

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой общей физики ФТИ

 А.М.Лидер

« » 2016 г.

Лабораторная работа № 2-15а

**ИЗМЕРЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ КАТУШКИ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу
«Общая физика» по теме «Электричество и магнетизм» для студентов
всех направлений и специальностей

Составитель В.М. Петелина

Томск-2016

УДК 537
ББК 22.2

Измерение и исследование магнитных полей с помощью измерительной катушки: методические указания к работе 2-15а по курсу «Общей физики» для студентов всех направлений и специальностей/сост. В.М. Петелина; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 13 с.

УДК 537
ББК 22.2

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
Общей физики ФТИ
« _____ » 2016 г.

Председатель
учебно-методической комиссии  А.М. Лидер

Рецензент

Старший преподаватель
кафедры ОФ ФТИ НИ ТПУ
Т.Н. Мельникова

ИЗМЕРЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ КАТУШКИ.

Цель работы: ознакомиться с одним из методов измерения и исследования магнитных полей

Приборы и принадлежности: два коротких соленоида, планшет из оргстекла с отверстиями, датчик магнитного поля-измерительная катушка, длинный соленоид, блок питания переменного тока, мультиметр.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Основной закон электромагнитной индукции: ЭДС электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на контур:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Знак минус в правой части закона электромагнитной индукции соответствует *правилу Ленца*: при всяком изменении магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на замкнутый проводящий контур, в контуре возникает индукционный ток такого направления, что его собственное магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток. Поток вектора магнитной индукции или магнитным потоком через произвольную поверхность называется физическая величина, определяемая выражением

$$\Phi = \int_S B_n dS,$$

где B_n – проекция вектора магнитной индукции на направление нормали к площадке \vec{n} . Магнитный поток Φ через плоский контур площадью S в случае однородного магнитного поля $\Phi = BS \cos \alpha$, где α – угол между вектором нормали \vec{n} к плоскости контура и вектором магнитной индукции \vec{B} .

Магнитный поток может изменяться, если:

- 1) изменяется форма контура;
- 2) изменяется угол между нормалью к контуру и вектором индукции магнитного поля;
- 3) изменяется со временем индукция магнитного поля.

Пусть контур, в котором индуцируется ЭДС, состоит не из одного витка, а из N витков, например, представляет собой соленоид. Витки соленоида соединяются последовательно. ЭДС индукции будет равна сумме ЭДС, индуцируемых в каждом из витков в отдельности.

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} (BS \cos \alpha)$$

Так как короткие соленоиды питаются переменным током, их магнитное поле меняется по гармоническому закону

$$B = B_0 \cos \omega t,$$

где B_0 – амплитудное значение модуля вектора индукции магнитного поля, ω – циклическая частота переменного тока, который создает магнитное поле.

Тогда

$$\varepsilon_i = -N \frac{d}{dt} (S \cos \alpha B_0 \cos \omega t) = NB_0 S \omega \cos \alpha \cdot \sin \omega t$$

Амплитудное значение ЭДС индукции

$$\varepsilon_{i\text{амп}} = NB_0 S \omega \cdot \cos \alpha.$$

Мультиметр, используемый в данной работе, измеряет эффективное значение ЭДС индукции.

$$\varepsilon_{i\text{эф}} = \frac{\varepsilon_{i\text{амп}}}{\sqrt{2}} = \frac{B_0 S \omega N \cdot \cos \alpha}{\sqrt{2}}$$

Эффективное значение ЭДС будет максимальным, когда $\alpha = 0$.

$$\varepsilon_{\text{эф.мак}} = \frac{B_0 S \omega N}{\sqrt{2}}. \quad (2)$$

Это позволяет с помощью измерительной катушки определить положение силовых линий магнитного поля в любой области поля. В данной лабораторной работе измерение и исследование переменных магнитных полей осуществляется с помощью измерительной катушки.

Если известна зависимость между максимальной величиной эффективного значения ЭДС и эффективным значением модуля вектора магнитной индукции, изменение которого создает эту ЭДС, то можно найти эффективное значение модуля вектора магнитной индукции в любой области исследуемого магнитного поля.

Установление указанной количественной зависимости $\varepsilon_{\text{эф.мак}}$ от $B_{\text{эф}}$, называется *тарированием* измерительной катушки.

