



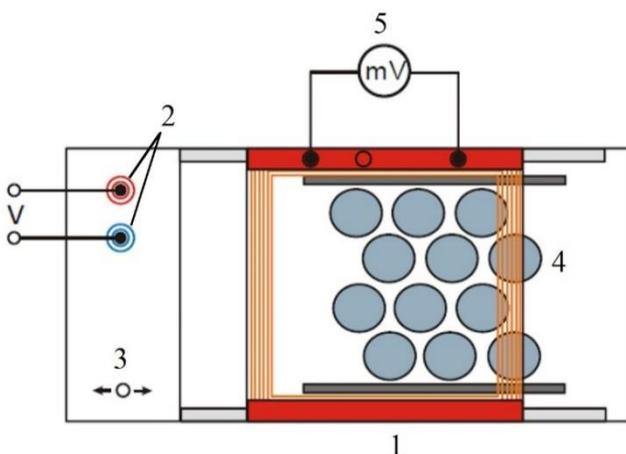
*Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова*

Физический факультет  
Кафедра общей физики

Лабораторный практикум по общей физике  
(электричество и магнетизм)

Буханов В.М., Николадзе Г.М., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э.

**Лабораторная работа 3.2.  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ**



## Цель работы

*Ознакомление с явлением электромагнитной индукции. Экспериментальная проверка следствия закона электромагнитной индукции Фарадея. Освоение методики измерения магнитной индукции по вызываемой ею ЭДС в движущемся контуре.*

## Идея эксперимента

Измеряется ЭДС индукции, возникающая в катушке при ее перемещении в магнитном поле постоянных магнитов катушке.

## Теория

Возникновение ЭДС в контуре, движущемся в магнитном поле, либо в контуре, находящемся в изменяющемся во времени магнитном поле, описывается законом электромагнитной индукции Фарадея:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (1)$$

где  $\Phi_B$  – поток вектора магнитной индукции. Таким образом, любое изменение во времени потока магнитной индукции, пронизывающего контур, приводит к возникновению в нем ЭДС индукции. Поток является интегральной (не локальной) характеристикой магнитного поля:

$$\Phi_B = \int_{\Sigma} \mathbf{B} d\mathbf{S}, \quad (2)$$

где  $\Sigma$  – ограничиваемая контуром поверхность,  $\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукции в данной точке,  $d\mathbf{S}$  – элемент поверхности (направление задается направлением внешней нормали к поверхности  $\Sigma$ ). Поэтому выражение (1) не может дать ответ на вопрос «где локализована ЭДС?», т.е. где именно в контуре располагается «батарейка». Для ответа на этот вопрос следует рассмотреть причины возникновения ЭДС индукции для различных случаев изменения потока магнитной индукции.

1. Магнитная индукция меняется во времени, контур неподвижен.

В этом случае помимо магнитного имеется вихревое электрическое поле. Связь между магнитной индукцией и напряженностью вихревого электрического поля (в вакууме) задается одним из уравнений Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (3)$$

При этом ЭДС индукции в контуре равна циркуляции вектора напряженности вихревого электрического поля по этому контуру:

$$\mathcal{E} = \oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l}. \quad (4)$$

Используя теорему Стокса и (4), получим

$$\oint_{\Sigma} \operatorname{rot} \mathbf{E} d\mathbf{S} = \oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = \mathcal{E}. \quad (5)$$

Из (3) и (5), переставляя операции интегрирования и дифференцирования и используя определение потока вектора магнитной индукции, получим

$$\int_{\Sigma} -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} = \mathcal{E}. \quad (6)$$

Учитывая, что контур с током выбран неподвижным, частная производная по времени равна полной, а (6) совпадает с (1). Таким образом, сторонней силой, приводящей в движение заряды в проводнике, служит вихревое электрическое поле.

2. Случай неизменного во времени магнитного поля и движущегося контура.

