

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ШБИП
_____ Д.В. Чайковский
_____ 2018 г.

КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Методические указания к выполнению лабораторной работы Э-21
по разделу «Электромагнетизм» курса «Общей физики»
для студентов всех специальностей

Томск 2018

УДК 531

Контур с током в магнитном поле. Методические указания к выполнению лабораторной работы Э-21 по разделу «Электромагнетизм» курса «Общей физики» для студентов всех специальностей.

Томск, изд. ТПУ 2018. – 12 с.

Составитель: Н.С. Кравченко, В.В. Шамшутдинова

Рецензент:

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром отделения естественных наук.

Директор ШБИП

Д.В. Чайковский

«__»_____2018г.

КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Цель работы: экспериментально исследовать зависимость механического момента сил, действующих на контур с током в магнитном поле катушек Гельмгольца, от силы тока в контуре и в катушках; определить индукцию магнитного поля катушек Гельмгольца.

Приборы и принадлежности: катушки Гельмгольца, проволочная рамка с динамометром вращения, контур, источники питания катушек и контура, мультиметры для измерения токов.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В основе магнитных явлений лежат два экспериментальных факта, установленных в 19 веке: 1) магнитное поле создается движущимися зарядами и токами; 2) магнитное поле действует на движущиеся заряды и токи.

Магнитное поле и его характеристики

Подобно тому, как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, создается электростатическое поле с определенными свойствами, так и в пространстве, которое окружает электрические токи, возникает поле, называемое *магнитным*. Магнитное поле создается токами (движущимися зарядами). Магнитное поле действует на *магниты* и *движущиеся заряды* (т.е. токи). Это явление открыл датский ученый Х.-Г. Эрстед (1777 - 1851) в 1820 г.

Если поместить свободно движущуюся магнитную стрелку под прямым проводником с постоянным током, то она будет поворачиваться (см. рис. 1) и устанавливаться перпендикулярно проводнику. Изменение направления тока в проводнике на противоположное заставит магнитную стрелку повернуться в противоположную сторону. Силовое действие магнитного поля на магнитную стрелку зависит от направления и величины тока и положения магнитной стрелки в пространстве, окружающем ток. Если проводник с током неподвижен, а сила тока в нем постоянна, то создаваемое им магнитное поле является магнитостатическим.

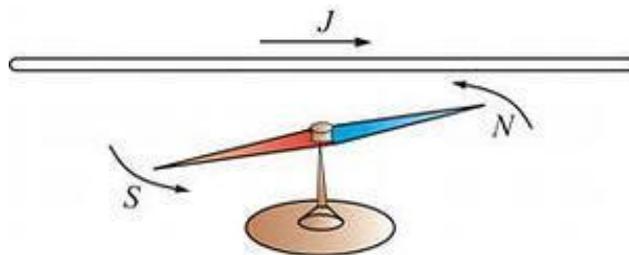


Рис. 1

Из опыта Эрстеда следует, что магнитное поле имеет направленный характер и должно характеризоваться векторной величиной. Эту величину назвали магнитной индукцией \vec{B} . Вектор \vec{B} условились направлять так, как располагается ось «юг – север» ($S \rightarrow N$) свободной магнитной стрелки, помещенной в данную точку поля. Вектор \vec{B} относится к классу *псевдовекторов*. Физический смысл вектора \vec{B} определяется по действию магнитного поля на движущиеся заряды и токи.

Для графического представления магнитного поля (как и для электростатического поля) используют *линии индукции* \vec{B} . За линию индукции принимают такую линию, касательная к которой в любой ее точке совпадает с вектором индукции \vec{B} в этой точке. Линиям индукции условились приписывать направление, совпадающее с направлением вектора индукции \vec{B} .

В случае прямого тока линии индукции представляют собой концентрические окружности (с центром на оси проводника), которые расположены в плоскостях перпендикулярных току. Направление линий индукции удобно определять по правилу буравчика: *если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения рукоятки буравчика укажет направление силовых линий индукции* \vec{B} .

