

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой общей физики ФТИ

А.М. Лидер

«__» _____ 2016 г.

**ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАМКИ С ТОКОМ
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы № 2-19
по курсу «Общая физика» для студентов всех специальностей

Томск 2016

УДК 537

Методические указания к выполнению лабораторной работы № 2-19 по курсу «Общая физика» по теме «Электромагнетизм» для студентов всех направлений и специальностей очной и заочной форм обучения.

Томск, изд. ТПУ, 2016, 14 стр.

Составители: Мурашкина Т.Л., ассистент КОФ ТПУ

Рецензенты: Ларионов В.В., профессор КОФ ТПУ
Мельникова Т.Н., ст. преподаватель КОФ ТПУ

Методическое пособие рассмотрено и рекомендовано методическим семинаром кафедры общей физики «__»_____ 2016 г.

Зав. кафедрой общей физики



А.М. Лидер

ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАМКИ С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Цель работы: изучить вращающий момент сил, действующий на рамку с током в однородном магнитном поле.

Приборы и принадлежности: катушки Гельмгольца, набор используемых проводников, контактов, держателей, динамометр вращения, универсальные источники питания, цифровые мультиметры, соединительные провода красного и синего цвета.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Пусть дан ток, циркулирующий в плоском замкнутом контуре малых размеров. Ориентацию контура в пространстве характеризуют направлением положительной нормали \vec{n} к контуру, связанной с направлением тока правилом правого винта (рис. 1).

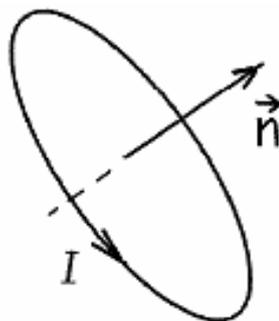


Рис. 1. Положительная нормаль к контуру с током

Если поместить данный контур в магнитное поле, окажется, что поле устанавливает контур положительной нормалью в определенном направлении, совпадающем с направлением поля в данной точке. Если же контур повернуть таким образом, чтобы направления нормали и поля не совпадали, возникает вращающий момент сил, стремящийся вернуть контуру исходное равновесное положение. Модуль этого момента изменяется от угла α между нормалью и направлением поля и достигает своего наибольшего значения при 90° (т.е. $\alpha = \pi/2$).

Вращающий момент зависит как от свойств поля в данной точке, так и от свойств контура, он пропорционален силе тока I в контуре и площади контура S , обтекаемого током, и непосредственно зависит от его ориентации в пространстве. Таким образом, действие магнитного поля на плоский контур с током определяется величиной, называемой *магнитным моментом*:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n} \quad (1)$$

Отношение вращающего момента сил поля к магнитному моменту рамки оказывается при фиксированном угле α одним и тем же. Поэтому его можно принять в качестве силовой характеристики магнитного поля – модуля магнитной индукции B . Направление вектора магнитной индукции поля задается равновесным положением положительной нормали к контуру с током, помещенному в данное магнитное поле.

Зная, что для магнитного поля справедлив принцип суперпозиции: т.е. поле, порождаемое несколькими движущимися зарядами (токами), можно представить в виде векторной суммы полей \vec{B}_i , порождаемых каждым зарядом (током) в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i \quad (2)$$

По закону Ампера сила, действующая на каждый элемент длины dl контура с током I в магнитном поле с индукцией B , определяется по формуле:

$$\vec{F} = I[d\vec{l} \times \vec{B}]. \quad (3)$$

Тогда сила, которая действует на весь контур с током в магнитном поле, будет определяться выражением, где интеграл берется по всей длине контура:

$$F = I \oint [d\vec{l} \times \vec{B}]. \quad (4)$$

Учитывая, что магнитное поле однородно (т.е. $B = \text{const}$), задача сводится к вычислению векторного интеграла $\oint d\vec{l}$, значение которого равно нулю. Из этого заключения можно сделать вывод, что сила $F = 0$.

Этот результат справедлив для контуров любой формы при произвольном расположении контура относительно направления поля. Существенным вопросом является лишь условие однородности поля.

