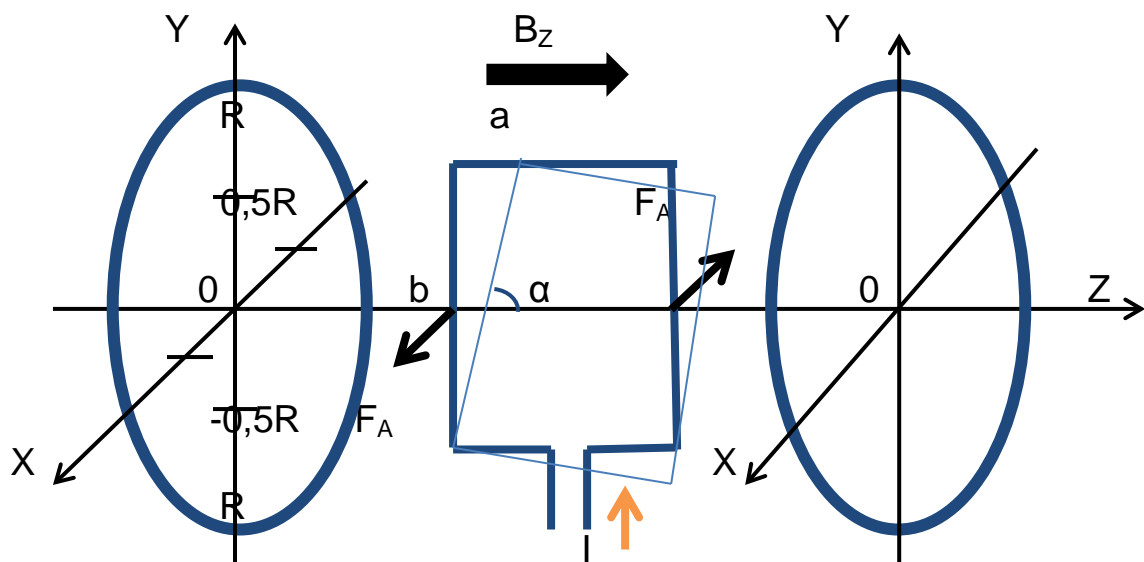


Рис. 4.

Такая система называется катушками Гельмгольца. В случае, если по катушкам протекает ток в одном направлении, то в области между катушками формируется однородное магнитное поле, т.е. поле, в котором векторы магнитной индукции направлены в одну сторону, а их модули равны. Модуль индукции между катушками рассчитывается по закону Био-Савара-Лапласа. В соответствии с принципом суперпозиции полей в любой точке между катушками суммарное поле складывается из полей двух катушек, т.е.:

$$B_z = (z, R) = B_{z1} (z, R) + B_{z2} (z - d, R)$$

Применяя формулу закона Био-Савара-Лапласа для поля на оси катушек получим формулу для определения модуля магнитной индукции на оси между катушками на расстоянии $Z = R / 2$,

$$B_z = \mu_0 I N R^2 / 2 [Z^2 + (R/2)^2]^{3/2} + \mu_0 I N R^2 / 2 [Z^2 + (R - R/2)^2]^{3/2}$$

Решая это уравнение, получим:

$$B_z = \mu_0 (4/5)^{3/2} I N / R \quad (3)$$

В данной работе применяются катушки Гельмгольца, намотанные из медной фольги, толщиной 0,2 мм и шириной 40 мм. Диаметры катушек, внешний и внутренний составляют, соответственно, 450 и 375 мм. При расчете поля катушек необходимо в расчетах применять средний диаметр катушек.

Далее рассмотрим движение заряженных частиц в магнитном поле. Выше было отмечено, что магнитное поле изменяет траекторию движения заряженных частиц под действием сил поля. Обобщив экспериментальные наблюдения Лоренц вывел формулу для силы, которую принято называть силой Лоренца:

Λ

$$f_{\text{л}} = B q V \sin \alpha = B q V \sin BV \quad \text{где}$$

B - индукция магнитного поля,

q - заряд частицы,

V - скорость движения частицы,

Однако в проводнике с током сечением S и длиной L движется не одна заряженная частица, а множество частиц, равное $n_0 SL$, где n_0 - концентрация заряженных частиц в проводнике. Тогда суммарная сила