МЕТОДИКА ТАРИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ КАТУШКИ.

В данной лабораторной работе используют магнитное поле длинного соленоида. Если длинный соленоид питается переменным током, то эффективное значение индукции магнитного поля рассчитывается по формуле

$$B_{\text{эф}} = \mu_0 n_0 I_{\text{эф}}, \quad (3)$$

где n_0 – число витков на единицу длины обмотки соленоида, μ_0 – магнитная постоянная.

При проведении тарирования, измерительную катушку помещают в центре длинного соленоида так, чтобы угол между направлением вектора индукции магнитного поля и нормалью к поперечному сечению был равен нулю. Затем измеряют зависимость максимальной величины эффективного значения ЭДС измерительной катушки от эффективного значения переменного тока $I_{\text{эф}}$, питающего длинный соленоид. По формуле (3) рассчитывают значения $B_{\text{эф}}$, соответствующие выбранным $I_{\text{эф}}$. Строят тарировочный график зависимости $\varepsilon_{\text{эф.max}}$ от $B_{\text{эф}}$.

График представляет собой прямую, выходящую из начала координат.

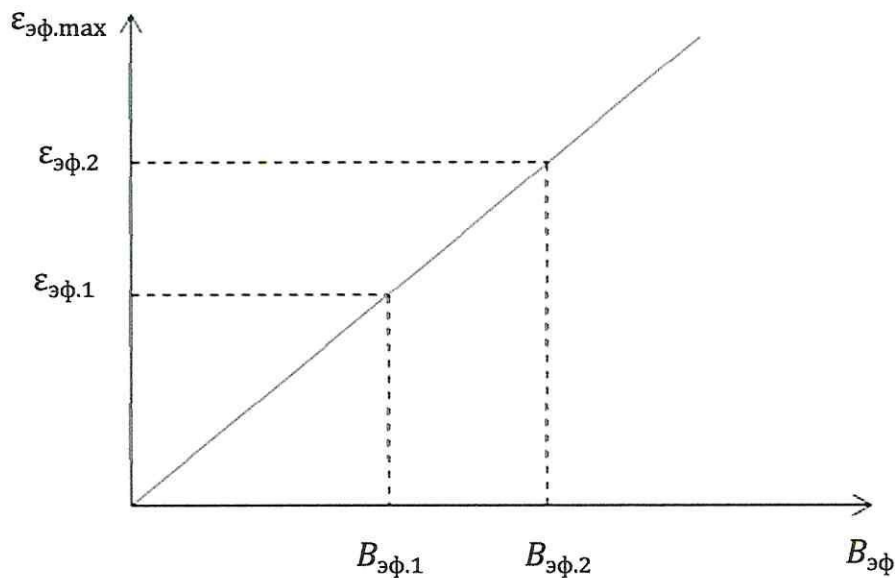


Рис. 1.

Угловой коэффициент прямой равен

$$K = \frac{\varepsilon_{\text{эф.max2}} - \varepsilon_{\text{эф.max1}}}{B_{\text{эф.2}} - B_{\text{эф.1}}} \quad (4)$$

В работе для тарирования используется соленоид конечной длины. Магнитная индукция в центре такого соленоида отличается от магнитной индукции в центре бесконечно длинного соленоида на 2,5 %. Поэтому, при определении реального углового коэффициента K' , необходимо полученный по вышеописанной методике угловой коэффициент K умножить на 1,025.

$$K' = K \cdot 1,025. \quad (5)$$

Определив угловой коэффициент K' для измерительной катушки, можно найти эффективное значение индукции магнитного поля в нужной области магнитного поля по формуле

$$B_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon_{\text{эф. max}}}{K'}. \quad (6)$$

Амплитудное значение индукции магнитного поля

$$B_0 = B_{\text{эф}} \sqrt{2}. \quad (7)$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

