

**Лабораторная работа № 2.14**  
**РАМКА С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Вяххи Е.Н., Степанова Т.Р.

**Цель работы**

Исследование рамки с током в магнитном поле колец Гельмгольца.

**Задачи:**

1. Измерить зависимость величины вращающего момента, действующего на рамку, от тока в кольцах Гельмгольца при фиксированном токе в рамке.
2. Измерить зависимость величины вращающего момента, действующего на рамку, от тока в рамке при фиксированном токе колец Гельмгольца

**Введение**

Если по замкнутому проводнику (рамке) протекает электрический ток  $I$ , то на разные части проводника будут действовать элементарные силы Ампера. В однородном магнитном поле сумма всех этих сил равна нулю. Однако их суммарный вращающий момент  $\vec{M}$  отличен от нуля и равен:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}] \quad (1)$$

где  $\vec{B}$  – вектор индукции магнитного поля, а характеризующая рамку величина  $\vec{p}_m$  называется вектором ее магнитного момента.

$$\vec{p}_m = IS\vec{e}_n \quad (2)$$

где  $S$  – площадь, ограниченная рамкой, а  $\vec{e}_n$  – единичный вектор нормали к плоскости рамки, его направление определяется по правилу правого винта (буравчика).

Модуль вращающего момента  $M$  описывается соотношением:

$$M = p_m B \sin\alpha \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{p}_m$ .

Если магнитное поле неоднородно, то на рамку действует также результирующая сила, которая искажает результаты измерения вращающего момента, чего следует избегать.

**Экспериментальная установка**

Схематическое изображение экспериментальной установки показано на рис. 1. Для создания однородного поля в работе используется устройство, называемое кольцами, или катушками, Гельмгольца. Кольца Гельмгольца представляют собой пару коротких соосных катушек, расстояние между которыми равно их радиусам  $R = 20$  см (1 на рис.1). Зона однородности магнитного поля (приблизительно шар с радиусом около  $0,3R = 6$  см) находится в центре устройства (рис.2), а значение магнитной индукции в ней:

$$B = (0,8)^{3/2} \cdot \frac{\mu_0 m I_{\text{кат}}}{R} = 0.716 \cdot \frac{\mu_0 m}{R} I_{\text{кат}}, \quad (4)$$

где  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $I_{\text{кат}}$  – ток в катушках, а  $m = 137$  – число витков в каждой из них, магнитная индукция в Тл, а ток в А.

Ток в катушках вызывает их нагрев, поэтому в режиме непрерывного включения не рекомендуется устанавливать  $I_{\text{кат}} > 3$  А.

Используемая в работе рамка (2 на рис.1) это плоское кольцо с диаметром  $d = 12$  см, близким к размеру области однородного магнитного поля, и числом витков  $n = 3$ , для которой магнитный момент равен:

$$p_m = I_{\text{рам}} \cdot n \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 3,39 \cdot 10^{-2} I_{\text{рам}} \quad (5)$$

Здесь  $p_m$  выражается в  $\text{А}\cdot\text{м}^2$ , а ток в А. Ток подводится к рамке с помощью тонких соединительных проводов, скрученных вместе (бифилярно) для уменьшения их магнитного поля.