Лоренца, приложенная ко всем частицам равна:

$$F_L = n_0 S L f_L$$

подставив f_L получим:

$$F_L = n_0 S L \cdot B q V \sin \alpha$$

здесь $n_0 S V q = I$,

т.е. заряды q содержащиеся в объеме $S L$, проходящие через сечение проводника S со скоростью V являются электрическим током I . Вектор скорости V движения частиц совпадает с направлением проводника L , тогда сила Лоренца

$$F_L = L B I \sin \alpha = F_A$$

оказывается силой, с которой заряженные частицы, движущиеся по проводнику, передают свои импульсы атомам и ионам кристаллической решетки проводника и, тем самым, перемещают проводник перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Эту силу принято называть силой Ампера. Направление сил Лоренца и Ампера определяются правилом левой руки. Для силы Лоренца правило относится к положительным зарядам. Для отрицательных зарядов направление силы Лоренца необходимо определять по правилу правой руки. Правило гласит: если ладонь руки расположить так, чтобы в ладонь “входили” силовые линии магнитного поля, а вытянутые пальцы руки при этом указывали направление движения заряда (зарядов), тогда оттопыренный большой палец покажет направление силы Лоренца. При определении направления силы Ампера необходимо учитывать то, что во всех ранее установленных правилах направление тока берется от плюса источника эдс к минусу. В действительности же электроны движутся противоположно принятому направлению тока. При принятом направлении тока от плюса к минусу сила Ампера определяется правилом левой руки. Если ладонь левой руки расположить так, чтобы в ладонь “входили” силовые линии магнитного поля, а вытянутые пальцы руки при этом указывали направление движения тока в проводнике, тогда оттопыренный большой палец покажет направление силы Ампера. Сила Ампера действует на все проводники, в которых происходит направленное перемещение свободных зарядов, т.е. имеется электрический ток. В этом случае, как видно из анализа, сила Лоренца совпадает по направлению и модулю с силой Ампера.

Перемещение зарядов может происходить также при движении непосредственно самого проводника в магнитном поле. В этом случае сила Лоренца выполняет роль эдс и вследствие этого на концах проводника возникает разность потенциалов. В этом случае силы не равны.

Перейдем к рассмотрению рамки с током находящейся в однородном магнитном поле катушек Гельмгольца. рис. 4. Эта схема широко применяется во множестве технических устройств, например, электродвигателях, генераторах тока, стрелочных измерительных приборах, а также во многих других устройствах. Рамка расположена в магнитном поле B . Причем плоскость рамки параллельна силовым линиям магнитного поля, а стороны b перпендикулярны силовым линиям. В этом случае $\sin \alpha = \sin 90^\circ = 1$, что несколько упрощает задачу. Через обмотку рамки протекает ток I . Тогда на обе стороны b рамки будут действовать силы Ампера F_A , направленные в противоположные стороны. Механический момент сил M (вращающий рамку относительно оси рамки) равен:

$$M = F_{A1} a / 2 + F_{A2} a / 2 \quad (4)$$

Силы Ампера, действующие на проводники с током b в виду ее симметричности равны:

$$F_{A1} = F_{A2} = I B b, \quad \text{тогда механический момент равен:}$$

$$M = a b I B$$

Величина $a b I$ является магнитным моментом рамки с током

$P_m = I S$, где $S = a b$ – площадь ограниченная контуром рамки, тогда

$$M = P_m B$$

или

$$B = M / P_m \quad (5)$$

Таким образом, измеряя механический момент рамки с током M при заданном магнитном моменте P_m , можно определить индукцию внешнего магнитного поля B .

В данной работе в качестве рамки с током применяется круглая измерительная катушка прямоугольного сечения, в которой число витков медного провода диаметром 0,8 мм составляет 600 витков. Внешний и внутренний диаметры обмотки равны, соответственно, 196 мм и 158 мм. Определим магнитный момент круглой катушки. Магнитный момент одного круглого витка с током определяется как:

$$P_{m1} = I \pi R^2$$

Тогда магнитный момент, создаваемый всеми витками N равен:

$$P_m = \int_a^b P_{m1} dN \quad \text{где} \quad dN = N dR / (b - a),$$

b и a , соответственно, внешний и внутренний диаметры измерительной катушки. Тогда полный магнитный момент будет равен:

$$P_m = \int_a^b I \pi R^2 N dR / (b - a)$$

Проинтегрировав, получим:

$$P_m = I \pi N (a^2 + ab + b^2) / 3. \quad (6)$$

Описание экспериментальной установки.