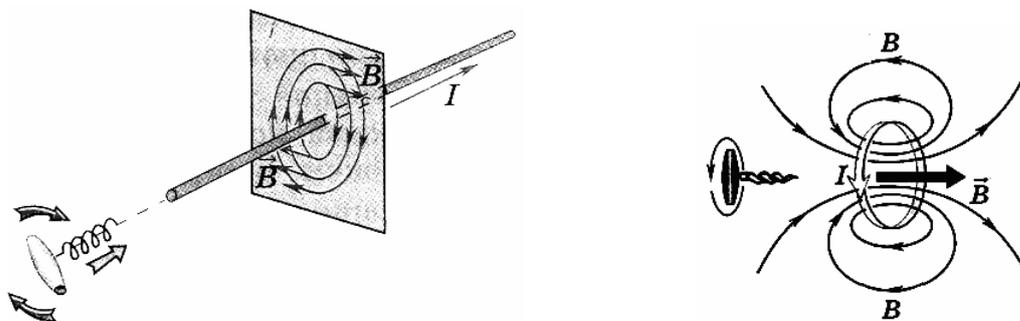


Рис. 2

Отметим, что индукцию \vec{B} магнитного поля системы проводников с токами определяют, используя принцип суперпозиции, т.е.

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i,$$

где \vec{B}_i – индукция поля, создаваемого в данной точке пространства отдельным проводником с номером i ($i=1,2,3,\dots,N$).

Магнитное поле тока. Закон Био – Савара – Лапласа

Магнитное поле, создаваемые постоянными токами различной конфигурации, изучали на опыте французские физики Ж.-Б. Био (1774-1862) и Ф. Савар (1791-1841). П. С. Лаплас (1749-1827) проанализировал экспериментальные данные, полученные Био и Саваром, и установил зависимость, которая получила название закона Био – Савара – Лапласа. Согласно этому закону магнитное поле любого тока может быть вычислено как векторная сумма (суперпозиция) полей, создаваемых отдельными элементарными участками тока. Согласно закону Био – Савара – Лапласа каждый элемент тока $I d\vec{l}$ тонкого проводника с током I и длиной dl (направление $d\vec{l}$ совпадает с направлением тока)

создает магнитное поле, индукция $d\vec{B}$ которого в точке с радиус-вектором \vec{r} относительно элемента $Id\vec{l}$ равна

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{[Id\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}.$$

Здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ – магнитная проницаемость среды.

Направление вектора $d\vec{B}$ определяется по правилу буравчика как результат векторного произведения $[Id\vec{l}, \vec{r}]$.

Модуль магнитной индукции $d\vec{B}$ элемента тока равен

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \sin \alpha,$$

где α – угол между направлением элемента тока $Id\vec{l}$ и направлением радиус-вектора \vec{r} , проведенного в точку наблюдения.

Индукция \vec{B} результирующего поля проводника с током равна векторной сумме вкладов $d\vec{B}$ отдельных элементов $d\vec{l}$ проводника.

Закон Био – Савара – Лапласа вместе с принципом суперпозиции позволяет рассчитать магнитные поля, создаваемые проводниками с током различных конфигураций в изотропной среде с магнитной проницаемостью μ .

Рассмотрим применение закона Био – Савара – Лапласа к расчету магнитного поля, созданного круговым проводником.

Пусть ток I течет по круговому проводнику радиусом R . Найдем индукции \vec{B} магнитного поля в точке A на оси контура на расстоянии h от центра O .

Разобьем проводник на малые элементы длиной dl . Согласно закону Био – Савара – Лапласа вклад в индукцию \vec{B} магнитного поля на оси витка с током от элемента $Id\vec{l}$ равен

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2},$$

т.к. по построению $\sin \alpha = 1$.

Проекция вектора $d\vec{B}$ на ось x равна

$$dB_x = dB \cos \beta = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \cos \beta,$$

причем $\cos \beta = R/r$, $r^2 = h^2 + R^2$.

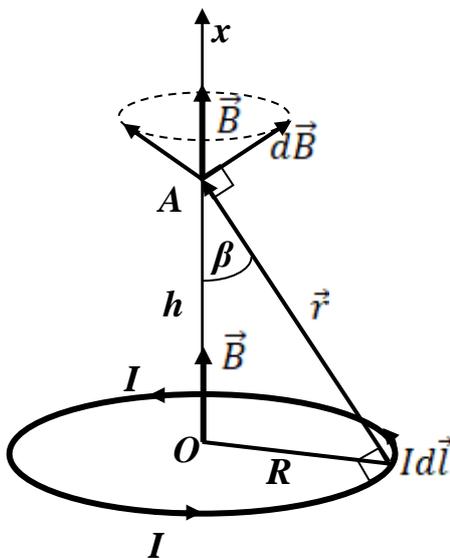
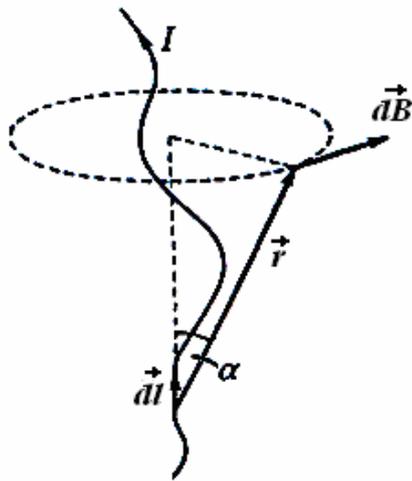


