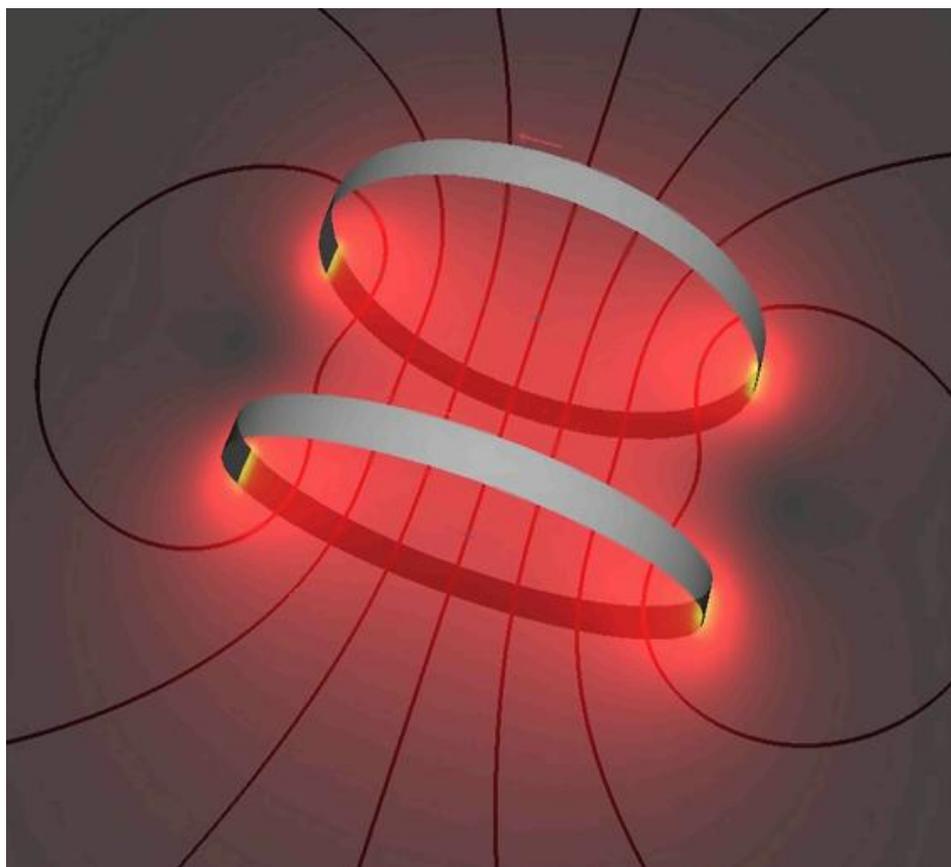


ЛИЦЕЙ № 1580 ПРИ МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Лабораторный практикум по общей физике
(электричество и магнетизм)

Исследование магнитного поля катушек Гельмгольца

Алексеев Н.И., Кравцов А.В.



Москва 2012

Технические методы получения однородных магнитных полей [1].

Задача создания однородного магнитного поля необходимой величины в определенном объеме для постановки физического эксперимента решается разными способами. Однородное магнитное поле может быть создано с помощью катушек Гельмгольца, постоянных магнитов и соленоидов в том числе и сверхпроводящих соленоидов. С помощью постоянных магнитов однородное поле создается в зазоре между их полюсами. Они не требуют энергии, но не дают возможности эффективно и просто управлять величиной магнитного поля. Величина создаваемой магнитной индукции для них определяется остаточной намагниченностью материала магнита и размером зазора между полюсами. Для разных материалов величина поля может иметь различные значения до величин порядка 1 Тесла. Помимо железа в эту группу входят никель, кобальт, ниодим, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, туллий и ряд сплавов. Постоянные магниты широко применяются в ядерно-магнитных и электронно-парамагнитных спектрометрах, где требуется стабильное однородное поле определенной величины.