Фотография экспериментальной установки показана на рис. 5. Ее основными частями являются две катушки Гельмгольца - 1, установленные на станине соосно на расстоянии равном R катушки, на которые намотано по 185 витков медной фольги, толщиной 0,2 мм и шириной 40 мм. Диаметры обмотки, внешний и внутренний составляют, соответственно, 450 и 375 мм. Питание катушек постоянным током осуществляется от источника тока В26, позиция 2 и контролируется амперметром 9. Индукция магнитного поля измеряется датчиком Холла Magnetic Field Sensor MG-ВТА- 3, который выполнен в виде ручки со штангой. На конце штанги, в торце ее установлен полупроводниковый монокристалл, являющийся непосредственно датчиком Холла. Датчик посредством разъема подключен к одному из четырех аналоговых входов универсального микропроцессорного измерительного прибора LabQuest Vernier - 4



Рис.5.

который преобразует эдс Холла в величину индукции магнитного поля, измеряемую в миллитесла. На конце штанги имеется поворотная головка, которая поворачивается на угол 90^0 , что позволяет установить монокристалл датчика таким образом, чтобы силовые линии магнитного поля в процессе измерений были перпендикулярны плоскости кристалла. Измерительная катушка - 5 с наружным диаметром 196 мм и внутренним диаметром 158 мм с обмоткой из медного провода, диаметром 0,8 мм и количеством витков 600, предназначена для задания магнитного момента контура с током и вращающего механического момента, который создают силы Ампера. Для измерения силы Ампера применяются два датчика Dual-Range Force Sensor DFS-BTA - 6, подключенные к двум другим аналоговым входам измерительного блока 4. В обмотку измерительной катушки ток подается от отдельного источника тока Б5-47, позиция 7.

Задание № 1.

В эксперименте необходимо определить величину неоднородности магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца путем измерения индукции магнитного поля B_z в заданных координатах между катушками. По измеренным значениям построить графики распределения поля, а также рассчитать величину неоднородности магнитного поля на оси катушек и в областях, аксиальных оси. Сравнить полученные данные для катушек Гельмгольца с параметрами магнитных полей полученными другими методами.

Последовательность выполнения эксперимента.

Измерения магнитной индукции необходимо провести в следующей последовательности:

1. Собрать схему экспериментальной установки, показанную на рис. 6.

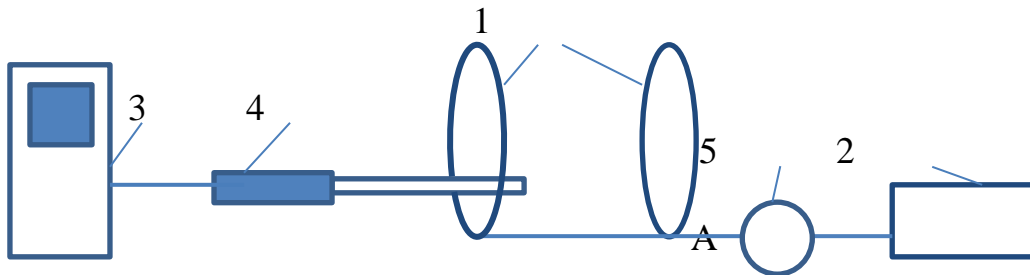


Рис.6.

2. Включить источник тока 2 и прогреть его в течении примерно двух минут. За это время включить универсальный микропроцессорный измерительный прибор LabQuest Vernier 3 (левая верхняя кнопка в ободке на панели прибора, при включении прибора ободок начинает светиться) и подключить к нему датчик Холла 4. Примерно через одну минуту, после загрузки программы, на экране прибора появится сектор с цифровой индикацией значения индукции фонового магнитного поля в единицах миллитесла (mT). Как правило, прибор показывает значение магнитного поля Земли, равное примерно 0,05 mT, если нет вблизи магнитных аномалий.
3. Установить на источнике тока силу тока примерно 4 А. Точное значение установившегося тока снять с амперметра 5.
4. Перемещая датчик Холла с шагом 4 см вдоль оси Z по координатам плоскости YOZ, указанным в таблице 1 (от 0 до 4), измерить значения индукции магнитного поля катушек. При этом необходимо следить за тем, чтобы в момент измерения поля торец штанги с датчиком Холла был параллелен плоскости катушек. В этом случае поверхность монокристалла датчика будет перпендикулярна вектору индукции магнитного поля катушек B_z , что обеспечит минимальную погрешность измерений этой компоненты.
5. Записать все измеренные значения индукции в соответствующие ячейки таблицы 1 для плоскости YOZ.