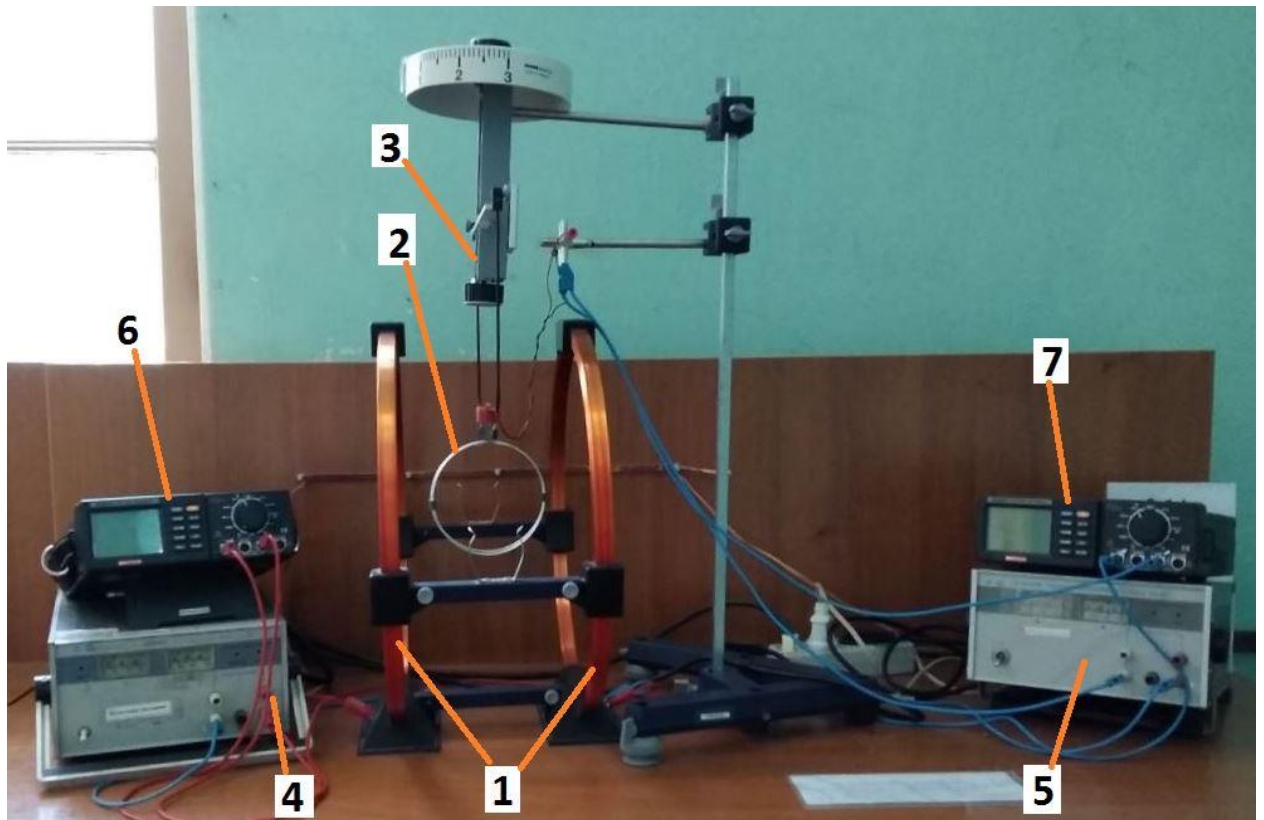


Рис. 1. Экспериментальная установка для определения значения вращающего момента рамки с током, помещенной во внешнее магнитное поле.

Токи задаются отдельными источниками питания 4 и 5, а измеряются двумя амперметрами 6 и 7 в кольцах Гельмгольца и рамке, соответственно.

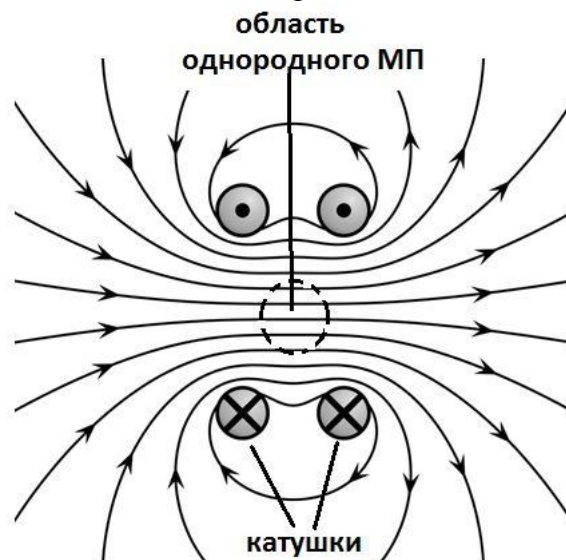


Рис.2 Магнитное поле катушек Гельмгольца.