Вычислим результирующий вращающий момент, создаваемый силами, приложенными ко всем элементам контура (момент этих сил, в общем случае, не равен нулю). Исходя из того, что в однородном поле сумма этих сил равна нулю, результирующий момент относительно любой точки будет один и тот же.

Рассмотрим плоский контур с током прямоугольной формы, расположенный в однородном магнитном поле так, что положительная нормаль \vec{n} , к контуру перпендикулярна вектору \vec{B} (рис. 2).

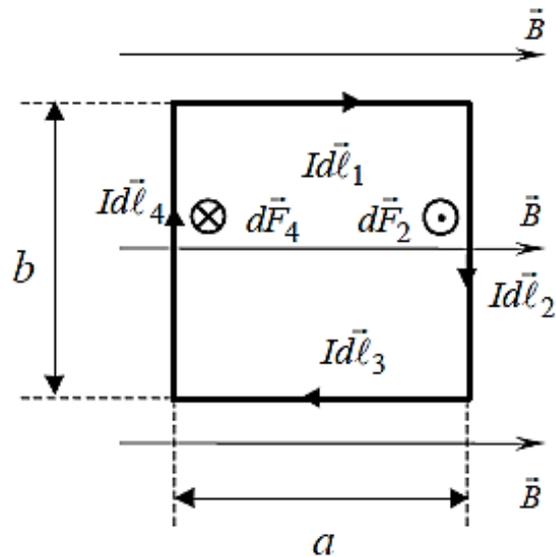


Рис. 2. Контур с током в однородном магнитном поле

На различные элементы тока $I d\vec{l}$ действуют силы $d\vec{F} = I[d\vec{l} \times \vec{B}]$. Поскольку вектор $d\vec{l}_1$ параллелен вектору \vec{B} , а вектор $d\vec{l}_3$ противоположно направлен вектору \vec{B} , то $dF_1 = dF_3 = 0$. Тогда получаем:

$$dF_2 = dF_4 = Idl_{2,4} B \neq 0.$$

Параллельные и противоположно направленные силы dF_2 и dF_4 образуют пару сил, результирующий момент которых равен

$$dM = dFa = (Idl)Ba. \quad (5)$$

Тогда суммарный момент, действующий на рамку, будет равен:

$$M = IbBa = IBs, \quad (6)$$

где $S = a \cdot b$ – площадь рамки.

При произвольной ориентации контура относительно направления \vec{B} следует учитывать угол α между положительной нормалью \vec{n} к контуру и направлением поля \vec{B} . В этом случае момент сил будет равен

$$M = IBs \sin \alpha. \quad (7)$$

Формула (7) в векторном виде будет выглядеть следующим образом:

$$\vec{M} = I[\vec{n} \times \vec{B}]S = [\vec{p}_m \times \vec{B}]. \quad (8)$$

Выражение (7) справедливо для плоского контура любой формы и также применимо для нахождения величины вращающего момента, действующего на круглую рамку с током в однородном магнитном поле

катушек Гельмгольца.

Индукция магнитного поля внутри катушек Гельмгольца описывается формулой:

$$B = cI' \quad (9)$$

где I' – ток в катушках Гельмгольца, c – постоянная катушек Гельмгольца.

Для круглой рамки площадью $S = \pi d^2/4$, находящейся в однородном магнитном поле катушек Гельмгольца, величина вращающего момента рассчитывается по формуле:

$$M = cInI' \frac{\pi}{4} d^2 \sin \alpha, \quad (10)$$

где n – число витков рамки, I' – ток, протекающий в катушках, d – диаметр рамки, α – угол ориентации нормали рамки по отношению к линиям поля катушек Гельмгольца, c – постоянная катушек Гельмгольца.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рамку с током, помещенную в однородное магнитное поле, со стороны поля действует вращающий момент. В ходе экспериментов проверяется, что его величина зависит от числа витков рамки, ее радиуса, ее ориентации в поле, тока, протекающего по ней, а также от величины внешнего поля. Внешний вид экспериментальной установки показан на рис. 3. Магнитное поле создается каждой из показанных катушек.

Катушки Гельмгольца – две одинаковые, соединенные последовательно катушки с общей осью, расположенные на расстоянии, равном их радиусу. В средней части такой системы создается область практически однородного поля.