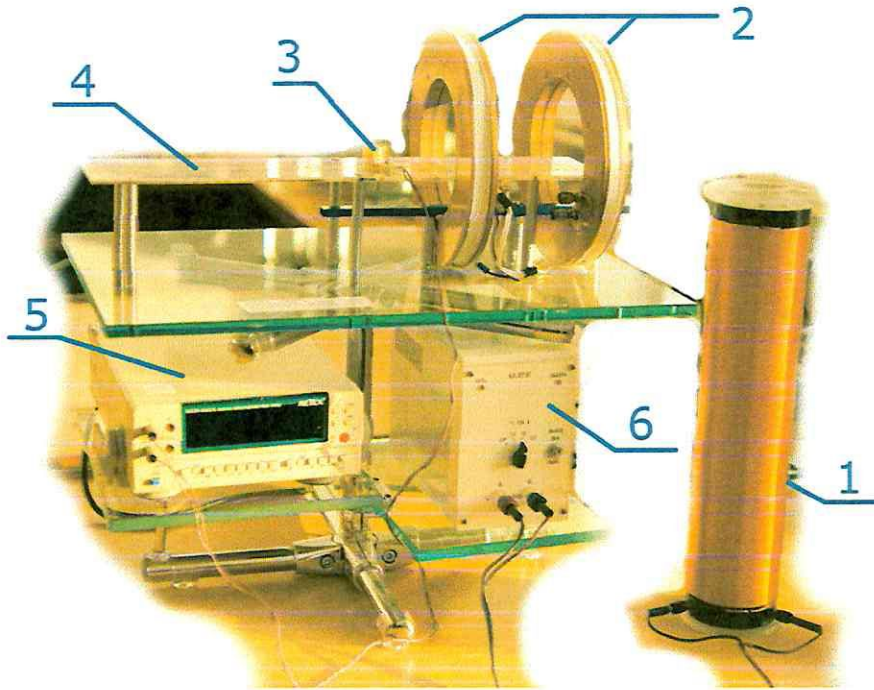


Рис. 2.

1. Длинный соленоид, предназначенный для тарирования измерительной катушки.
2. Два коротких соленоида, магнитное поле которых необходимо измерить и исследовать.
3. Измерительная катушка (датчик).
4. Планшет из оргстекла с отверстиями для фиксации измерительной катушки.
5. Мультиметр (милливольтметр).
6. Блок питания переменного тока.

Соленоид намотан на каркас из виниловой трубы диаметром 90 мм медным проводом диаметром 1,2 мм. Длина катушки составляет 362 мм. Плотность катушки $n_0 = 780$ витков/м. Соотношение длины катушки и диаметра соленоида составляет 4,0. При таком соотношении магнитное поле внутри соленоида на его оси отличается (меньше) от магнитного

поля внутри на оси бесконечно длинного соленоида на 2,5 %. Обмотка соленоида питается от источника переменного тока напряжением 12 В. Ток в обмотке соленоида регулируется с помощью переключателя, находящегося непосредственно на источнике тока через 0,5 А от нуля до 2 А. Измерительная катушка крепится при помощи специального держателя на торцовой части соленоида так, чтобы в процессе тарирования она находилась в центре соленоида на его оси. Вектор индукции магнитного поля внутри соленоида при этом составляет с нормалью к плоскости датчика угол 0° . Таким образом, $\cos\alpha = 1$.

Короткие соленоиды имеют 212 витков медного провода каждый. Диаметр провода намотки $\varnothing = 1,2$ мм. Соленоиды установлены на основании из немагнитного материала и закреплены на нем. Каждый соленоид имеет две выходных клеммы для их подключения к клеммам источника питания. На основании на держателях установлен планшет из оргстекла с отверстиями для измерительной катушки.

Короткие соленоиды питаются от одного и того же источника питания, что и длинный соленоид.

Измерительный датчик помещен в оправу из органического стекла и залит эпоксидной смолой. В оправе имеются выведенные от датчика два штырька $\varnothing = 1,6$ мм. С нижней стороны оправы датчика находится ось, которая вставляется в отверстия панели.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Если датчик помещен в какое-либо отверстие на панели, находящейся в магнитном поле коротких соленоидов, милливольтметр, подключенный к датчику, будет показывать некоторое эффективное значение переменного во времени ЭДС, величина которой, при прочих равных условиях, зависит от угла между нормалью к плоскости и направлением вектора индукции магнитного поля в области нахождения датчика. Поэтому для определения положения силовой линии в исследуемой области поля необходимо датчик поворачивать в отверстия панели вокруг своей оси таким образом, чтобы милливольтметр, подключенный к нему, показал максимальное значение величины ЭДС. Именно это значение ЭДС, необходимо записывать в таблицу. Величина эффективного значения модуля вектора индукции магнитного поля в этой области находится как