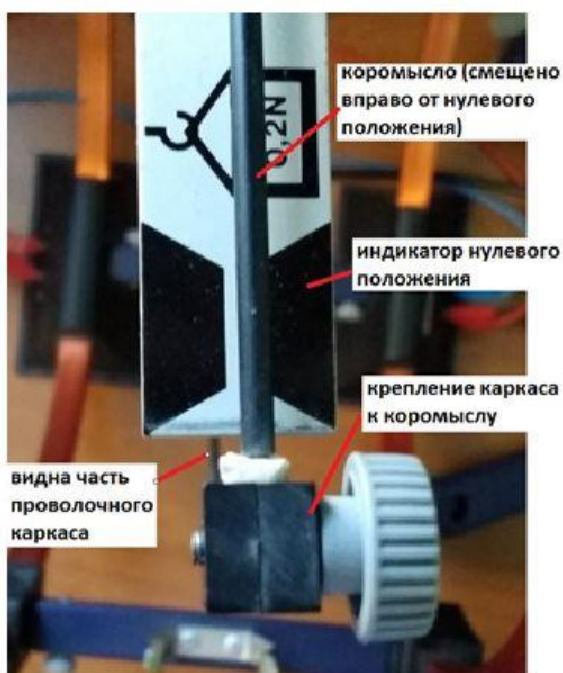
Рамка с током с помощью проволочного каркаса закреплена на коромысле торсионного, (от англ. torque – момент силы скручивания) динамометра, показанного на рис.3. Корпус динамометра 3 закреплён на штативе. Его верхняя часть, цилиндрический барабан, снабжен 2 шкалами. На боковой поверхности нанесена короткая шкала на 3 деления, а на

торце большая шкала на 10 делений. Шкалы отградуированы в миллиньютонх (mN), приложенных к коромыслу с плечом 120 мм, т.е. одно большое деление соответствует моменту сил  $1,2 \cdot 10^{-4}$  Н·м.



Рис.3 Торсионный динамометр

Между верхней и нижней частями корпуса натянута металлическая нить, деформация



кручения которой создает откалиброванный момент силы. Концы нити закреплены в зажимах, соединенных с головками, которые могут поворачиваться относительно корпуса. Нижняя головка служит для подстройки нулевого (исходного) состояния динамометра. Верхняя головка снабжена стрелкой, которая поворачивается относительно барабана со шкалами, и служит для измерения момента силы. К средней части нити, но заметно ближе к ее низу прикреплено коромысло динамометра с подвешенной на нем рамкой. Для фиксации нулевого (исходного) положения коромысла служит укрепленный на корпусе индикатор (рис.4). Исходное положение коромысла торсионного динамометра рекомендуется регулярно проверять в ходе работы, т. к. манипуляции с рамкой могут его сместить.

Рис.4 Коромысло и индикатор его нулевого положения

### Порядок проведения эксперимента

Торсионный динамометр измеряет вращающий момент, действующий на рамку, по компенсационной схеме. Процедура измерения выглядит следующим образом:

а. При выключенном токе через рамку установите ее плоскость параллельно оси катушек Гельмгольца, так что в дальнейшем угол между направлениями магнитного поля и вектора магнитного момента  $\alpha$  будет составлять  $90^\circ$ , а  $\sin\alpha = 1$  в формуле (3).

б. Установите стрелку торсионного динамометра на ноль вращением верхней головки.

в. Осторожным вращением нижней головки динамометра установите коромысло в исходное положение до его совмещения с зазором метки индикатора. В дальнейшем для данной серии измерений (до следующей проверки исходного положения) не следует прикасаться к рамке или коромыслу.