По схеме Гельмгольца, обеспечивающей наилучшую однородность магнитного поля, проводник, соединяющий катушки, замыкает клеммы 1-1 или 2-2. В режиме постоянного включения ток через катушки не должен превышать 3 А. Соединительные провода располагаются свободно. Они скручиваются вместе (бифилярно) для исключения возможности появления дополнительного магнитного момента. Положение нулевой точки для вращающейся рамки должно проверяться постоянно, т.к. быстрые вращательные движения могут изменить ее положение. Для установки динамометра на ноль следует верхним верньером прибора поставить указатель значений в нулевое положение, после чего рамка динамометра вращением нижнего верньера перемещается в «нулевое» положение. На отсчетном устройстве

подвеса рамок нанесены отметки с интервалом в 30° . Чтобы избежать использование неградуированной части, рекомендуется использовать углы поворота рамки, кратные 30° .

Рамка с током (2) помещена в магнитное поле, создаваемое катушками Гельмгольца (3), которые обеспечивают однородность поля. Питание катушек и рамки осуществляется универсальными источниками питания (4) и контролируется измерительными приборами – цифровыми мультиметрами (5). Вращающий момент сил, действующих на рамку с током, определяется с помощью динамометра вращения (1), закрепленного на штативе. «Нулевое» положение динамометра вращения следует контролировать перед каждым измерением.

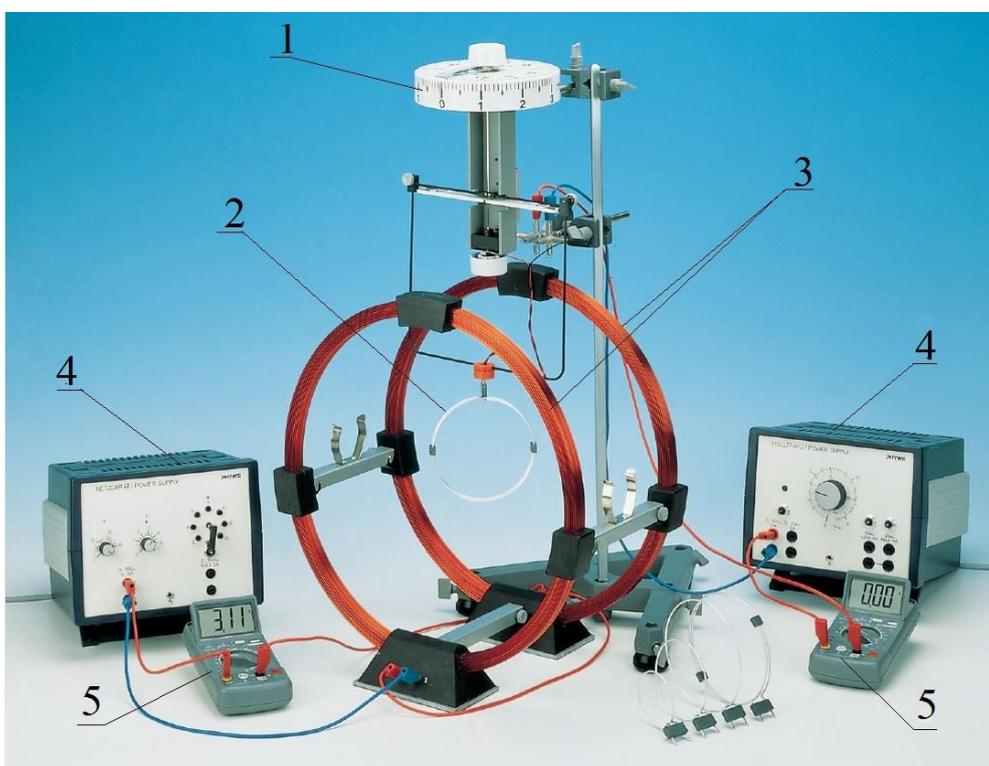


Рис. 3. Экспериментальная установка для определения значения вращающего момента рамки с током, помещенной во внешнее магнитное поле. 1 – динамометр вращения, 2 – рамка с током, 3 – катушки (кольца) Гельмгольца, 4 – источники питания, 5 – цифровые мультиметры

При прохождении тока через рамку, помещенную в магнитное поле, она повернется на определенный угол (цена деления шкалы – $0,05 \text{ Н}\cdot\text{м}$). Для расчета вращающего момента используется постоянная колец Гельмгольца c :

$$c = 6,4 \frac{\text{Н}}{\text{А}^2 \cdot \text{м}}.$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

ВНИМАНИЕ!