Рис. 3

Интегрирование по всем элементам dl контура дает

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(h^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (1)$$

Индукция поля в центре кругового витка равна

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R}.$$

Действие магнитного поля на элемент проводника с током

Действие магнитного поля на проводник с током исследовал экспериментально А.-М. Ампер (1775-1836). Меняя форму проводников и их расположение в магнитном поле, Ампер сумел определить силу, действующую на отдельный участок проводника с током (элемент тока). В его честь эту силу назвали силой Ампера.

Сила Ампера $d\vec{F}$, приложенная к малому элементу проводника с током I , равна геометрической сумме сил, которые действуют со стороны магнитного поля индукцией \vec{B} на движущиеся в проводнике носители тока. На движущиеся в магнитном поле заряды действует сила Лоренца. Тогда на элемент тока $I d\vec{l}$ действует сила, равная сумме сил Лоренца, действующих на все заряженные частицы в этом элементе. В результате магнитное поле действует на проводник с током.

Предположим, что в проводнике имеются носители тока одного сорта с зарядом q , их концентрация равна n_0 . Выделим мысленно элемент объема dV проводника. В выделенном элементе dV находится $dN = n_0 dV = n_0 S dl$ частиц. Тогда сила Лоренца, действующая со стороны магнитного поля на dN частиц равна $d\vec{F}_L = q dN [\langle \vec{v} \rangle, \vec{B}]$, где $\langle \vec{v} \rangle$ – средняя скорость направленного движения зарядов.

Учтем, что $q dN \langle \vec{v} \rangle = q n_0 \langle \vec{v} \rangle S dl = \vec{j} dV = I d\vec{l}$, тогда $d\vec{F}_L = [I d\vec{l}, \vec{B}] = d\vec{F}_A$ – суммарная сила Лоренца, действующая на элемент тока со стороны магнитного поля, носит название силы Ампера.

Формула

$$d\vec{F}_A = [I d\vec{l}, \vec{B}] = I [d\vec{l}, \vec{B}]$$

выражает закон Ампера: сила, действующая на элемент проводника с током в магнитном поле, равна произведению силы тока на векторное произведение элемента длины проводника и магнитной индукции поля. Направление силы Ампера $d\vec{F}_A$ может определяться по правилу левой руки: левую руку располагают так, чтобы перпендикулярная элементу тока составляющая вектора \vec{B} входила в ладонь, четыре пальца были направлены по направлению элемента тока, тогда отведенный под прямым углом большой палец покажет направление силы Ампера.

Сила Ампера является силовой характеристикой магнитного поля. Ее модуль равен $dF_A = I dl B \sin \gamma$, где γ – угол между вектором \vec{B} и элементом тока $I d\vec{l}$.

Действие магнитного поля на контур с током

На практике для измерения индукции \vec{B} удобнее использовать замкнутую плоскую рамку с током (пробный ток, циркулирующий в плоском замкнутом контуре малых размеров; элементарный контур).

Расположим плоский контур с током I радиуса R в постоянном магнитном поле с индукцией \vec{B} . Рассмотрим общий случай произвольной ориентации контура по отношению к линиям магнитной индукции. Разложим вектор \vec{B} на две составляющие, одна из

которых (\vec{B}_\perp) перпендикулярна плоскости контура, а другая (\vec{B}_\parallel) лежит в его плоскости. Рассмотрим действие каждой из составляющих вектора \vec{B} на контур.