$$B_{\text{эф}} = \varepsilon_{\text{эфmax}} / K'. \quad (8)$$

Амплитудное значение:

$$B_0 = B_{\text{эф}} \cdot \sqrt{2}. \quad (9)$$

УПРАЖНЕНИЕ 1

Тарирование измерительной катушки

1. Поместите измерительную катушку в центре длинного соленоида. Измерительная катушка крепится при помощи специального держателя на торцевой части соленоида так, что в процессе тарирования она находится в центре соленоида на его оси.
2. Подключите длинный соленоид к источнику переменного тока.
3. Установите ток $I_{\text{эф.}} = 0,5 \text{ А}$.
4. Поворачивайте измерительную катушку вокруг своей оси таким образом, чтобы милливольтметр показал максимальное значение величины ЭДС.
5. Запишите значение $\varepsilon_{\text{эф. max}}$ в таблицу 1.
6. Измерьте и запишите в таблицу 1 значения ЭДС для токов 1,0; 1,5; 2,0 А.
7. Измените направление изменения тока, уменьшая ток источника от 2 до 0,5 А, и запишите в таблицу 1 значение ЭДС для токов 2,0; 1,5; 1,0 и 0,5 А.
8. Рассчитайте среднее значение ЭДС для каждого тока, и запишите в таблицу 1.
9. Рассчитайте по формуле (3) эффективные значения модуля вектора индукции магнитного поля $B_{\text{эф.}}$ и запишите в таблицу 1.
10. Постройте график зависимости $\varepsilon_{\text{эф. max}}$ от $B_{\text{эф.}}$ и определите угловой коэффициент K прямой по формуле (4).
11. Рассчитайте K' по формуле $K' = K1,025$ и запишите в таблицу 1.

Таблица 1

№, п/п	$I_{\text{эф.}}$	$\varepsilon_{\text{эф.}}, \text{ мВ}$		$\varepsilon_{\text{эф. ср.}}, \text{ мВ}$	$B_{\text{эф.}}, \text{ мТл.}$	$K', \text{ мВ/мТл.}$
		Увеличение тока	Уменьшение тока			
1						
2						
3						
4						

УПРАЖНЕНИЕ 2

Измерение и исследование магнитного поля короткого соленоида с помощью измерительной катушки

1. Подключите к источнику тока катушку, находящуюся ближе к центру.
2. Установите ток 1,5 А. на передней панели источника тока.
3. Вставьте держатель измерительной катушки в отверстие панели, находящегося в центре подключенного короткого соленоида.
4. Поворачивайте измерительную катушку вокруг своей оси, получите максимальное значение ЭДС и запишите в таблицу 2.
5. Выполните пункты 3 и 4 для десяти точек, вставляя измерительную катушку в отверстие через 3 см.

Таблица 2

№ точки	r , см.	$\mathcal{E}_{\text{эф. max.}}$, мВ.	$B_{\text{эф. экс.}}$, мТл.	$B_{\text{теор.}}$, мВ.
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

6. Вычислите эффективные значения модуля вектора индукции магнитного поля по формуле (6) для каждого значения $\mathcal{E}_{\text{эф. max.}}$.
7. Запишите рассчитанные значения в таблицу 2.
8. Рассчитайте теоретические значения индукции магнитного поля по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 INR^2}{2(R^2 + r^2)^{3/2}},$$

где $N = 212$ – число витков короткого соленоида.

$R = 10$ см – радиус короткого соленоида.

r – расстояние от центра катушки до точки, в которой определяется

$B_{\text{эф. теор.}}$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

9. Постройте графики зависимости $B_{\text{эф. экс.}} = f(r)$ и $B_{\text{эф. теор.}} = f(r)$

10. Сравнить теоретическую и экспериментальную зависимость.

УПРАЖНЕНИЕ 3

Измерение и исследование магнитного поля вдоль внешней стороны короткого соленоида

1. Поместите измерительную катушку в соответствующие отверстия на планшете, расположенные вблизи соленоида вдоль линии, перпендикулярной оси короткого соленоида.
2. Поворачивая катушку вокруг своей оси, получите максимальное значение ЭДС для девяти точек.
3. Запишите значения $\varepsilon_{\text{эф. max}}$ в таблицу 3.