В лабораторной практике, где энергозатраты не являются главным критерием, однородное поле чаще всего создается с помощью катушек и соленоидов. Для получения относительно слабых полей вплоть до 0.1 Тл чаще всего используются катушки с током. При этом поле высокой степени однородности можно получить, используя соленоид или катушки Гельмгольца. Поля средней величины порядка 0.1-1 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 и порождает ряд технических проблем. Для получения таких полей в лабораторной практике широко используются электромагниты, т.е. катушки с током на ферромагнитном сердечнике, чаще всего из железа. Здесь, также как и с постоянными магнитами, в зазоре между полюсами создается однородное магнитное поле. 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 индукцией 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). Поэтому для получения сильных полей используются катушки с током без сердечника. Проблемы мощности решаются либо применением кратковременного, импульсного режима работы, либо использованием сверхпроводящих соленоидов. Подобно постоянным магнитам, сверхпроводящие магниты после возбуждения поля теоретически не требуют энергии, работая в короткозамкнутом режиме с применением теплового ключа. Однако значительная мощность должна тратиться на охлаждение обмоток, поскольку известные в настоящее время сверхпроводящие материалы обладают сверхпроводимостью только при низких, криогенных температурах, при которых в качестве хладагента используется жидкий гелий, с температурой кипения 4,2 К. С помощью сверхпроводящих соленоидов можно создавать поля более 10 Тл. Особенностью сверхпроводящих соленоидов является формирование рабочей области внутри соленоида, где обеспечивается высокая однородность поля до 10^{-4} , т.е. относительное изменение модуля магнитной индукции в рабочем пространстве не превышает величины 10^{-4} . Например, в лабораториях Объединенного Института Ядерных Исследований (ОИЯИ) в Дубне создаются однородные магнитные поля до 26 Тесла с однородностью 10^{-4} в цилиндрическом объеме диаметром 300 мм. В настоящее время однородные магнитные поля с однородностью $10^{-6} - 10^{-7}$ создаются с помощью сверхпроводящих полых цилиндров, устанавливаемых внутри сверхпроводящего соленоида. Такой цилиндр выполняет роль одного короткозамкнутого сверхпроводящего витка. Сверхвысокая однородность поля создается благодаря геометрически точному выполнению цилиндрических поверхностей и высокой чистоты обработки этих поверхностей, до зеркального блеска.

Для сравнения ниже приведены характерные величины индукции магнитных полей в технике и наблюдаемые в природе взятые из Википедии.

Сверхпроводящие магниты Большого адронного коллайдера, охлаждаемые жидким гелием до температуры 1,9 К, позволяют создавать индукцию магнитного поля на трассе разгона частиц до 8.5 Тл.

Во внешнем космосе магнитная индукция составляет от 0.1 до 10 нТл.

Магнитное поле Земли значительно варьируется во времени и пространстве. На широте 50° магнитная индукция в среднем составляет $5 * 10^{-5}$ Тл.

Сувенирный магнит на холодильнике создает поле 5 мТл.

В солнечных пятнах 10 Тл.

Рекордное значение достигнутого постоянного магнитного поля 100,75 Тл.

Рекордное значение импульсного магнитного поля, когда либо наблюдавшегося в лаборатории $2,8 * 10^3$ Тл.

Магнитные поля в атомах от 1 до 10 КТл.

На нейтронных звездах от 1 до 100 МТл.

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 магнитоstriction, изменять проводимость электрического тока – магниторезистивный эффект, изменять траекторию движения заряженных частиц – эффект проявления силы Лоренца и т.д.

В данной работе предстоит исследовать некоторые свойства электромагнитного поля, в частности, магнитного поля, которое является частью электромагнитного поля. Как же образуется магнитное поле? 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.

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.

