



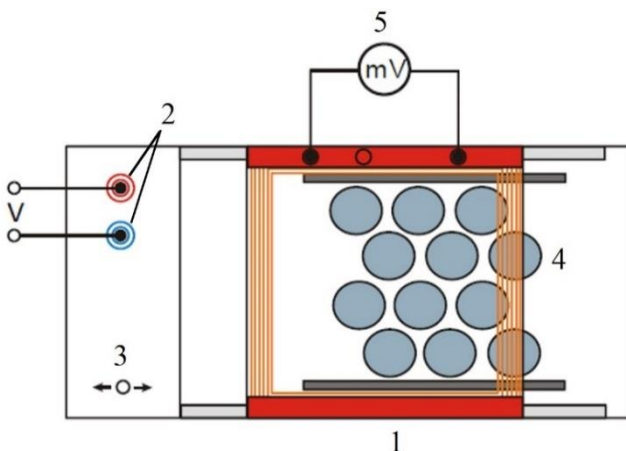
*Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова*

Физический факультет  
Кафедра общей физики

Лабораторный практикум по общей физике  
(электричество и магнетизм)

Буханов В.М., Николадзе Г.М., Салецкий А.М.

### Лабораторная работа 3.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ



## Цель работы

*Ознакомление с явлением электромагнитной индукции. Экспериментальная проверка закона электромагнитной индукции Фарадея. Измерение ЭДС индукции при движении контура через область изменения магнитного поля.*

## Идея эксперимента

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

## Теория

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

$$\mathcal{E} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \quad (1)$$

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  $d\Phi_B = B dS = Bv l dt$ . Таким образом,

$$\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} = Bvl \quad (7)$$

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 (1) индукционного аппарата с направляющими для перемещения



Рис. 1. Внешний вид индукционного модуля.

каретки, каретки с индукционной катушкой (2), пластины (3) с

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

Электрическая схема установки представлена на рис. 2. Индукционная катушка (1) с переменным числом витков (2400, 1600, 800) перемещается электромотором, подключенным через гнезда (2) к источнику тока. Направление движения каретки изменяется с помощью переключателя (3). Пластина с сильными постоянными магнитами (4) создает почти однородное магнитное поле, локализованное в области над пластиной, и генерирует ЭДС индукции в движущейся катушке; ЭДС измеряется аналоговым мультиметром (5) в режиме постоянного напряжения по шкале с нулём в центре шкалы.

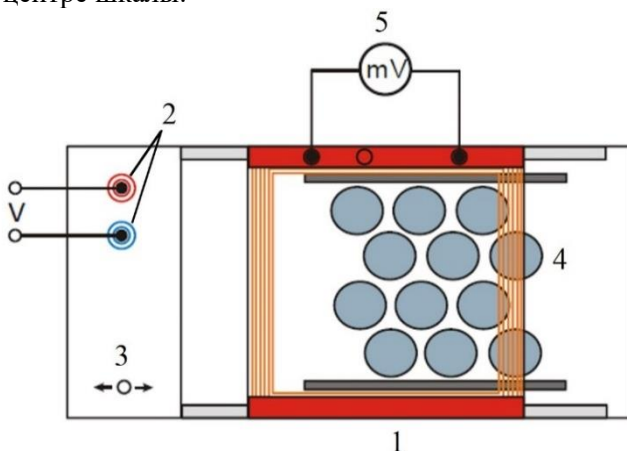


Рис. 2. Электрическая схема установки.

### ***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, переместив переключатель (находится слева внизу) в крайнее верхнее положение (т.к. в работе требуется определять не только величину, но и знак ЭДС, генерируемой при движении катушки в магнитном поле постоянных магнитов). Диапазон измерений постоянного напряжения выбирается таким, чтобы ошибка измерения напряжения была минимальной. Убедитесь, что при покоящейся рамке мультиметр показывает нулевое напряжение в середине шкалы. При отклонении от него нужна корректировка.

### *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. Подключить катушку с числом витков  $N = 2400$  (см. рис. 3).

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

4. Для перемещения катушки слева–направо и справа–налево измерьте с помощью ручного секундомера время прохождения катушки мимо риски, нанесенной в центре пластины с магнитами. 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		
			$\Delta t_1,$	$U_{11},$	$U_{12},$	$\Delta t_2,$	$U_{21},$	$U_{22},$
			с	дел	дел	с	дел	дел

1	2							
...	...							
10	10							

5. При прогоне каретки с катушкой наблюдается следующее. Сначала передняя сторона рамки совпадала с границей области магнитного поля и стрелка была на нуле; после включения движения слева–направо, стрелка отклоняется на некоторое положительное значение  $U_{11}$  при вхождении рамки в область магнитного поля. Это показание остается практически постоянным пока задняя сторона рамки не достигнет границы поля. После ее пересечения рамка оказывается целиком в области однородного поля и показание мультиметра падает до нуля. Пока передняя сторона рамки не достигнет задней границы области магнитного поля, стрелка остается на нуле; далее показание мультиметра меняет знак ( $U_{12}$ ) и остается практически постоянным пока рамка не покинет область магнитного поля и возвращается к нулю вплоть до остановки рамки. Значения  $U_{11}$  и  $|U_{12}|$  вносятся в табл. 1 в делениях шкалы.

6. После остановки, включите движение рамки в направлении справа–налево и повторите всю процедуру измерений (в табл. 1 вносятся соответствующие показания мультиметра  $U_{21}$  и  $|U_{22}|$ ).

7. Обратите внимание на последовательность изменения знака регистрируемой ЭДС в этих случаях и характер изменения величины ЭДС.

8. Повторите пп.1–6 для значений напряжения источника от 3 до 10 В с шагом 1 В. Результаты измерений запишите в табл. 1.

### *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 и внесите их 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 значения измеренных ЭДС в делениях шкалы, определите максимальные значения ЭДС  $\varepsilon_{11}$ – $\varepsilon_{22}$  (в вольтах), зарегистрированные в каждом опыте, и запишите в табл. 2.

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

4. Постройте графики зависимостей  $\bar{\varepsilon}_1(v_1)$  и  $\bar{\varepsilon}_2(v_2)$ . Объясните особенности полученных зависимостей.

5. Используя МНК, определите 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  $A_2$ , определите 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.

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

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

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

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

*Измерение*

1. Установить на источнике напряжение в 6 В.
2. Подключите поочередно катушки с числом витков  $N = 2400, 1600, 800$  (см. рис. 3).

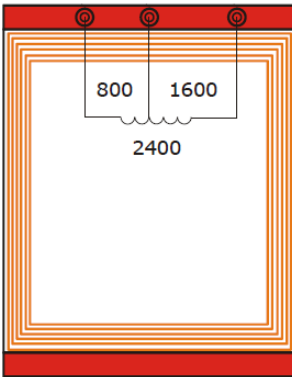


Рис. 3. Схема подключения обмоток катушки.

3. Последовательно приведите каретку с каждой из катушек в движение в нужную сторону переключателем (6) (см. рис. 1).

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 пп. 2-5 трижды.

Таблица 3

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

№	N, Вит- ки	Диапа- зон шкалы мульти метра	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 скорости  $v_1$  и  $v_2$  движения катушки в обоих направлениях по данным измерений времени прохождения (см. табл. 1). 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 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 возьмите максимальное отклонение от найденного среднего. Результаты запишите 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 определите 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

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

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

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. Приведите пример ее использования.
  12. Как найти величину и направление вектора магнитной индукции вблизи бесконечной плоскости, по которой течет ток с заданной поверхностной плотностью  $\vec{j}$ ? Сравните 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.