г. При включении токов в рамке и катушках силы Ампера, действующие со стороны магнитного поля, поворачивают рамку до тех пор, пока в повернутом положении рамки вращающий момент скрученного подвеса не сравняется с моментом сил Ампера. При этом скручиваются и создают вращающие моменты обе, верхняя и нижняя, части нити подвеса.

д. Затем вращением верхней головки динамометра в направлении, противоположном направлению поворота рамки, коромысло вместе с рамкой возвращают в исходное положение. При этом нижняя часть нити подвеса оказывается в недеформированном состоянии и не создает вращающего момента. Скручивание верхней части нити подвеса создает вращающий момент, который компенсирует (поэтому метод измерения называется компенсационным) момент сил Ампера, действующих на рамку с током. Значение этого момента считывают с торцевой шкалы динамометра.

Для проведения измерений:

1. Убедитесь, что установка собрана согласно рис.1. Подключите необходимые источники питания. Закрепите на подвесе рамку с тремя витками ( $n = 3$  в формуле (5)).

2. Установите коромысло динамометра в исходное состояние (см. выше пункт в). В дальнейшем после первого измерения значения вращающего момента проверьте, сохранилось ли это исходное состояние. Если сохранилось, то можно проверить его только в начале следующей серии измерений, а если не сохранилось, то рекомендуется проверять его чаще, после каждых 2-3 измерений. Важно иметь в виду, что поддержание исходного состояния коромысла определяется не только свойствами установки, но способностью экспериментатора концентрировать внимание на процессе измерения.

3. Установите в рамке ток в катушках Гельмгольца  $I_{\text{кат}} = 3$  А и измерьте зависимость вращающего момента, действующего на контур с током, от силы тока в рамке  $I_{\text{рам}}$ . Для этого меняйте ток в рамке с шагом 0,3 А от 0 до 3 А и измеряйте значение момента сил Ампера  $M$ . Результаты измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1. Зависимость момента сил Ампера  $M$  от силы тока в рамке  $I_{\text{рам}}$ . Сила тока в катушках Гельмгольца  $I_{\text{кат}} = 3$  А.

№	$I_{\text{рам}}$ , А	$M$ , мкН·м
1	0	
11	3	

4. Установите в рамке ток  $I_{\text{рам}} = 3$  А и измерьте зависимость вращающего момента, действующего на контур с током, от силы тока  $I_{\text{кат}}$  в катушках Гельмгольца. Для этого меняйте ток в катушках Гельмгольца  $I_{\text{кат}}$  с шагом 0,5 А от 0 до 3 А, а далее до 6 А с шагом 1 А и измеряйте значение момента сил Ампера  $M$ . Чтобы не допустить нагрева

катушек, измерения при  $I_{\text{кат}} > 3 \text{ А}$  проводите по возможности быстро. Результаты измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2. Зависимость момента сил Ампера  $M$  от силы тока  $I_{\text{кат}}$  в катушках Гельмгольца. Сила тока в рамке  $I_{\text{рам}} = 3 \text{ А}$ .

№	$I_{\text{кат}}, \text{ А}$	$M, \text{ мкН}\cdot\text{м}$
1	0	
10	6	

### Обработка результатов

1. По результатам таблицы 1 постройте график зависимости вращающего момента  $M$ , действующего на рамку, от силы тока  $I_{\text{рам}}$  в ней. Согласно (3) и (5) зависимость должна быть линейной:

$$M = B \cdot n \cdot \frac{\pi d^2}{4} I_{\text{рам}} \quad (6)$$

2. Методом парных точек определите угловой коэффициент:

$$k = B \cdot n \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (7)$$

этой зависимости и его погрешность. Соответствующие данные запишите в таблицу 3.

Таблица 3 Вычисление углового коэффициента зависимости  $M = f(I_{\text{рам}})$  с помощью МПТ.