Таблица 3

№ точки	$r, \text{см}$	$\varepsilon_{\text{эф. max}}, \text{мВ}$	$B_{\text{эф.}}, \text{мТл.}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			

4. Постройте график зависимости модуля вектора индукции магнитного поля от расстояния от оси соленоида.
5. Объясните, почему магнитное поле вдоль короткой катушки имеет такую зависимость.

УПРАЖНЕНИЕ 4

Исследование магнитного поля в плоскости между двумя короткими соленоидами

1. Подключите катушки к источнику переменного тока ($I_{\text{эф.}} = 1,5\text{A}$), соединив их параллельно между собой.
2. Помещайте датчик в отверстия, расположенные между короткими соленоидами.
3. Получите максимальные значения ЭДС, поворачивая катушку вокруг своей оси, для каждой точки.
4. Запишите значения $\varepsilon_{\text{эф. max}}$ в таблицу 4.
5. Вычислите по формуле (6) эффективное значение модуля вектора магнитной индукции для всех 45 точек и запишите в таблицу 4.
6. Сделайте вывод относительно магнитного поля между короткими соленоидами.

Таблица 4

№		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$\varepsilon_{\text{эф. max}}$									
	$B_{\text{эф.}}$									
2	$\varepsilon_{\text{эф. max}}$									
	$B_{\text{эф.}}$									
3	$\varepsilon_{\text{эф. max}}$									
	$B_{\text{эф.}}$									
4	$\varepsilon_{\text{эф. max}}$									
	$B_{\text{эф.}}$									
5	$\varepsilon_{\text{эф. max}}$									
	$B_{\text{эф.}}$									

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Какие виды магнитных полей (переменные или постоянные) изучаются в данной работе?
2. Какой датчик магнитного поля используется в работе?
3. Может ли такой датчик использоваться для измерения постоянных магнитных полей?

4. Какие датчики существуют для измерения магнитных полей (какие из них измеряют постоянные поля, какие переменные поля, какие и те, и другие)?
5. На каком физическом явлении основан принцип действия измерительной катушки-датчика?
6. Объясните, от каких параметров датчика зависит величина его ЭДС?
7. Для чего необходимо, помещая датчик в отверстие панели, поворачивать его вокруг своей оси?
8. Каким образом можно определять направление силовых линий в той или иной точке поля?
9. Какие по величине магнитные поля можно определять при помощи используемого датчика, и от каких параметров датчика зависит его чувствительность?
10. Для чего нужно тарировать датчик? В чем заключается тарирование датчика? Каким образом проводят тарирование?
11. Какая формула используется для нахождения индукции магнитного поля на оси длинного соленоида?
12. Как определяется коэффициент K при тарировании?
13. Почему для определения индукции магнитного поля, создаваемого не бесконечно длинным соленоидом, используется коэффициент K' , а не K ?
14. Опишите методику измерения индукции магнитного поля коротких соленоидов при помощи измерительной катушки.
15. Найдите соотношение между амплитудным и действительным значением ЭДС в измерительной катушке.
16. Запишите формулу для расчета индукции магнитного поля внутри на оси короткой катушки, проведите расчет и ответьте на вопрос: «Согласуется ли это значение с экспериментальным результатом?»
17. Запишите формулу для расчета индукции магнитного поля на оси короткой катушки на расстоянии R (R – радиус центрального витка катушки) от центра катушки и на большом расстоянии r от центра катушки ($r > R$), проведите расчет и ответьте на вопрос: «Согласуются эти значения с экспериментальным результатом?»
18. Объясните, почему экспериментальные и расчетные результаты могут отличаться друг от друга (если это имеет место)?
19. Запишите формулу для расчета индукции магнитного поля вдоль короткой катушки. Объясните, почему магнитное поле вдоль короткой катушки имеет такую сложную зависимость с минимумом в центре и двумя максимумами на некотором расстоянии от центра.
20. Какая будет наблюдаться зависимость, если измерения проводить вдоль короткой катушки на расстоянии, равном радиусу катушки?

21. Что представляют собой катушки Гельмгольца?
22. Можно ли используемую в работе систему двух коротких катушек считать катушками Гельмгольца?
23. Однородно ли магнитное поле между короткими соленоидами в используемой Вами установке?
24. Определите основные источники ошибок при измерении индукции магнитного поля.
25. Объясните принцип работы датчика Холла, который также используется для измерения индукции магнитного поля.