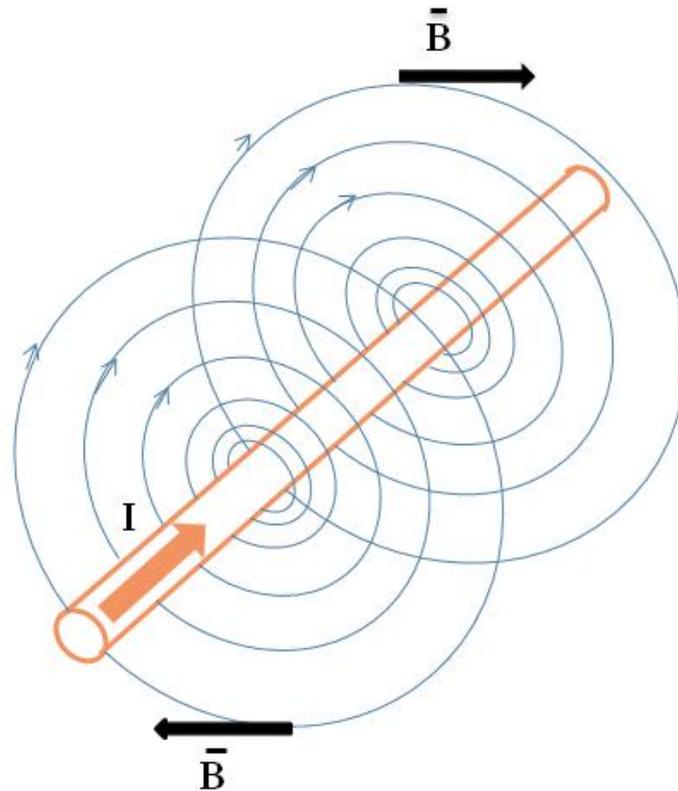


Рис. 1.

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.

Единицей измерения индукции магнитного поля является Тесла. Единица названа в честь великого сербского изобретателя Николы Тесла. (Русское обозначение - Тл, международное обозначение в системе СИ - Т). Одна Тесла - это величина численно равная индукции такого однородного магнитного поля, в котором на прямолинейный проводник длиной 1 метр, при протекании в нем тока 1 А, при перпендикулярном векторе магнитной индукции к проводнику, на проводник действует сила в 1 Ньютон.

$$[\text{Тл}] = [\text{Вб} / \text{м}^2] = [\text{В} * \text{с} / \text{м}^2]$$

Другие единицы измерения индукции магнитного поля связаны с Тесла следующим соотношением: $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гаусс}$ (единица измерения индукции магнитного поля в системе СГС).

1 Тл = 10^9 гамма (единица измерения магнитной индукции, применяемая в геофизике)

Фундаментальной характеристикой магнитного поля является напряженность магнитного поля. Напряженность характеризует величину магнитного поля. Обе величины являются векторными. Напряженность магнитного поля измеряется в А/м в системе СИ и в Эрстедах в системе СГС. При этом $1 \text{ Э} = 79,5775 \text{ А/м}$.

Индукция магнитного поля B связана следующим соотношением с напряженностью магнитного поля H .

$$B = \mu \mu_0 H \quad \text{где}$$

μ - магнитная проницаемость среды,

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

Из соотношения можно сделать заключение, что силовые свойства поля возникают благодаря магнитным свойствам среды (μ и μ_0).

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. 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.

Такие поля называются вихревыми полями. 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 [Вебер, Вб],

B – индукция магнитного поля [Тесла, Тл],

S – площадь контура, которую пронизывает магнитный поток [м²].

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, Савар Феликс и Лаплас Пьер Симон, получившую название закона Био - Савара - Лапласа. Рассмотрим этот закон. Для этого сначала необходимо представить бесконечно малый элемент проводника Δl с током, который будем называть просто элементом тока, являющегося бесконечно малой частью прямого длинного проводника с током, рис.2.

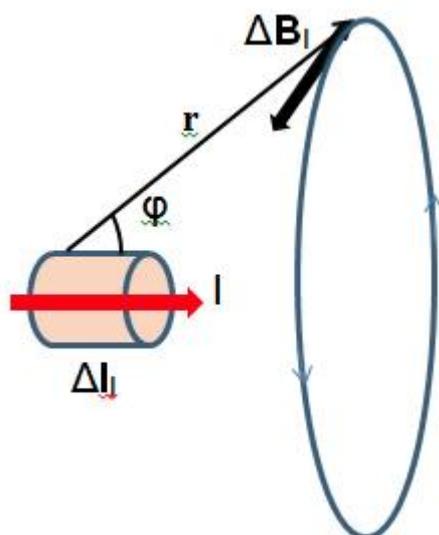


Рис.2.

Индукция магнитного поля в произвольной точке пространства, создаваемого элементом тока, согласно закону Био - Савара - Лапласа, полученного ими эмпирическим путем, (т.е. в процессе наблюдений и экспериментов) в векторной форме в системе СИ определяется следующим образом:

$$\Delta B_l = \left(\mu_0 I / 4 \pi r^3 \right) [\Delta l \mathbf{r}] \quad \text{где}$$

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

I – сила тока в контуре,

Δl – вектор элемента тока,

\mathbf{r} – радиус - вектор, направленный от элемента тока в точку наблюдения.