Установку во время проведения работы не сдвигать! Крепление контура проводить только в присутствии лаборанта!

После каждого измерения при выключенных источниках питания проводится установка динамометра на ноль!

УПРАЖНЕНИЕ 1

Зависимость вращающего магнитного момента от величины тока в катушках Гельмгольца

Установите вид зависимости вращающего магнитного момента, действующего на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле от величины тока I' в катушках Гельмгольца.

1. Соберите установку согласно рис. 3, подключите необходимые источники питания.
2. Выберите для проведения эксперимента контур с 3 витками. Подвесьте контур к рамке динамометра так, чтобы в ходе эксперимента обеспечивалось максимальное значение момента сил.
3. Зафиксируйте ток I через контур в 2 А (контролируйте его значение с помощью мультиметра).
4. Меняя ток I' в катушках Гельмгольца в диапазоне от 0 до 3 А (4-5 значений на интервал), проведите измерения вращающего магнитного момента.
5. Результаты измерений внесите в таблицу 1.

Таблица 1

| № | $I', \text{ А}$ | $M, \text{ Н}\cdot\text{м}$ | $I, \text{ А}$ | $d, \text{ м}$ | n | α |
|---|-----------------|-----------------------------|----------------|----------------|-----|----------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |

Здесь n – количество витков, α – угол между нормалью и направлением поля.

6. Постройте график зависимости вращающего момента от величины тока I' в катушках Гельмгольца $M = f(I')$.
7. Оцените погрешность измерений.
8. Сделайте вывод.

После каждого измерения при выключенных источниках питания проводится установка динамометра на ноль!

УПРАЖНЕНИЕ 2

Зависимость вращающего магнитного момента от величины тока в контуре

Установите вид зависимости вращающего магнитного момента, действующего на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле как функцию от тока I в контуре.

1. Выберите для эксперимента большой контур с одним витком. Подвесьте контур к рамке динамометра так, чтобы в ходе эксперимента обеспечивалось максимальное значение момента сил.
2. Зафиксируйте ток I в катушках Гельмгольца 3 А.
3. Изменяя ток I' в контуре от 0 до 3 А (4-5 значений на интервал), проведите измерение вращающего момента, действующего на контур с током.
4. Результаты измерений внесите в таблицу 2.

Таблица 2

| № | $I, \text{А}$ | $M, \text{Н}\cdot\text{м}$ | $I', \text{А}$ | $d, \text{м}$ | n | α |
|---|---------------|----------------------------|----------------|---------------|-----|----------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |

5. Постройте график зависимости вращающего момента от величины тока I в контуре $M = f(I)$.
6. Оцените погрешность измерений.

7. Сделайте вывод.

После каждого измерения при выключенных источниках питания проводится установка динамометра на ноль!

УПРАЖНЕНИЕ 3

Зависимость вращающего магнитного момента от величины угла между магнитным моментом и направлением магнитного поля

Установите вид зависимости вращающего магнитного момента, действующего на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле от угла между магнитным моментом контура и направлением магнитного поля.

1. Выберите для эксперимента большой контур с одним витком. Подвесьте контур к рамке динамометра так, чтобы в ходе эксперимента обеспечивалось максимальное значение момента сил.
2. Зафиксируйте ток через контур в 3 А и ток в катушках в 3 А.
3. Проведите серию измерений. Для этого с помощью отсчетного устройства подвеса рамок меняйте ориентацию магнитного момента контура в магнитном поле с шагом 300 (три отсчета в одну и другую сторону от начального положения).
4. Результаты измерений внесите таблицу 3.

Таблица 3

| № | α | M , Н·м | I' , А | I , А | d , м | n |
|---|----------|-----------|----------|---------|---------|-----|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |

5. Постройте график зависимости вращающего момента от угла между магнитным моментом контура и направлением магнитного поля $M = f(\sin \alpha)$.
6. Оцените погрешность измерений.
7. Сделайте вывод.