Именно этот случай реализуется в данной работе. Рассмотрим квадратный контур со стороной  $l$ , который перемещается со скоростью  $v$ . Для простоты рассмотрим ситуацию, когда контур из области, где магнитное поле отсутствует, перемещается в область однородного магнитного поля с индукцией  $\mathbf{B}$ , ориентированной перпендикулярно плоскости контура. В этом случае за время  $dt$  поток вектора магнитной индукции изменится на величину  $dF_B = B dS = B v l dt$ . Таким образом,

$$\frac{dF_B}{dt} = B v l. \quad (7)$$

При этом, на заряд  $q$  в проводнике, который перпендикулярен направлению движения, будет действовать магнитная составляющая силы Лоренца

$$\mathbf{F} = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}]. \quad (8)$$

Выберем направление обхода контура таким, чтобы направление положительной нормали к поверхности контура совпадало с направлением магнитной индукции. Тогда магнитная

составляющая силы Лоренца будет направлена противоположно направлению обхода  $F_l = -qvB$ , а напряженность поля сторонних сил равна

$$E^* = \frac{F_l}{q} = -vB. \quad (9)$$

Так как в рассматриваемом случае сила Лоренца действует лишь вдоль одной из сторон квадрата, то

$$\mathcal{E} \equiv \oint_L \mathbf{E}^* d\mathbf{l} = E^* l. \quad (10)$$

Подставляя в (10) выражение для напряженности поля сторонних сил (9) и учитывая (8), вновь получаем формулу (1). Таким образом, в случае движущегося контура роль сторонней силы играет магнитная составляющая силы Лоренца.

## Эксперимент

### Экспериментальная установка

Основным элементом экспериментальной установки является индукционный модуль 1000968, внешний вид которого представлен на рис. 1. Индукционный модуль состоит из корпуса индукционного аппарата с направляющими для перемещения каретки (1), каретки с



Рис. 1. Внешний вид индукционного модуля.

индукционной катушкой (2), пластины с сильными постоянными

магнитами для создания однородного магнитного поля (3), ленты привода электромотора (на рисунке не показан) (4), с помощью которой каретка передвигается, мотор подключается к через гнезда подключения (5). Направления движения каретки с индукционной катушкой изменяется с помощью переключателя (6).

Электрическая схема установки представлена на рис. 2. Индукционная катушка с переменным числом витков (2400, 1600, 800) (1) перемещается электромотором, подключенным через гнезда (2) к источнику тока. Направление движения каретки выбирается с помощью переключателя (3). Пластины с сильными постоянными магнитами (4) создают однородное магнитное поле, вызывающее ЭДС индукции в катушке, которая измеряется аналоговым мультиметром (5) в режиме измерений постоянного напряжения по шкале с нулём по центру шкалы.

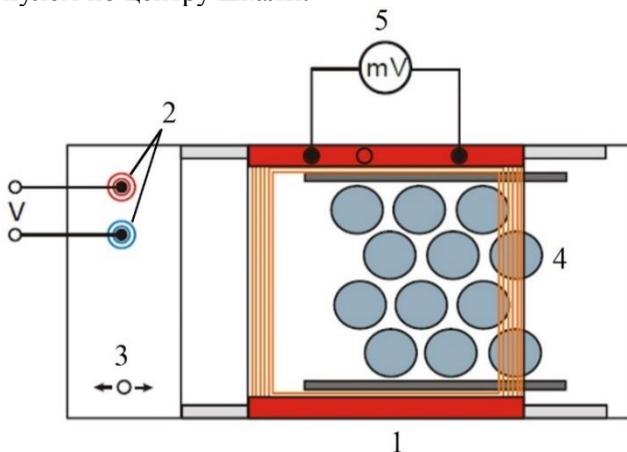


Рис. 2. Электрическая схема установки.

### ***Подготовка к измерениям***

Перед началом выполнения упражнения следует убедиться, что подключена катушка с числом витков 2400 (подводящие провода подключены к крайним клеммам, см. рис. 2), рамка с катушкой находится в крайнем левом положении, а панель с постоянными магнитами (3) (см. рис. 1) расположена в середине измерительной установки.