Результатом векторного произведения $[\Delta \mathbf{l} \mathbf{r}]$ является вектор $\Delta \mathbf{B}_i$, направленный перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы $\Delta \mathbf{l}$ и \mathbf{r} , рис. 2, а модуль вектора $\Delta \mathbf{B}_i$ определяется следующим образом:

$$\Delta B_i = (\mu_0 I / 4 \pi r^3) (\Delta l r \sin \varphi) = (\mu_0 I / 4 \pi r^2) \Delta l \sin \varphi \quad (1)$$

где:

- r - расстояние от элемента тока до точки наблюдения,
- φ - угол между плоскостью контура с током и направлением радиуса - вектора в рассматриваемую точку, рис. 2.

Далее рассмотрим контур с током, рис. 3. В контуре с током $\mathbf{r} \perp \Delta \mathbf{l}$, следовательно $\sin \varphi = 1$, рис.2. Тогда магнитная индукция от элемента тока будет равна:

$$\Delta B_i = (\mu_0 I / 4 \pi r^2) \Delta l$$

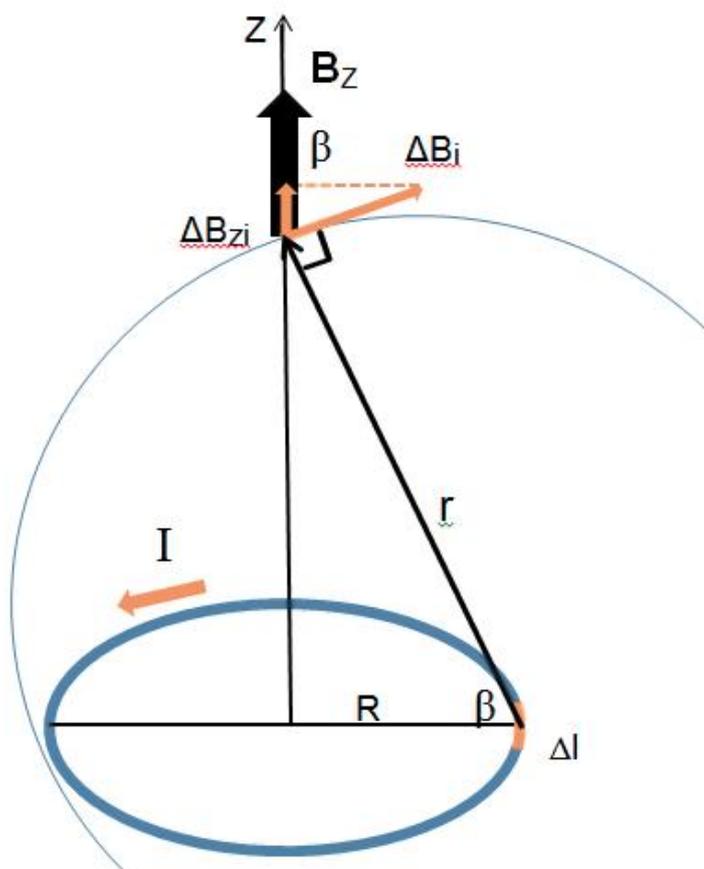


Рис. 3.

Для того, чтобы определить индукцию магнитного поля от всех элементов Δl_1 в соответствии с принципом суперпозиции полей необходимо все векторы ΔB_1 спроектировать на ось Z , рис. 3 и сложить. Проекция ΔB_1 на ось Z будет равна:

$$\Delta B_{1z} = (\mu_0 I / 4 \pi r^2) \Delta l_1 \cos \beta$$

Индукция B_z на оси Z от всех элементов Δl_1 равна:

$$B_z = \sum \Delta B_{1z} = (\mu_0 I \cos \beta / 4 \pi r^2) \sum \Delta l_1$$

Сделаем замену: $\cos \beta = R/r$, $r^2 = Z^2 + R^2$, $\sum \Delta l_1 = 2\pi R$
в результате получим формулу для индукции магнитного поля в любой точке, находящейся на оси контура с током:

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

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

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

Для $Z \gg R$

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

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 (выполнен не в масштабе). Такая магнитная 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.:

$$\mathbf{B}_z = \mathbf{B}_{z1} + \mathbf{B}_{z2}$$

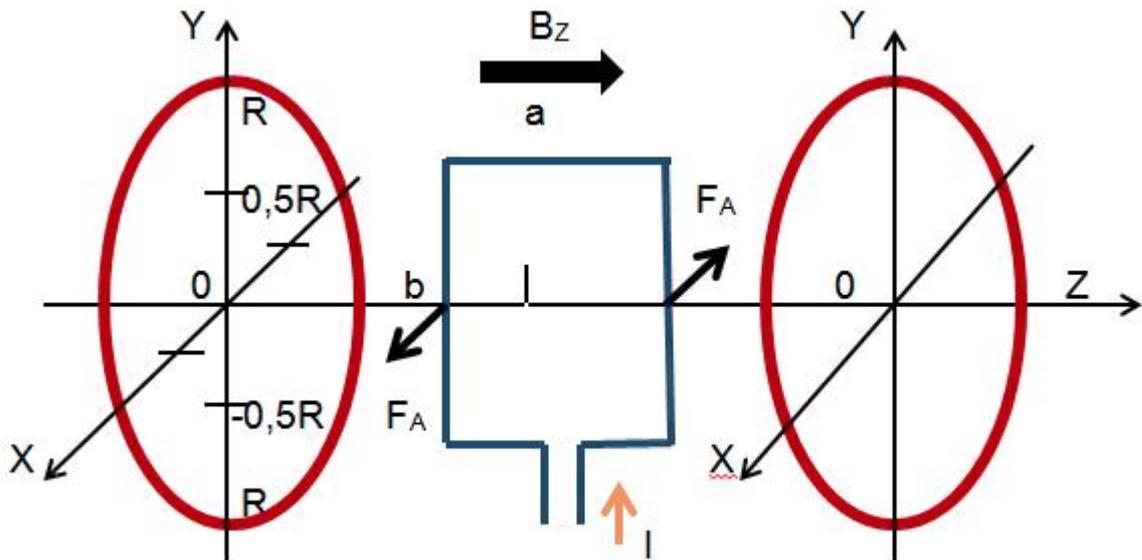


Рис. 4.

Применяя формулу закона Био - Савара - Лапласа для поля на оси катушек, получим формулу для определения модуля магнитной индукции в любой точке на оси между катушками. Определим индукцию магнитного поля, например, посередине между катушками, т.е. на расстоянии от каждой катушки $Z = R / 2$,

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

Решая это уравнение, получим:

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

Далее, рассмотрим причину возникновения силы Ампера. Выше было отмечено, что магнитное поле изменяет траекторию движения заряженных частиц под действием сил поля. Обобщив экспериментальные наблюдения, Голландский физик Хендрик Антон Лоренц вывел формулу для силы, действующей на заряженную частицу, которую принято называть силой Лоренца. Модуль силы Лоренца, действующей на заряженную частицу, определяется уравнением:

$$f_{\text{л}} = B q v \sin \alpha \quad \text{где:}$$

B - индукция магнитного поля,

q - заряд частицы,

v - скорость движения частицы,

Однако в проводнике с током сечением S и длиной L , под действием разности потенциалов, движется не одна заряженная частица, а множество частиц, nSL , где n – концентрация заряженных частиц в проводнике (число носителей тока в единице объема образца). Тогда суммарная сила Лоренца, приложенная ко всем частицам равна:

$$F_L = C S L f_L$$

подставив значение f_L получим:

$$F_L = n S L * B q v \sin \alpha$$

здесь $n S v q = I$,

т.е. заряды q плотностью n , 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, передавая свои импульсы 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 отведенный в сторону большой палец покажет направление силы Лоренца. При определении направления силы Ампера необходимо учитывать то, что традиционно направление тока берется от плюса источника ЭДС к минусу, хотя в действительности 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 отведенный в сторону

большой палец покажет направление силы Ампера. Сила Ампера действует на все проводники, в которых происходит направленное перемещение свободных зарядов, т.е. протекает электрический ток. В этом случае, как видно из анализа, суммарная сила всех зарядов - сила Лоренца является источником силы Ампера и совпадает с ней по направлению.

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.

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. Две стороны рамки b перпендикулярны силовым линиям, стороны a параллельны силовым линиям.