№№ точек	$\Delta I_{\text{рам}}, \text{ А}$	$\Delta M, \text{ мкН}\cdot\text{м}$	$k = \Delta M / \Delta I_{\text{рам}}, \text{ мкН}\cdot\text{м}/\text{А}$	$k - \langle k \rangle, \text{ мкН}\cdot\text{м}/\text{А}$	$(k - \langle k \rangle)^2, (\text{мкН}\cdot\text{м}/\text{А})^2$
1, 6					
5, 11					
			$\langle k \rangle = \dots \text{ мкН}\cdot\text{м}/\text{А}$ $\Delta k = \dots \text{ мкН}\cdot\text{м}/\text{А}$		$\Sigma(k - \langle k \rangle)^2 = \dots (\text{мкН}\cdot\text{м}/\text{А})^2$

3. Из полученного значения  $k$  по формуле:

$$B^* = \frac{4k}{n\pi d^2} \quad (8)$$

вычислить магнитную индукцию  $B^*$  в области однородности поля катушек Гельмгольца при токе  $I_{\text{кат}} = 3 \text{ А}$ , а также ее погрешность

4. По результатам таблицы 2 постройте график зависимости вращающего момента  $M$ , действующего на рамку, от силы тока  $I_{\text{кат}}$  в катушках Гельмгольца. Согласно (3) и (5) зависимость должна быть линейной:

$$M = I_{\text{рам}} \cdot n \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot 0.716 \cdot \frac{\mu_0 m}{R} I_{\text{кат}} \quad (9)$$

5. Методом парных точек определите угловой коэффициент:

$$q = I_{\text{рам}} \cdot n \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot 0.716 \cdot \frac{\mu_0 m}{R}$$

этой зависимости и его погрешность. Соответствующие данные запишите в таблицу 4.

Таблица 4. Вычисление углового коэффициента зависимости  $M = f(I_{\text{кат}})$  с помощью МПТ.

№№ точек	$\Delta I_{\text{рам}},$ А	$\Delta M,$ мкН·м	$q = \Delta M / \Delta I_{\text{рам}},$ мкН·м/А	$q - \langle q \rangle,$ мкН·м/А	$(q - \langle q \rangle)^2,$ (мкН·м/А) <sup>2</sup>
1, 6					
5, 10					
			$\langle q \rangle = \dots$ мкН·м/А $\Delta q = \dots$ мкН·м/А		$\Sigma(q - \langle q \rangle)^2 =$ $\dots$ (мкН·м/А) <sup>2</sup>

6. По значению углового коэффициента  $q$ , найденного в п.5, вычислите коэффициент пропорциональности:

$$b_{\text{Гел}} = 0.716 \cdot \frac{\mu_0 m}{R} \quad (10)$$

между током в катушках Гельмгольца и магнитной индукцией в их центре (см. (4)):

$$b_{\text{Гел}} = \frac{q}{I_{\text{рам}}} \cdot \frac{4}{\pi d^2} = \frac{q}{I_{\text{рам}}} \cdot \frac{B^*}{k} \quad (11)$$

Вычислите его погрешность.

7. Сравните значение  $b_{\text{Гел}}$ , найденное в п.6, со значениями, полученными прямым вычислением по (10) и из соотношения  $B^* / I_{\text{кат}}$ , где  $I_{\text{кат}} = 3$  А.

#### Контрольные вопросы.

1. Какая величина называется магнитным моментом?
2. От каких параметров зависит величина магнитного момента?
3. Почему на магнитный момент, помещенный в магнитное поле, действует вращающий момент (момент силы)?
4. В каком случае на рамку с током в магнитном поле будет действовать сила?

#### Литература

1. Иродов И.Е. т.3 Электромагнетизм. Основные законы. (2017)
2. Иванов В.К. ФИЗИКА ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. Учебное пособие. Изд. СПбПУ (2022)
3. Б. Д. Агапьев, В. В. Козловский, К. Б. Агапьев ПРАКТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА. Учебное пособие. Изд. СПбПУ (2017)