Таблица 1

$OZ \backslash OY$	0	1	2	3	4
R					
0,5R					
0					
- 0,5R					
- R					

6. По окончании измерений снизить ток катушки до нуля.
7. По полученным данным построить графики распределения магнитного поля на оси катушек и в областях аксиальных оси катушек. Должно быть построено пять графиков конфигурации поля в плоскости YOZ. Графики необходимо строить друг под другом для удобства сравнения результатов с использованием программы Logger Pro 3.
8. По результатам измерений вычислить неоднородность магнитного поля. За величину неоднородности магнитного поля принять величину среднеквадратичного отклонения магнитной индукции от среднего его значения. За среднее значение поля для всех измерений необходимо взять среднее значение величины магнитной индукции, рассчитанное по измерениям на оси катушек. Расчет необходимо провести по стандартной методике, принятой для расчета случайной среднеквадратичной погрешности при доверительной вероятности равной 95%. Необходимо выявить также области с максимальным и минимальным значением неоднородности поля и объяснить эти явления.
9. Результаты среднего значения с величиной неоднородности поля для каждой области выписать справа от соответствующего графика. Проанализировать полученные результаты и объяснить причину неоднородности поля в катушках Гельмгольца. Сравнить полученные данные с другими известными методами получения магнитных полей и их параметрами, определить преимущества и недостатки каждого метода.

Задание № 2.

Измерить модуль индукции магнитного поля с помощью контура с током.

Последовательность выполнения эксперимента.

Эксперимент необходимо провести в следующей последовательности:
1. Собрать схему, показанную на рис. 7. Между катушками Гельмгольца 1

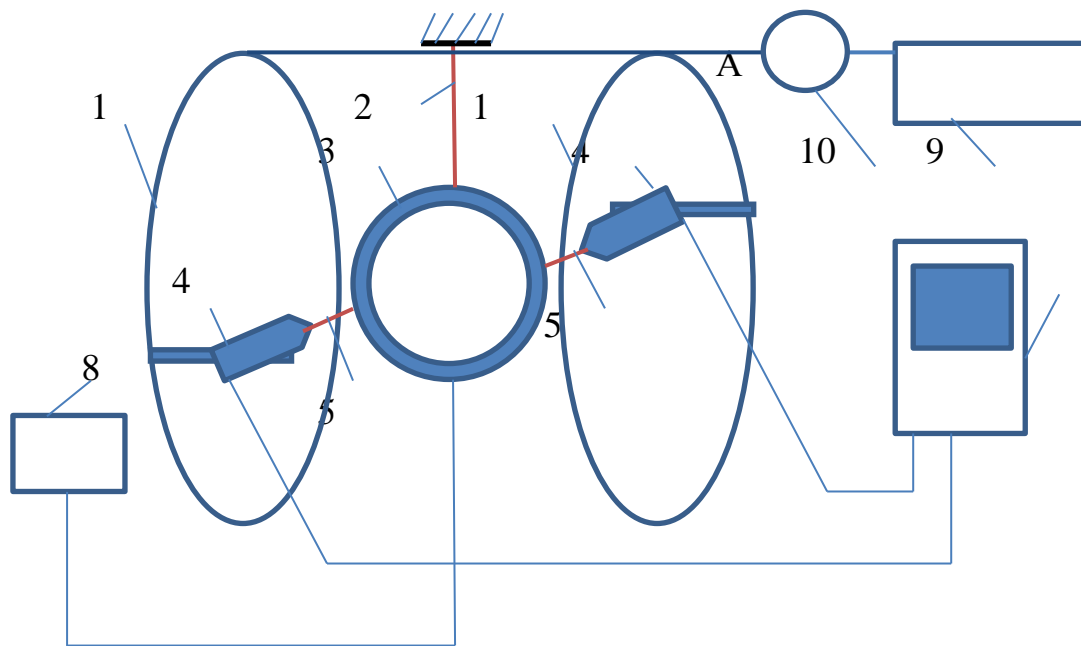


Рис. 7.