Λ

В этом случае $\sin B L = \sin 90^\circ = 1$, где $L = b$. Через обмотку рамки протекает ток I . Тогда на обе стороны b рамки будут действовать силы Ампера F_A . Эти силы, направленные в противоположные стороны, будут создавать механический, вращающий момент M , поворачивающий рамку

Λ

относительно её оси, рис. 4. Так как $\sin B L = 1$ вращающий момент примет максимальное значение:

$$M = F_{A1} a / 2 + F_{A2} a / 2$$

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

$$F_{A1} = F_{A2} = I B b ,$$

тогда суммарный вращающий момент будет равен:

$$M = a b I B$$

В данной работе в качестве рамки с током применяется круглая измерительная катушка с прямоугольным сечением обмотки. С некоторой погрешностью будем считать катушку плоской. В круглой катушке плечу a соответствует радиус катушки r . Тогда вращающий момент будет равен:

$$M = F_{A1} r + F_{A2} r \quad (4)$$

Вращающий момент зависит от ориентации рамки относительно вектора индукции магнитного поля. Величина, характеризующая это взаимодействие, в соответствии с теоремой Ампера [2] носит название магнитного момента контура с током P_m . Модуль его определяется по формуле:

$$P_m = I S N$$

где: I - ток в контуре, [A],

S - $S = a b$ - площадь, ограниченная контуром рамки, [м²],

N - число витков измерительной катушки.

Единица измерения магнитного момента [А м²].

Магнитный момент – векторная величина. Направление вектора магнитного момента контура с током совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля того же контура и определяется правилом правого буравчика.

Каждому значению вращающего момента соответствует свое значение магнитного момента. Однако отношение M / P_m остается постоянным. Поэтому в качестве модуля магнитной индукции B принимают отношение максимального вращающего момента к магнитному моменту контура с током:

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

В связи с этим индукция магнитного поля, равная одной Тесла [1 Тл] это индукция такого однородного поля, в котором на плоский контур с током, имеющий магнитный момент [1 А м²] действует максимальный вращающий момент, равный [1 Н м].

Таким образом, измеряя максимальный вращающий момент рамки с током M при соответствующем магнитном моменте P_m , можно определить индукцию внешнего магнитного поля B . В недалеком прошлом этот метод часто применялся для измерения магнитного поля. Определим магнитный момент круглой катушки. Магнитный момент одного круглого витка с током определяется как:

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

Где R средний радиус измерительной катушки.

Тогда магнитный момент измерительной катушки, создаваемый всеми витками N равен:

$$P_m = I \pi R^2 N \quad (6)$$

Описание экспериментальной установки.

Внешний вид экспериментальной установки показан 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, который преобразует ЭДС Холла в величину индукции магнитного поля. Величину поля прибор показывает в миллitesла. На конце штанги имеется поворотная головка, в которой расположен датчик Холла, с углом поворота 90^0 . Такая конструкция позволяет установить монокристалл датчика так, чтобы силовые линии магнитного поля в процессе измерений были перпендикулярны плоскости кристалла, т.е. торцу штанги. Измерительная катушка - 5 наружным диаметром обмотки 196 мм и внутренним диаметром 158 мм 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-ВТА - 6, подключенные к двум другим аналоговым входам измерительного блока 4. В обмотку измерительной катушки ток подается от отдельного источника тока Б5-47, позиция 7.



Рис. 5.

Задание № 1.

В эксперименте необходимо определить величину неоднородности магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца путем измерения компоненты 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 (параллельных) оси. Сравнить полученные данные для катушек Гельмгольца с величиной магнитной индукции, рассчитанной по формуле (3).

Последовательность выполнения эксперимента.

Измерения магнитной индукции необходимо провести в следующей последовательности:

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

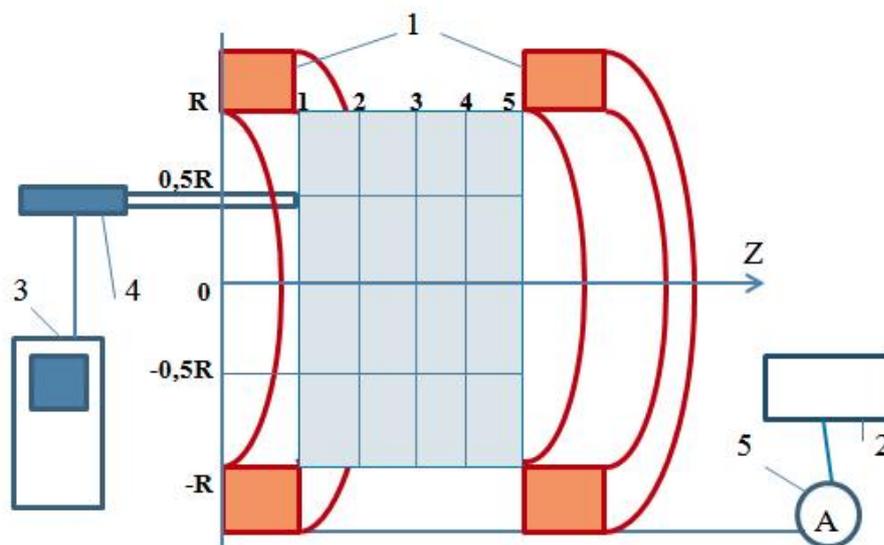


Рис. 6.

2. Включить источник тока 2 и прогреть его в течение примерно одной минуты. За это время включить универсальный микропроцессорный измерительный прибор LabQuest Vernier 3 (левая верхняя кнопка в ободке на панели прибора, при нажатии на кнопку 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).
3. Показания прибора перед измерениями необходимо обнулить. Для этого необходимо прикоснуться к сенсорному экрану прибора в области индикации измеряемого значения. При появлении в окне надписи “обнулить” нажать на кнопку “ОК”.
4. Установить на источнике тока 2, т.е. в катушках Гельмгольца, силу тока 4А.
5. Измерение индукции магнитного поля катушек Гельмгольца необходимо проводить в точках, лежащих на одной плоскости внутри катушек Гельмгольца, ограниченной внутренними диаметрами катушек, рис. 6. Начинать измерения необходимо с точки с координатой Z равной 1, лежащей на оси катушек (ось Z) и продолжить измерения, смещая датчик примерно на 4 см вдоль оси Z с координатами 2, 3, 4, 5, рис. 6. 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.

6. Затем, сместив штангу с датчиком Холла в радиальном направлении на $0,5R$ относительно оси катушек, провести измерения в точках с координатами Z равными 1, 2, 3, 4, 5, расположенными параллельно оси Z . Аналогичные измерения поля провести смещая датчик Холла на R , $-0,5R$ и $-R$. Записать все измеренные значения индукции в соответствующие ячейки таблицы 1.

7. По окончании измерений плавно снизить ток катушки до нуля.

8. По полученным данным построить графики распределения магнитного поля на оси катушек и в областях параллельных оси катушек. Должно быть построено пять графиков $B_z = f(Z)$ конфигурации поля в точках, лежащих в одной плоскости. Графики необходимо строить в одном масштабе с использованием программы Logger Pro 3 [6] и располагать их необходимо друг под другом для удобства сравнения результатов.

Таблица 1.

OZ	1	2	3	4	5
OR					
R					
$0,5R$					
0					
$-0,5R$					
$-R$					

9. 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 Z . 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 причину этих отклонений.

10. Результаты среднего значения величины неоднородности поля, для каждой исследуемой 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 катушек Гельмгольца с помощью измерительной катушки с током.

Последовательность выполнения эксперимента.

