

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра физики

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
№ 2.10**

**ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ**

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Минск 2000

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.10

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

2.10.1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментально изучить частные случаи основного закона электромагнитной индукции.

2.10.2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Явление электромагнитной индукции состоит в том, что при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, в последнем возбуждается электродвижущая сила индукции. Если проводящий контур замкнутый, то под действием этой ЭДС в нем возникает электрический ток, называемый **индукционным**. Согласно закону Ленца, индукционный ток всегда имеет такое направление, что его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока.

Магнитный поток Φ сквозь поверхность, ограниченную произвольным замкнутым контуром, может изменяться по ряду причин: за счет изменения геометрии контура, изменения его расположения в магнитном поле, вследствие зависимости магнитной индукции от времени. Согласно закону Фарадея, **электродвижущая сила индукции, возникающая в контуре, численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром:**

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.10.1)$$

Уравнение (2.10.1) выражает основной закон электромагнитной индукции в общем виде.

Рассмотрим контур, состоящий из N витков, в котором индуцируется ЭДС. Поскольку витки соединяются последовательно, ЭДС, возбуждаемые в отдельных витках, будут складываться. Поэтому

$$\varepsilon = -\sum_{i=1}^N \frac{d\Phi_i}{dt} = -\frac{d}{dt} \sum_{i=1}^N \Phi_i.$$

Величину $\psi = \sum_{i=1}^N \Phi_i$ называют потокоцеплением или полным магнитным потоком. Если потоки Φ_i , пронизывающие каждый из витков, одинаковы, то $\psi = N\Phi$. Отсюда

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.10.2)$$

Хотя величина ЭДС индукции не зависит от способа изменения магнитного потока, однако механизм ее возникновения при этом оказывается разным. Обратимся сначала к случаю, когда поток изменяется вследствие движения проводящего контура (или изменения его геометрии) в постоянном магнитном поле. Здесь роль сторонних сил, разделяющих разноименные заряды в проводнике, играет магнит-

ная составляющая силы Лоренца \vec{F}_M

$$\vec{F}(\vec{r}) = \vec{F}_3(\vec{r}) + \vec{F}_M(\vec{r}) = q\vec{E}(\vec{r}) + q[\vec{v}, \vec{B}(\vec{r})].$$

Если неподвижный проводник находится в изменяющемся со временем магнитном поле, то механизм возникновения ЭДС оказывается другим. Изменяющееся магнитное поле \vec{B} возбуждает вихревое электрическое поле \vec{E} , под действием которого носители заряда приходят в движение. Таким образом, в неподвижном контуре возникает ЭДС индукции

$$\varepsilon = \oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\int_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Собственное магнитное поле проводника с током I создает полный поток ψ_s через поверхность, ограниченную этим проводником. Согласно закону Био-Савара-Лапласа, индукция поля B пропорциональна току I . Значит, величины ψ_s и I тоже пропорциональны друг другу, т.е.

$$\psi_s = LI, \quad (2.10.3)$$

где L – индуктивность проводника. Величина L зависит от геометрии контура (т.е. от его формы и размеров), а также от магнитных свойств среды, в которой он находится, характеризуемых проницаемостью μ . Однако если среда ферромагнитная, то μ является сложной функцией от тока. Значит, индуктивность проводника оказывается зависящей от величины тока. Формула (2.10.3) остается справедливой и для такого случая.

Если ток в контуре изменяется каким-либо образом, то это приводит к изменению собственного потока ψ_s . В результате в контуре возбуждается ЭДС, называемая электродвижущей силой самоиндукции ε_s . Из выражений (2.10.2) и (2.10.3) следует, что

$$\varepsilon_s = -\frac{d\psi_s}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI) = -\left(L\frac{dI}{dt} + I\frac{dL}{dt}\right).$$

Если среда неферромагнитная и контур не деформируется, то $L = \text{const}$ и

$$\varepsilon_s = -L\frac{dI}{dt}.$$

Под действием ЭДС самоиндукции возникает индукционный ток, который по закону Ленца противодействует изменению тока в цепи: замедляет его возрастание или убывание.