После каждого измерения при выключенных источниках питания проводится установка динамометра на ноль!

***Упражнения 4 и 5 выполняются ТОЛЬКО по рекомендации преподавателя и в присутствии лаборанта!**

УПРАЖНЕНИЕ 4*

Зависимость вращающего магнитного момента от числа витков контура

Установите вид зависимости вращающего магнитного момента, действующего на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле от числа витков контура.

1. Выберите контур для эксперимента. Подвесить контур к рамке динамометра так, чтобы в ходе эксперимента обеспечивалось максимальное значение момента сил.
2. Зафиксируйте ток через контур в 3 А.
3. Зафиксируйте ток в катушках Гельмгольца в 3 А. Проведите измерение.
4. Замените контур. Проведите пп. 2-3.
5. По результатам измерений заполните таблицу 4.

Таблица 4

| № | n | $M, \text{Н}\cdot\text{м}$ | $I', \text{А}$ | $I, \text{А}$ | $d, \text{м}$ | α |
|---|-----|----------------------------|----------------|---------------|---------------|----------|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |

6. Постройте график $M = f(n)$.
7. Оцените погрешность измерений.
8. Сделайте вывод.

После каждого измерения при выключенных источниках питания проводится установка динамометра на ноль!

УПРАЖНЕНИЕ 5*

Зависимость вращающего магнитного момента от диаметра контура

Установите вид зависимости вращающего момента, действующего на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле, от диаметра контура.

1. Проведите измерения, используя большой и маленький контуры с одним витком.
2. Через катушки и контуры пропустите токи в 3 А.
3. Зафиксируйте ток в катушках Гельмгольца в 3 А. Проведите измерение.
4. Замените контур. Проведите пп. 2-3.
5. По результатам измерений заполните таблицу 5.

Таблица 4

| № | d , м | M , Н·м | I' , А | I , А | α | n |
|---|---------|-----------|----------|---------|----------|-----|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |

6. Постройте график $M = f(d)$.
7. Оцените погрешность измерений.
8. Сделайте вывод.

После каждого измерения при выключенных источниках питания проводится установка динамометра на ноль!

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Что такое магнитная индукция? Как определяется направление вектора магнитной индукции?
2. Что является силовой характеристикой магнитного поля?
3. Что такое магнитный момент? Укажите единицы измерения магнитного момента.
4. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа.
5. Сформулируйте принцип суперпозиции для магнитного поля.
6. Какие силы действуют на контур с током в однородном магнитном поле? Как рассчитать величину вращающего момента этих сил?
7. Работа по перемещению контура с током в магнитном поле.
8. Что такое катушки Гельмгольца? Для чего они предназначены в данной работе?
9. Каков вид зависимости величины вращающего момента, действующего на рамку с током от значения индукции внешнего магнитного поля

10. Каков вид зависимости величины вращающего момента, действующего на рамку с током от значения магнитного момента рамки.
11. Что является постоянной катушек Гельмгольца?
12. Как меняется вращающий момент при изменении количества витков контура?
13. Как меняется вращающий момент при изменении диаметра контура?
14. При каком значении угла между нормалью и направлением поля вращающий момент достигает своего наибольшего значения?
15. Какой вид рамки вы использовали в данной работе?
16. Действием каких сил объясняется вращение рамки в магнитном поле?
17. Контур с током свободно подвешен в магнитном поле, перпендикулярном его плоскости. Какое воздействие со стороны поля испытывает контур?
18. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,2$ Тл находится квадратная рамка со стороной 10 см, причем нормаль к рамке составляет угол 30° с направлением силовых линий. По рамке течет ток 1 А. Определите величину механического момента, действующего на рамку.
19. Как определить направление вектора B с помощью рамки с током?
20. Чем определяется угол поворота рамки в условиях данной работы, если по ней пропустить ток I ?
21. Как по классу точности определить абсолютную погрешность электроизмерительного прибора?
22. Выведите формулу для магнитной индукции на оси витка с током.
23. Как определяется область с однородным полем в катушках Гельмгольца?
24. Расчет магнитных полей простейших токовых систем (прямолинейный ток, ось кругового витка, соленоид).
25. В чем заключается «метод магнетрона» измерения магнитной индукции?