На аналоговом мультиметре следует установить режим измерений с центральным нулём (т.к. в работе требуется определять не только величину, но и знак ЭДС, генерируемой при движении катушки в магнитном поле постоянных магнитов) и диапазон измерений постоянного напряжения 1 В. В ходе выполнения работы диапазон измерений выбирается таким, чтобы ошибка измерения напряжения была минимальной. Убедитесь, что при покоящейся рамке мультиметр показывает нулевое напряжение.

### *Проведение эксперимента*

#### **Упражнение 1. Изучение зависимости ЭДС индукции от скорости движения рамки**

##### *Измерение*

1. Включите источник напряжения. Установите на его выходе напряжение 2 В.

2. Переключателем (6) (см. рис 1) приведите каретку с катушкой в движение в нужную сторону.

3. Для перемещения катушки слева - направо и справа - налево измерьте с помощью ручного секундомера время прохода катушки мимо риски, нанесенной в центре установки. Запишите измеренные времена в табл. 1.

Таблица 1

**Значения ЭДС индукции в катушке при ее движении в постоянной магнитном поле с различной скоростью (при различном напряжении на моторе)**

№	$U_{ист},$ В	Диапазон шкалы мультиметра	Направление движения каретки					
			Слева–направо			Справа–налево		
			$\Delta t_1,$ с	$U_{11},$ дел	$U_{12},$ дел	$\Delta t_2,$ с	$U_{21},$ дел	$U_{22},$ дел
1	2							
...	...							
10	10							

4. Не меняя напряжение источника, повторите прогон каретки с катушкой в обе стороны, фиксируя при этом *максимальные значения*

напряжений, показываемые мультиметром, и их знак при движении катушки слева –направо и справа-налево. Обратите внимание на последовательность изменения знака регистрируемой ЭДС в этих случаях и характер изменения величины ЭДС. Запишите результаты измерений в табл. 1. Первичные измерения напряжения следует записывать в делениях шкалы, указав в отдельной колонке используемый для данного номера опыта диапазон шкалы.

5. Повторите пп.1–4 для значений напряжения источника от 3 до 10 В с шагом 1 В. Результаты измерений запишите в табл. 3.5.

### Обработка результатов

1. При известной длине каретки  $L = 12,3$  см и измеренному времени прохождения (см. табл. 1) определите скорости  $v_1$  и  $v_2$  движения катушки в обоих направлениях. Результаты запишите в табл. 2.

Таблица 2

### Скорости движения каретки и средние значения ЭДС индукции в катушке при ее движении в постоянной магнитном поле

№	Направление движения каретки									
	Слева–направо					Справа–налево				
	$v_1$ ,	$\varepsilon_{11}$ ,	$\varepsilon_{12}$ ,	$\bar{\varepsilon}_1$ ,	$\sigma_{\varepsilon_1}$ ,	$v_2$ ,	$\varepsilon_{21}$ ,	$\varepsilon_{22}$ ,	$\bar{\varepsilon}_2$ ,	$\sigma_{\varepsilon_2}$ ,
м/с	В	В	В	В	м/с	В	В	В	В	
1										
...										

2. Используя диапазон измерений и значение измеренной ЭДС в делениях шкалы определите максимальные значения ЭДС, зарегистрированные в каждом опыте. Объясните наблюдающуюся зависимость величины и знака ЭДС от времени по мере прохождения катушки над пластиной с магнитами.

3. Усредните измеренные значения ЭДС противоположных знаков для движения катушки в одну сторону ( $\bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2$ ). В качестве величины погрешности измерения ЭДС ( $\sigma_{\varepsilon_1}, \sigma_{\varepsilon_2}$ ) в данном опыте взять максимальное отклонение от найденного среднего. Результаты записать в табл. 2.

4. Постройте графики зависимостей  $\bar{\varepsilon}_1(u_1)$  и  $\bar{\varepsilon}_2(u_2)$ .  
Объясните особенностей полученных зависимостей.