Рассмотрим два контура, расположенных близко друг к другу (рис.2.10.1).

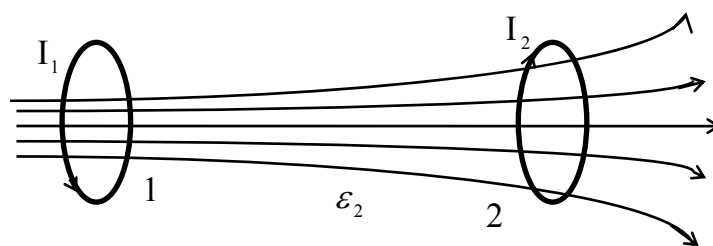


Рис. 2.10.1.

При прохождении электрического тока I_1 по контуру 1 в каждой точке простран-

ства создается магнитное поле. Индукция этого поля пропорциональна току I_1 . Поэтому магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром 2, также пропорционален I_1 : $\psi_{21} = L_{21} I_1$, где коэффициент пропорциональности L_{21} называется коэффициентом взаимной индукции. При изменении тока I_1 меняется также магнитный поток ψ_{21} и в контуре 2 индуцируется ЭДС:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\psi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}.$$

Аналогично при протекании в контуре 2 тока I_2 создается магнитное поле и поверхность, ограниченную контуром 1, пронизывает магнитный поток $\psi_{12} = L_{12} I_2$. При изменении тока I_2 индуцируется ЭДС в контуре 1:

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\psi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}.$$

Говорят, что между этими контурами существует магнитная связь, само же явление возникновения ЭДС в одном из проводников вследствие изменения тока в другом называют взаимной индукцией. Коэффициенты L_{12} и L_{21} называются коэффициентами взаимной индукции. Их величина зависит от формы, размеров и взаимного расположения проводников, а также от магнитной проницаемости среды. В отсутствие ферромагнетиков $L_{12} = L_{21}$. На явлении взаимной индукции основано действие трансформаторов.

В работе предлагается проверить на опыте некоторые частные случаи явления электромагнитной индукции. Схема установки приведена на рис. 2.10.2. Изменяющееся магнитное поле в длинном соленоиде L_0 возбуждает вихревое электрическое поле, под действием которого носители заряда в катушках $L_1 - L_5$ приходят в движение.

Таким образом, в этих катушках возникает ЭДС индукции, амплитудное значение которой измеряется электронным осциллографом (рис.2.10.2.). Кнопочный переключатель (П) дает возможность подключить одну из секций $L_1 - L_5$ (число витков в каждой секции катушки одинаково).

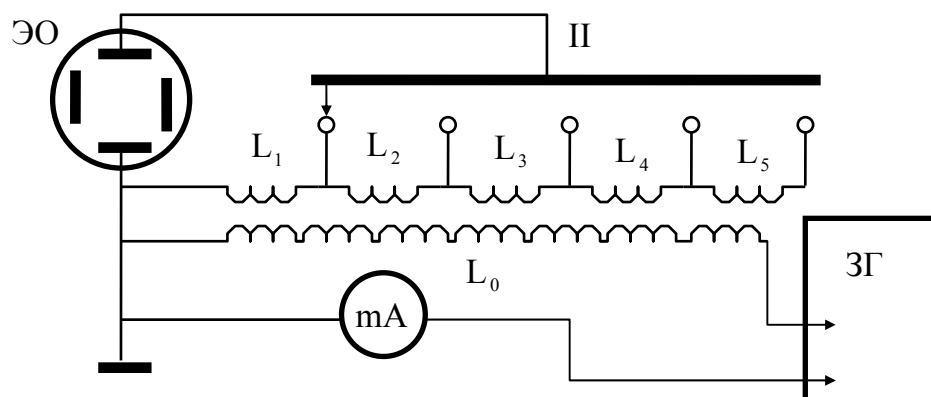


Рис. 2.10.2

Согласно закону электромагнитной индукции

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt},$$

где ε_2 – ЭДС индукции, возникающая во вторичной катушке; Φ_{21} – магнитный поток пронизывающий вторичную катушку; I_1 – ток, текущий в первичной катушке и создающий магнитное поле.