1. На каждый элемент контура $Id\vec{l}$ действует элементарная сила Ампера $d\vec{F}_\perp = [Id\vec{l}, \vec{B}_\perp]$, стремящаяся растянуть контур (или сжать при другом направлении тока в контуре, см. рис. 4). Если поле \vec{B} однородно ($\vec{B}_\perp = const$), то результирующая сила, действующая на контур с током равна нулю. Действительно, $\vec{F}_\perp = \oint_L d\vec{F}_\perp = I \left[\left(\oint_L d\vec{l} \right), \vec{B}_\perp \right] = 0$, т. к. $\oint_L d\vec{l} = 0$ (этот интеграл представляет собой замкнутую цепочку элементарных векторов $d\vec{l}$).

Таким образом, результирующая сила \vec{F}_\perp , вызванная \vec{B}_\perp , равна нулю, т.е. однородное магнитное поле \vec{B}_\perp не может вызвать ни поступательного, ни вращательного движения контура. Оно лишь сжимает или растягивает контур.

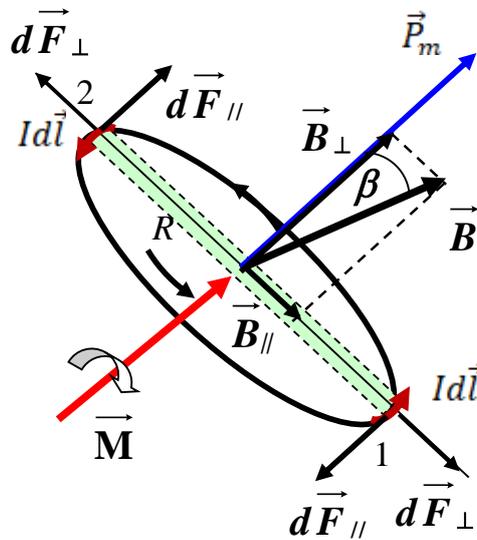


Рис. 4

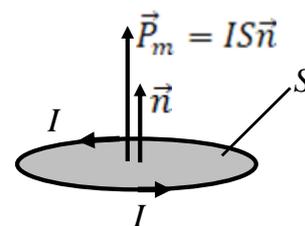
2. На каждый элемент контура $Id\vec{l}$ (например, элемент 1, см. рис. 4) действует элементарная сила Ампера $d\vec{F}_\parallel = [Id\vec{l}, \vec{B}_\parallel]$, направленная перпендикулярно площадке, ограниченной элементом контура. На элемент, расположенный симметрично (на рис. 4 элемент 2), действует противоположно направленная равная по величине сила $d\vec{F}_\parallel$. Эти силы образуют пару сил, вращающий момент которых равен произведению модуля одной силы на кратчайшее расстояние между линиями действия сил, т.е. на плечо пары $2R$: $dM = dF_\parallel 2R = IdlB_\parallel 2R = IB_\parallel dS$, где $dS = 2Rdl$ – площадь заштрихованной полоски на рисунке 4.

Суммируя моменты dM для всех полосок, приходим к интегралу по площади контура

$$M = \int_S dM = IB_\parallel S = IB S \sin \beta. \quad (2)$$

Таким образом, составляющая \vec{B}_\parallel вектора \vec{B} , параллельная плоскости контура, оказывает на него вращающее действие.

Введем в рассмотрение вектор \vec{P}_m (дипольного) магнитного момента контура с током. По определению модуль этого вектора равен произведению силы тока на площадь контура $P_m = IS$, а направление вектора \vec{P}_m совпадает с направлением вектора \vec{n} нормали к контуру, при этом вектор \vec{n} связан с направлением тока в контуре правилом правого винта.



Выражение для суммарного момента сил, действующих на контур с током в магнитном поле, можно записать в виде: $M = IBS \sin \beta = P_m B \sin \beta$ или в векторной форме $\vec{M} = [\vec{P}_m, \vec{B}]$. Здесь β – угол между векторами \vec{P}_m и \vec{B} (или между нормалью к контуру \vec{n} и вектором \vec{B}). Итак, магнитное поле \vec{B}_{\parallel} стремится повернуть контур с током так, чтобы его магнитный момент \vec{P}_m был параллелен вектору индукции \vec{B} магнитного поля.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В состав экспериментальной установки (рис. 5а) входят катушки Гельмгольца (1), крутильный динамометр (2) (рис. 5б), два блока питания (3,4) и два амперметра (5,6). Исследуемый контур (7) прикреплен к рамке (8) крутильного динамометра (2) с помощью крепления (9) (рис. 5б). С помощью проволоки (10) рамка подвешена вертикально и помещена в область между катушками Гельмгольца (1). Обмотка катушек Гельмгольца включена в цепь источника тока (3), сила тока в них контролируется амперметром (5). Исследуемый контур подключен к источнику тока (4), сила тока в нем регулируется ручкой (единственной на лицевой панели источника тока) и измеряется с помощью амперметра (6). Узел крепления (9) снабжен поворотным устройством и шкалой на его боковой поверхности, что позволяет устанавливать исследуемый контур под определенным углом к плоскости рамки. Изменение ориентации рамки (8) с исследуемым контуром (7) в ходе эксперимента определяют с помощью указателя (11) и шкалы (12), которая проградуирована в единицах момента силы (Нм).