5. Используя МНК, определить наклоны графиков  $A_1$  и  $A_2$  и погрешности их определения  $\sigma_{A_1}$  и  $\sigma_{A_2}$ .

6. Из наклонов графиков  $A_1$  и  $A_2$ , определить значения магнитной индукции поля  $B_1$  и  $B_2$  над пластиной с постоянными магнитами по формуле

$$B_{1,2} = \frac{A_{1,2}}{lN}, \quad (11)$$

где  $l = 130$  мм – поперечный движению размер катушки,  $N = 2400$  – число витков в катушке.

Провести расчеты среднего значения  $B$  и случайной погрешности среднего арифметического по формулам

$$B_{\text{cp}} = \frac{B_1 + B_2}{2},$$
$$S_{B_{\text{cp}}} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_i (B_i - B_{\text{cp}})^2}.$$

**Упражнение 2. Исследование зависимости индукции от числа витков в индукционной катушке.**

#### *Измерение*

1. Установить на источнике напряжение в 6 В.
2. Подключить катушку с числом витков  $N = 2400$  (см. рис. 3).

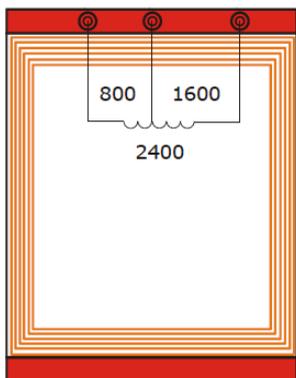


Рис. 3. Схема подключения обмоток катушки.

3. Переключателем (6) (см. рис. 1) приведите каретку с катушкой в движение в нужную сторону.

4. Для перемещений катушки слева – направо и справа – налево измерьте с помощью ручного секундомера время прохода катушки мимо риски, нанесенной в центре установки. Запишите измеренное время в табл. 3.

5. Не меняя напряжение источника, повторите прогон каретки с катушкой в обе стороны, фиксируя при этом максимальные значения напряжений, показываемые мультиметром, и их знак при движении катушки слева – направо и справа-налево. Обратите

внимание на последовательность смены знака регистрируемой ЭДС в этих случаях и характер изменения величины ЭДС. Запишите результаты измерений в табл. 3. Первичные измерения напряжения следует записывать в делениях шкалы, указав в отдельной колонке используемый для данного номера опыта диапазон шкалы. Выполните п. 2-5 трижды.

6. Повторите пп. 1–5 для катушек с числом витков  $N=1600$  и  $N=800$ . Результаты измерений запишите в табл. 3.

Таблица 3

**Значения ЭДС индукции в катушках с различным числом витков при ее движении в постоянной магнитном поле**

№	N, Вит-ки	Диапа- зон шкалы мультиметра	Направление движения каретки					
			Слева – направо			Справа – налево		
			$\Delta t_1$ , с	$U_{11}$ , дел.	$U_{12}$ , дел.	$\Delta t_2$ , с	$U_{21}$ , дел.	$U_{22}$ , дел.
1	2400							
2								
3								
4	1600							

...								
9	800							

### Обработка результатов

1. Для известной длины каретки  $L = 12,3$  см определите по данным измерений времени прохождения (см. табл. 1) скорости  $v_1$  и  $v_2$  движения катушки в обоих направлениях. Результаты запишите в табл. 4.

2. Используя диапазон измерений и значение измеренной ЭДС в делениях шкалы, определите максимальные значения ЭДС, зарегистрированные в каждом опыте. Объясните наблюдавшуюся зависимость величины и знака ЭДС от времени по мере прохождения катушки над пластиной с магнитами.

3. Усредните измеренные значения ЭДС противоположных знаков для движения катушки в одну сторону ( $\bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2$ ). В качестве величины погрешности измерения ЭДС ( $\sigma_{\varepsilon_1}, \sigma_{\varepsilon_2}$ ) в данном опыте взять максимальное отклонение от найденного среднего. Результаты записать в табл. 4.