Так как в катушке L_0 течет переменный ток I_1 , изменяющийся по закону

$$I_1 = I_{01} \sin \omega t,$$

то

$$\varepsilon_2 = -L_{21} I_{01} \omega \cos \omega t = -\varepsilon_{02} \cos \omega t.$$

Амплитудное значение тока во вторичной цепи

$$I_{02} = \frac{\varepsilon_{02}}{R} = \frac{L_{21} I_{01} \omega}{R},$$

где R – сопротивление вторичной цепи.

Следовательно,

$$L_{21} = \frac{\varepsilon_{02}}{\omega I_{01}} = \frac{\varepsilon_{02}}{2\pi \nu I_{01}}, \quad (2.10.4)$$

где ε_{02} – ЭДС, определяемая с помощью осциллографа.

Наличие переключателя "Гн, Осц." дает возможность катушкам поменяться ролями (рис. 2.10.3). Звуковой генератор (ЗГ) подключается к одной из катушек $L_1 - L_5$, а осциллограф к соленоиду L_0 . При этом коэффициент взаимной индукции находят по формуле

$$L_{12} = \frac{\varepsilon_{01}}{\omega I_{02}} = \frac{\varepsilon_{01}}{2\pi \nu I_{02}}. \quad (2.10.5)$$

Рассчитав коэффициент взаимной индукции, легко убедиться в справедливости формулы

$$\frac{L_{12}}{L_{21}} = 1. \quad (2.10.6)$$

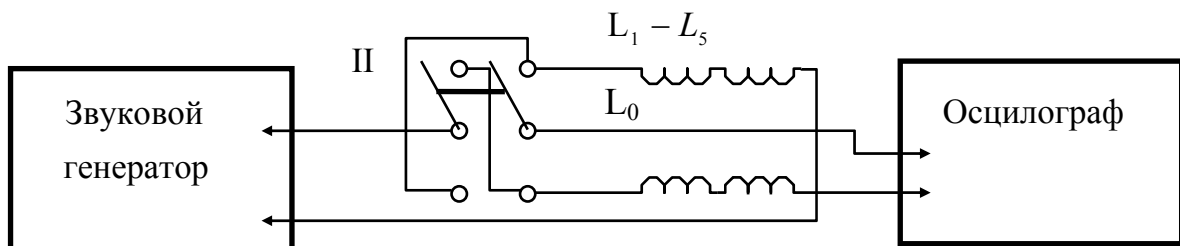


Рис. 2.10.3

2.10.3 ЗАДАНИЕ

1. Изучить зависимость ЭДС индукции от числа витков во вторичной цепи.

Для этого подключить длинный соленоид L_0 к выходу звукового генератора кнопка "Гн, Осц." отжата. Постепенно увеличивая число секций вторичной катушки, последовательно нажимая и отпуская кнопки $L_1 - L_5$. Не попускается одновременное нажатие двух и более кнопок. Измерять величину ЭДС индукции электронным осциллографом, при этом силу тока, проходящего по соленоиду (ручка Рег. выхода генератора), поддерживать постоянной. Величину ЭДС индукции определить по формуле $\varepsilon = l_y \delta_y$, где l_y – величина исследуемого сигнала на экране осциллографа в делениях, δ_y – чувствительность осциллографа ("ВОЛЬТ/дел."), определяемая по передней панели осциллографа.

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 2.10.1.