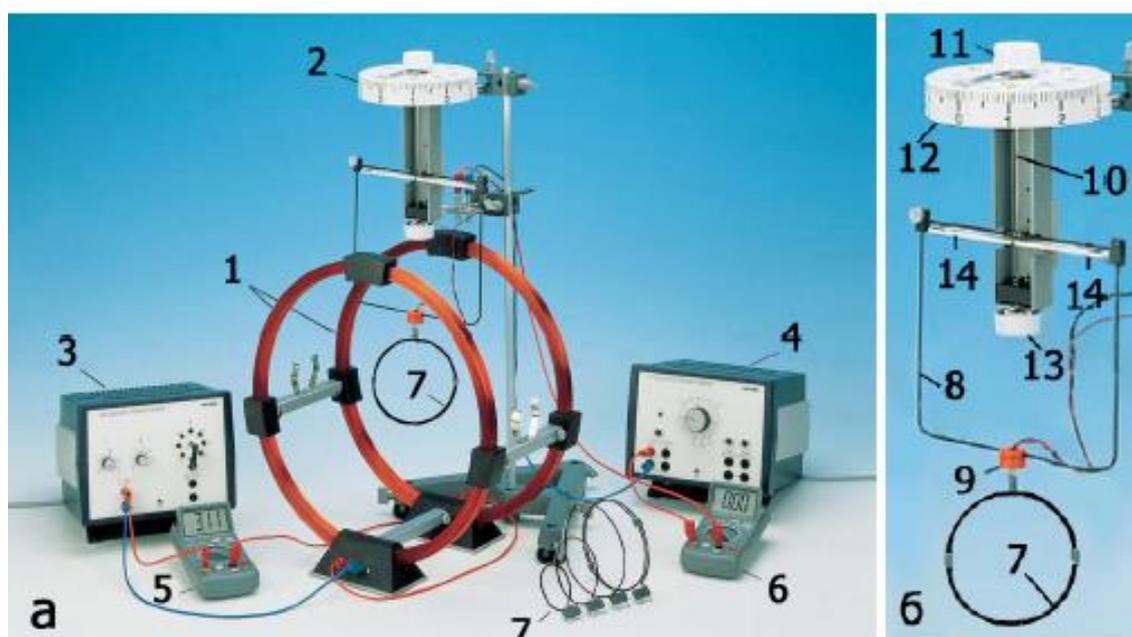
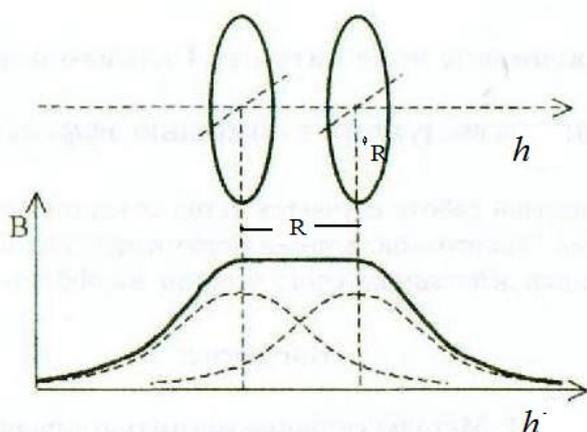


Рис. 5(а, б)

При выполнении работы необходимо строго соблюдать технику безопасности и охраны труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории. Работу следует выполнять в строгом соответствии с инструкцией.

РАБОЧИЕ ФОРМУЛЫ

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование зависимости механического момента сил, действующих на контур с током в магнитном поле катушек Гельмгольца, от индукции магнитного поля и от силы тока в контуре и определение магнитной индукции поля катушек Гельмгольца.