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

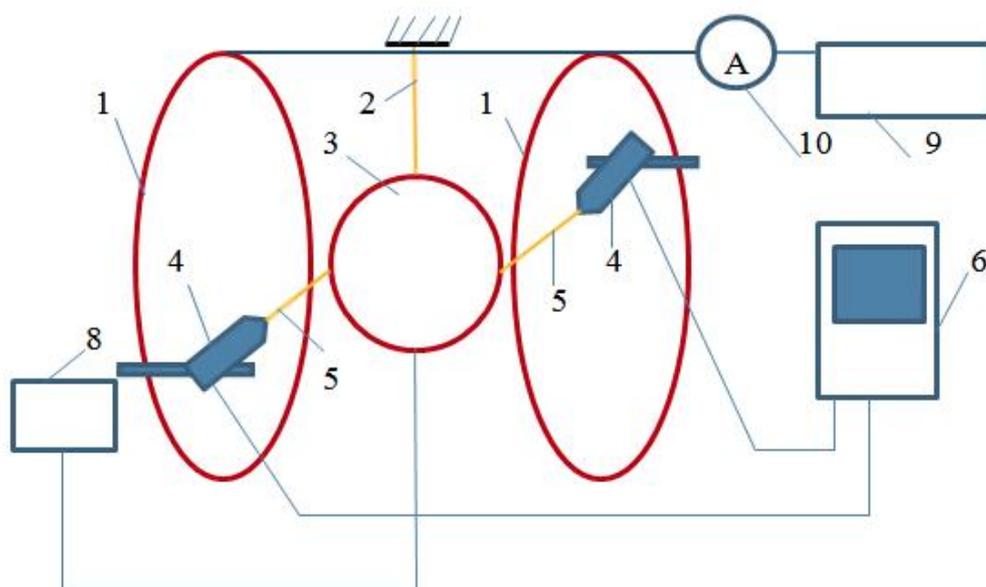


Рис. 7.

на тонкой растяжке 2 подвесить измерительную катушку 3. 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 измерительной катушкой 3 в диаметрально противоположных точках катушки, как это показано на рис. 7.

Датчики должны быть подключены к аналоговым входам микропроцессорного измерительного блока LabQuest Vernier 6. На экране прибора кроме индикации величины магнитного поля должны появиться еще два одинаковых сектора с индикацией измеряемой силы Ампера в Ньютонах. Измерительную катушку 3 подключить к источнику тока 8. При этом в исходном состоянии регулятор уровня тока на источнике тока должен стоять на нуле.

2. Подать с источника тока 9 на катушки Гельмгольца ток величиной 4 А. 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-ВТА, 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 измерительной катушке с шагом 200 миллиампер, начиная от нуля, измерить значения сил Ампера, действующих на измерительную катушку, для каждого значения тока катушки. Результаты измерений записать в таблицу 2.

3. По заданным значениям тока рассчитать магнитный момент катушки P_m по формуле (6) и вращающий момент сил Ампера M по формуле (4), при этом плечо в формуле (4) вращающего момента взять равным $r = 73$ мм. По расчетным значениям моментов построить график $M = f(P_m)$ с помощью программы Logger Pro 3 [6]. На оси X отложить величины магнитного момента, на оси Y отложить величины механического момента. Угловым коэффициент прямой будет соответствовать величине индукции внешнего магнитного поля B_z , т.е. полю катушек Гельмгольца. Полученное среднее значение индукции поля 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 этом в расчетах применять средний диаметр катушек Гельмгольца. Сопоставить расчетные и измеренные значения полей. Обосновать справедливость соотношения (5).

Таблица 2

I, A	0	0,2	0,4	0,6	0,8
P_m, Am^2					
F_{A1}, H F_{A2}, H					
$M, H m$					
I, A	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
P_m, Am^2					
F_{A1}, H F_{A2}, H					
$M, H m$					

Контрольные вопросы.

1. Что является источником магнитного поля, единицы измерения магнитного поля ?
2. Какие свойства магнитного поля 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 находящимся в магнитном поле.
9. Какую работу выполняет сила Лоренца, приложенная к движущейся заряженной частице в магнитном поле ?
10. Как взаимодействуют проводники, по которым течет ток ?
11. Мягкий провод, свитый в спираль, подвешен за один конец. Что произойдет, если по спирали пропустить ток ?
12. Чему равна энергия магнитного поля катушки индуктивности ?
13. Из двух кусков тонкого изолированного провода одинаковой длины изготовили круглые замкнутые рамки. Первая содержит один виток, вторая N витков. Рамки поместили в однородное магнитное поле плоскостями перпендикулярно вектору индукции магнитного поля B . Найти отношение моментов сил, действующих со стороны поля на рамки, если рамки замкнуты на одинаковые источники тока.

Литература.

1. Киров С.А., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э., Создание и измерение магнитного поля. Учебное пособие. М., Физфак МГУ им. М.В.Ломоносова, 2010.
2. Под ред. Прохорова А.М., Физическая энциклопедия, т.1, М., Советская энциклопедия, 1988.
3. Мякишев Г.Я. Электродинамика. М. Дрофа, 2006.
4. Калашников С.Г. Электричество. М. Физматлит, 2003. §150.
5. Трубецкова С.В. Физика – электричество и магнетизм. М. Физматлит, 2004.
6. Программа построения графиков Logger Pro 3.