на тонкой растяжке 2 подвесить контур в виде круглой измерительной катушки 3, с намотанной на нее обмоткой из медного провода. В исходном положении плоскость измерительной катушки должна быть расположена перпендикулярно плоскостям катушек Гельмгольца. На каждую направляющую штангу, которые закреплены на катушках Гельмгольца, по одной на каждой катушке на противоположных сторонах, установить и зафиксировать датчики измерения силы Dual-Range Force Sensor DFS-BTA 4. Датчики, посредством растяжек 5 соединить с боковыми точками катушки, как это показано на рис. 7. Датчики д.б. подключены к аналоговым входам микропроцессорного измерительного блока LabQuest Vernier 6. На экране прибора кроме индикации величины магнитного поля должны появиться еще два одинаковых сектора для индикации измеряемой силы Ампера в Ньютонах. Измерительную катушку 3 подключить к источнику тока 8. Регулятор уровня тока на источнике тока измерительной катушки должен стоять на нуле.

2. Установить на источнике тока катушек Гельмгольца 9 силу тока примерно 4 А. Точное значение установившегося тока снять с амперметра

10. Включить источник тока 8 измерительной катушки 3. Затем плавно увеличивая ток в измерительной катушке до одного ампера определить направление действия сил Ампера на катушку. Для проведения измерений направление сил должно быть таким, чтобы они растягивали растяжки, соединяющие катушку с датчиками DFS-BTA, т.е. в сторону от датчиков. В случае, если силы Ампера направлены в сторону датчиков необходимо изменить направление тока в измерительной катушке.

3. Изменяя ток в рамке с шагом примерно 100 миллиампер, начиная с нуля, измерить значения сил Ампера, действующих на измерительную катушку, для каждого значения тока катушки. Результаты измерений записать в рабочую таблицу 3.

Таблица 3

I, A						
P_m, Am^2						
F_{A1}, H F_{A2}, H						
M, Нм						
I, A						
P_m, Am^2						
F_{A1}, H F_{A2}, H						
M, Нм						
Плечо момента вращения, $R = 73 \text{ мм}$ Диаметр обмотки, $D = 178 \text{ мм}$ Индукция магнитного поля, $B =$						

3. По измеренным значениям тока рассчитать магнитный момент катушки P_m по формуле (6) и вращающий момент сил Ампера M по формуле (4), приложенных к рамке. По расчетным значениям моментов построить график $M = f(P_m)$. На оси X отложить величины магнитного момента, на оси Y отложить величины механического момента. Угловой коэффициент

прямой будет соответствовать величине индукции внешнего магнитного поля B_z т.е. полю катушек Гельмгольца. Сделать расчет среднеквадратичной погрешности индукции магнитного поля. Полученное среднее значение и среднеквадратичную погрешность сравнить с измеренными значениями полей, полученными при выполнении первого задания, а также с расчетным значением поля, проведенным по формуле для катушек Гельмгольца (3). При расчете поля катушек необходимо в расчетах применять средний диаметр катушек.

Контрольные вопросы.

1. Что такое магнитное поле, чем оно создается, единицы измерения магнитного поля.
2. Какие свойства магнитного поля и вещества характеризуют следующие параметры и как они связаны между собой:
 - индукция магнитного поля,
 - напряженность магнитного поля,
 - магнитный поток,
 - магнитная постоянная,
 - магнитная проницаемость,
 - магнитный момент.
3. Исходя из закона Био - Савара-Лапласа для элемента с током вывести уравнение для индукции магнитного поля на оси тонкого витка с током.
4. Исходя из закона Био-Савара-Лапласа для тонкого витка с током вывести уравнение для расчета индукции магнитного поля на оси катушек Гельмгольца.
5. Что такое однородное и неоднородное магнитное поле. Какими параметрами они описываются.
6. Какова природа силы Ампера.
7. Что такое сила Лоренца.
8. Доказать связь между силой Ампера и силой Лоренца в проводнике с током находящемся в магнитном поле.
9. В чем состоит эффект Холла и как он применяется для измерения магнитного поля.

Литература

1. Мякишев Г.Я. Электродинамика. М. Дрофа, 2006.
2. Калашников С.Г. Электричество. М. Физматлит, 2003. §150.
3. Программа построения графиков Logger Pro 3.