Зависимость модуля вектора индукции B магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца от координат h (сплошная линия), график $B=f(h)$ для каждой из катушек - пунктирная линия

Катушками Гельмгольца называют две одинаковые катушки, ориентированные перпендикулярно их общей оси и включенные последовательно в цепь источника тока. Если расстояние между катушками равно радиусу катушек, то в ограниченной области пространства между катушками магнитное поле, создаваемое ими, можно считать однородным.

В случае катушек Гельмгольца индукция B магнитного поля (1) на оси двух круговых токов в точке между ними ($h = \frac{R}{2}$) равна

$$B = 2 \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{16\pi N_{\text{кат}} I_{\text{кат}}}{(5)^{3/2} R} = 0,716 \frac{\mu\mu_0 N_{\text{кат}} I_{\text{кат}}}{R}. \quad (3)$$

Здесь $I_{\text{кат}}$ – ток в катушках Гельмгольца, $N_{\text{кат}}$ – число витков в одной катушке, R – средний радиус катушек. Перепишем (3) в виде

$$B = C I_{\text{кат}}, \quad (4)$$

где через C обозначили постоянную катушек Гельмгольца, зависящую только от их характеристик. Ее расчетное значение есть

$$C_{\text{расч}} = 0,716 \frac{\mu\mu_0 N_{\text{кат}}}{R}. \quad (5)$$

На контур с током I , помещенный в однородное магнитное поле на оси посередине между катушками Гельмгольца, будет действовать момент сил (2), равный

$$M = IBSN \sin \beta, \quad (6)$$

где S – площадь контура, N – число витков контура. График зависимости $M = f(I)$ представляет собой прямую, тангенс угла наклона которой к оси абсцисс при $\sin \beta = 1$ равен

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta M}{\Delta I} = BSN. \quad (7)$$

В магнитном поле катушек (4) тангенс угла наклона прямой $M = f(I)$ примет вид: $\operatorname{tg} \varphi = C I_{\text{кат}} SN$ при $\sin \beta = 1$. Следовательно, постоянную катушек Гельмгольца C можно определить по экспериментальным данным:

$$C_{\text{эксп}} = \frac{tg\varphi}{I_{\text{кат}}SN}. \quad (8)$$

В лабораторной работе используют контур диаметром 12 см с тремя витками. Магнитная проницаемость воздуха равна 1. Радиус катушек – 20 см, число витков на одной катушке – 150.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Упражнение 1. Исследование зависимости механического момента M , действующего на контур с током в магнитном поле, от силы тока в контуре. Определение постоянной C катушек Гельмгольца. Определение магнитной индукции катушек при заданном значении тока в них.

1. С помощью поворотного устройства узла крепления (9) (или перемещением катушек Гельмгольца) установите контур так, чтобы угол β между его плоскостью и плоскостью рамки (8) был равен 90° .

2. С помощью ручки обнуления (13) установите рамку так, чтобы положение верхней части рамки соответствовало середине «индикатора нуля» (14) (см. рис. 6).



Рис. 6 Положение верхней части рамки динамометра относительно середины «индикатора нуля» (вид сверху) (а)–рамка смещена, (б)–рамка установлена точно посередине «индикатора нуля»

3. Стрелку указателя (11) совместите с «нулем» шкалы (12) крутильного динамометра

4. Включите блок питания (3) катушек и амперметр (5). Установите силу тока $I_{\text{кат}}$ в катушках равной 2 А (2,5 А или 3А).

5. Поверните ручку на выключенном блоке питания (4) контура против часовой стрелки до упора. Установите двухполюсный переключатель в одно из крайних положений (например, вправо). Это переключение следует проводить только при отсутствии тока в контуре!

6. Включите блок питания (4) и амперметр (6). Установите силу тока I в контуре равной 0,5 А.

7. Под действием магнитного поля контур вместе с рамкой повернется на некоторый угол, верхняя часть рамки сместится относительно «индикатора нуля». Момент пары сил Ампера, действующих на контур с током в магнитном поле относительно оси контура, можно уравновесить моментом упругих сил, возникающих при закручивании проволоки (10). Для этого поворотом указателя (11) верните рамку в исходное положение. Определите положение стрелки указателя (11) по верхней части шкалы (12) динамометра. Цена деления шкалы 0,01 мН·м. Показания динамометра запишите в таблицу 1.

8. Увеличьте силу тока до 1 А. Поворотом указателя (11) верните рамку в исходное положение. Запишите показания динамометра.