Таблица 2.10.1

K , число секций	l_y , дел	ε , В
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

Построить график зависимости $\varepsilon = f(K)$.

2. Изучить зависимость ЭДС индукции от частоты переменного тока.

Для этого изменяйте частоту переменного тока, с помощью звукового генератора. ЭДС индукции определяйте на одной из секции $L_1 - L_5$ вторичной катушки (рис. 2.10.2). Измерения величины ЭДС проводить, как в п.1. Результаты измерений и вычислений записать в табл. 2.10.2.

Таблица 2.10.2

№	ν , Гц	l_y , дел	ε , В
1.			
2.			
...			

Построить график зависимости $\varepsilon = f(\nu)$.

3. Проверить независимость коэффициента взаимной индукции от частоты генератора.

Подать напряжение с генератора на соленоид L_0 , кнопка "Гн, Осц." отжата, а на одной из секций вторичной катушки (L_4 или L_5) определить ЭДС индукции с помощью осциллографа. Микроамперметр измеряет ток через соленоид I_0 . Используя формулу (2.10.4) определить L_{21} для трех различных частот.

Затем подать напряжение с генератора на ту же секцию вторичной катушки нажать кнопку "Гн, Осц." и снять показания ЭДС на соленоиде, необходимые для вычисления L_{12} по формуле (2.10.5). Микроамперметр измеряет ток проходящей через выбранную катушку.

Результаты измерений и вычислений записать в табл. 2.10.2.

Таблица 2.10.3

	$I_1 =$, mA	$I_2 =$, mA	
--	--------------	--------------	--

№	ν , Гц	ε_2 , В	L_{21} , Гн	ε_1 , В	L_{12} , Гн	L_{21}/L_{12}
1.						
2.						
3.						

4. Проверить независимость коэффициента взаимной индукции от силы тока, создающего магнитное поле.

Подать, как и в п. 3, напряжение с генератора на соленоид L_0 , а на одной из секций вторичной катушки определить ЭДС индукции с помощью осциллографа (рис. 2.10.3). Используя формулу (2.10.4) определить L_{21} для трех различных значений тока.

Затем подать напряжение с генератора на ту же секцию вторичной катушки и снять показания ЭДС на соленоиде, необходимые для вычисления L_{12} по формуле (2.10.5).

Результаты измерений и вычислений записать в табл. 2.10.3.

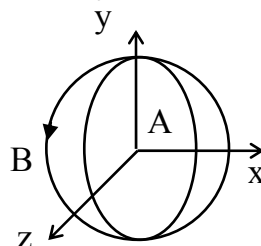
Таблица 2.10.3

№	$\nu =$, Гц						L_{21}/L_{12}
	I_1 , мА	ε_2 , В	L_{21} , Гн	I_2 , мА	ε_1 , В	L_{12} , Гн	
1.							
2.							
3.							

5*. Измерить ЭДС индукции на последней секции K_5 при включении ее в противоположном направлении. Проанализировать полученный результат.

2.10.4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими могут быть причины изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром?
2. Сформулируйте основной закон электромагнитной индукции Фарадея. Каким уравнением он записывается?
3. Какие механизмы возникновения ЭДС индукции вы знаете?
4. Каким уравнением выражается ЭДС самоиндукции? Выведите его.
5. Объясните явление взаимной индукции.
6. Два круговых проводника расположены перпендикулярно друг к другу. Будет ли в проводнике А возникать индукционный ток при изменении тока в контуре В?



7. Поясните принцип работы лабораторной установки.
8. Каков механизм возникновения ЭДС индукции в контуре, содержащем ка-

тушки $L_1 - L_5$ (рис.2.10.2)?

Литература:

1. Савельев И.В. Курс общей физики. -М.: Наука, 1988, т.2 стр. 174-180, 182-188.
2. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М.: Высш. школа, 1983. стр. 195-211.
3. Калашников С.Г. Электричество. -М.: Наука, 1970. стр. 208-213; 219-222.