Таблица 4

### Скорости движения каретки и средние значения ЭДС индукции в катушке при ее движении в постоянной магнитном поле

	Направление движения каретки									
	Слева–направо					Справа–налево				
2400										
1600										

800										

4. По всей совокупности опытов определить средние скорости движения каретки слева-направо и справа-налево ( $v_1$ ,  $v_2$ ) и их погрешности.

5. Постройте графики зависимостей  $\bar{\varepsilon}_1(N)$  и  $\bar{\varepsilon}_2(N)$ . Объясните их особенности.

6. Используя МНК, определить наклона графиков  $C_1$  и  $C_2$  и погрешности их определения  $\sigma_{C_1}$  и  $\sigma_{C_2}$ .

7. По значениям  $C_1$  и  $C_2$  определить величины магнитной индукции поля  $B_1$  и  $B_2$  над пластиной с постоянными магнитами по формуле

$$B_{1,2} = \frac{C_{1,2}}{\bar{v}_{1,2} l}, \quad (12)$$

где  $l = 130$  мм – поперечный движению размер катушки.

8. Вычислите среднее значение  $B$  и случайную погрешность среднего арифметического по формулам

$$B_{\text{cp}} = \frac{B_1 + B_2}{2},$$

$$S_{B_{\text{cp}}} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_i^2 (B_i - B_{\text{cp}})^2}.$$

9. Сравните  $B_i$  со значениями магнитной индукции, полученными в упр. 1.

### Основные итоги работы

*В результате выполнения работы должны быть получены зависимости величины ЭДС от скорости движения катушки и числа ее витков, проверены следствия из закона электромагнитной индукции Фарадея; найдена величина магнитной индукции поля, создаваемого пластиной с постоянными магнитами.*

## Контрольные вопросы

1. Что называется вектором магнитной индукции? Указать размерность и наиболее распространенное буквенное обозначение магнитной индукции.
2. Что называется потоком вектора магнитной индукции? Указать размерность и наиболее распространенное буквенное обозначение потока вектора магнитной индукции.
3. Что называется однородным магнитным полем? Привести примеры модельных систем, в которых магнитное поле является однородным.
4. Что называется электродвижущей силой (ЭДС) индукции. Указать ее размерность и наиболее распространенное буквенное обозначение.
5. Запишите закон электромагнитной индукции Фарадея и указать названия входящих в него величин.
6. Объясните зависимость знака генерируемой ЭДС от направления движения рамки и от ее положения относительно пластины с магнитами.
7. Запишите выражение для силы, действующей на движущийся заряд в магнитном поле (магнитная составляющая силы Лоренца).
8. Запишите закон Ампера для сил, действующих на проводники с током в магнитном поле.
9. Укажите локальные (микроскопические) причины возникновения ЭДС в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея для различных способов изменения суммарного потока вектора магнитной индукции, пронизывающего контур (изменение вектора магнитной индукции со временем, перемещение/деформация контура).
10. Какова локальная (микроскопическая) причина возникновения ЭДС в условиях эксперимента?
11. Запишите теорему о циркуляции для вектора магнитной индукции в вакууме. Привести пример ее использования.
12. Как найти величину и направление вектора магнитной индукции вблизи бесконечной плоскости, по которой течет ток с заданной поверхностной плотностью  $\vec{j}$ ? Сравнить с направлением вектора

магнитной индукции относительно пластины с постоянными магнитами, используемыми в данной работе.

13. Как ориентированы полюса постоянных магнитов в пластине, используемой в работе? Что изменится, если пластину с магнитами перевернуть вверх дном?

### **Литература**

1. *Матвеев А.Н.* Электричество и магнетизм. Учебное пособие. 3-е изд. — СПб: Лань, 2010, §§ 45, 46.
2. *Алешкевич В.А.* Электромагнетизм. — М. Физматлит, 2014, Лекции 16.