9. Повторите измерения, увеличивая силу тока I до 4 А с шагом 0,5 А.

10. Уменьшите до нуля ток в контуре, повернув ручку питания контура (4) против часовой стрелки до упора. Установите двухполюсный переключатель в нейтральное положение. Согласно пунктам 2 и 3, установите рамку в «нулевое» положение.

11. Повторите измерения для противоположного направления тока в контуре в том же диапазоне. Для этого установите двухполюсный переключатель в противоположное из крайних положений (влево). Проведите измерения согласно пунктам 6-10.

12. Постройте графики зависимости $M = f(I)$ для обоих направлений тока.

13. Определите тангенсы углов наклона прямых. Для среднего значения тангенса вычислите величину индукции магнитного поля катушек для выбранного значения тока в них (см. (7)) и постоянную катушек Гельмгольца $C_{\text{эксп}}$ по экспериментальным данным (см. (8)).

14. Рассчитайте постоянную $C_{\text{расч}}$ катушек Гельмгольца, используя характеристики самих катушек (см. (5)). Сделайте вывод.

Таблица 1

$I_{\text{кат}} = \quad A, \quad d = \quad \text{см}, \quad S = \quad \text{м}^2, \quad N = \quad, \quad R = \quad \text{см}, \quad N_{\text{кат}} = \quad, \quad \beta =$						
При одном направлении тока				При противоположном направлении тока		
№	I, A	$M, \text{мНм}$	$tg\varphi, \text{мНм/А}$	I, A	$M, \text{мНм}$	$tg\varphi, \text{мНм/А}$
Ср. зн. $tg\varphi = \quad, \text{мНм/А}$			$C_{\text{эксп}} = \quad, \text{Тл/А}$	$C_{\text{расч}} = \quad, \text{Тл/А}$	$B = \quad, \text{Тл}$	

Упражнение 2. Исследование зависимости механического момента сил M , действующих на контур с током в магнитном поле, от силы тока в катушках Гельмгольца. Определение индукции магнитного поля катушек Гельмгольца.

1. Установите двухполюсный переключатель в одно из крайних положений. Ток в контуре установите равным $I=1 \text{ А}$ (1,5 А или 2 А).

2. Изменяя силу тока в катушках Гельмгольца $I_{\text{кат}}$ в интервале от 1 А до 4 А с шагом 0,5 А, произведите измерения механического момента сил, действующих на контур в магнитном поле, как в упражнении 1. Запишите в таблицу 2.

3. Повторите измерения для противоположного направления тока.

4. Для среднего значения момента сил определите индукцию магнитного поля катушек Гельмгольца $B_{\text{эксп}}$ согласно (6) для каждого значения момента сил.

5. Вычислите магнитную индукцию $B_{\text{расч}}$ катушек по расчетным данным (см. (4)) для каждого значения тока в катушке, используя значение $C_{\text{расч}}$.

6. Для более наглядного сравнения полученных результатов построите график зависимости $B_{\text{расч}} = f(I_{\text{кат}})$, укажите значения $B_{\text{эксп}}$ на одном чертеже, отметьте значение индукции, полученное в упражнении 1.

7. Определите предельные отклонения расчетных и экспериментальных значений индукции по графику. Оцените погрешность измерений. Сделайте вывод.

Таблица 2

$I = \quad A, \quad C_{\text{расч}} = \quad \text{Тл/А}$							
$I_{\text{кат}}, A$							

$M, \text{ мНм}$							
$M, \text{ мНм}$							
$M_{\text{ср}}, \text{ мНм}$							
$B_{\text{эксп}}, \text{ Тл}$							
$B_{\text{расч}}, \text{ Тл}$							

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое магнитная индукция?
Как определяется направление вектора магнитной индукции?
2. Что такое магнитный момент контура? Как направлен, чему равен?
3. В чем заключается закон Био – Савара – Лапласа?
4. Какова магнитная индукция поля на оси кругового витка с током в его центре и на расстоянии r от центра? Как выглядят линии магнитной индукции поля витка с током?
5. Какие силы действуют на контур с током в однородном магнитном поле?
Как рассчитать величину вращающего момента этих сил?
6. Как изменится распределение магнитного поля в области между катушками Гельмгольца, если токи в катушках будут противоположного направления?
7. Почему катушки располагают друг от друга на расстоянии равном радиусу катушки?