

Цель работы: изучить явление взаимной индукции на примере двух коаксиально расположенных катушек индуктивности.

Задача: определить коэффициент взаимной индукции двух катушек индуктивности, исследовать зависимость коэффициента взаимной индукции от взаимного расположения катушек индуктивности и от частоты подаваемого напряжения.

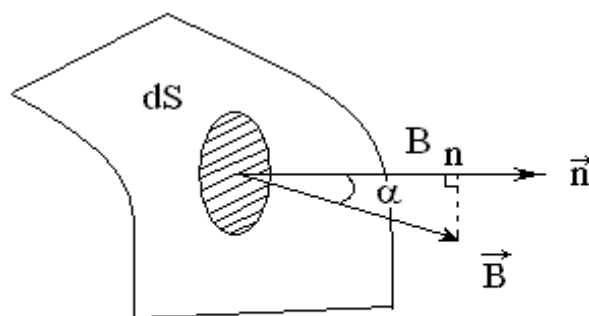
Приборы и принадлежности: кассета ФПЭ – 05, генератор сигналов синусоидальной формы, двухлучевой электронный осциллограф.

ВВЕДЕНИЕ

Потоком вектора \vec{B} магнитной индукции (магнитным потоком) сквозь малую поверхность dS называется физическая величина

$$d\Phi = \vec{B} d\vec{S} = B_n dS = B dS \cos(\vec{B}, \vec{n}),$$

где $d\vec{S} = \vec{n} dS$, \vec{n} - единичный вектор нормали к площадке dS , B_n - проекция вектора \vec{B} на направление нормали.



Магнитный поток сквозь произвольную поверхность S :

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B_n dS. \quad (1)$$

Если магнитное поле однородно, а поверхность S плоская, то

$$\Phi = B_n dS = B S \cos(\vec{B}, \vec{n}) = B S \cos \alpha, \quad (2)$$

где α - угол между векторами \vec{B} и \vec{n} (рис.1).

Тогда согласно закону электромагнитной индукции (закону Фарадея) в любом замкнутом проводнике контура при изменении магнитного потока, охватываемого этим контуром, возникает ЭДС (электродвижущая сила) индукции:

$$\varepsilon_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (3)$$

которая пропорциональна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока Φ . Знак минус соответствует правилу Ленца: при всяком изменении магнитного потока сквозь поверхность, охватываемую контуром, в контуре возникает индукционный ток такого направления, что его собственное магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызвавшему индукционный ток.

Рассмотрим скорость изменения магнитного потока:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt}(BS \cos \alpha) = \frac{dB}{dt}(S \cos \alpha) + \frac{dS}{dt}(B \cos \alpha) + \frac{d(\cos \alpha)}{dt}(BS) \quad (4)$$

Несущественно, чем вызвано изменение потока – деформацией контура, его перемещением в магнитном поле или изменением самого поля с течением времени, то есть при выполнении любого из трёх условий в контуре возникает ЭДС индукции. Рассмотрим последний случай, когда меняется магнитное поле, то есть $\frac{dB}{dt} \neq 0$. Так как магнитное поле создаётся контуром с током, то по закону

Био-Савара-Лапласа индукция магнитного поля зависит от тока, то есть $B = B(I)$ – магнитная индукция – функция тока, то и магнитный поток Φ прямо пропорционален току I в контуре:

$$\Phi = LI, \quad (5)$$

где L – коэффициент пропорциональности, называемый индуктивностью контура, его величина зависит от геометрических размеров контура и магнитных свойств той области пространства, в которой находится контур.

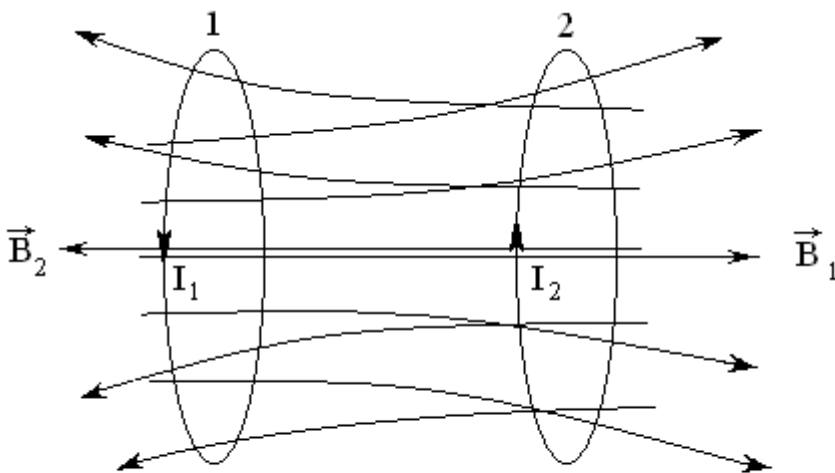


Рис.2. Магнитные поля двух контуров.

Возьмём два контура 1 и 2, близко расположенные друг к другу (см. рис.2).

В контуре 1 ток I_1 создаёт через контур 2 полный магнитный поток:

$$\Phi_{21} = M_{21} I_1 \quad (6)$$

При изменении силы тока I_1 магнитный поток сквозь контур 2 изменяется, следовательно, в нём индуцируется ЭДС:

$$\varepsilon_{инд2} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{dI_1}{dt}. \quad (7)$$

Если поменять местами контуры 1 и 2 и повторить все предыдущие рассуждения, то получим магнитный поток через контур 1 $\Phi_{12} = M_{12} I_2$ и ЭДС

$$\varepsilon_{инд1} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M_{12} \frac{dI_2}{dt}. \quad (8)$$

Контуры 1 и 2 – связанные; явление возникновения ЭДС в одном из контуров при изменениях силы тока в другом называется взаимной индукцией. Коэффициенты пропорциональности M_{21} и M_{12} называются коэффициентами взаимной индукции контуров. Они зависят от формы, размеров и взаимного расположения контуров, а также от магнитной проницаемости среды. В отсутствие ферромагнетика $M_{21} = M_{12}$.

Единицей измерения индуктивности и взаимной индуктивности является генри (Гн). Индуктивностью в 1 Гн обладает контур, магнитный поток через который равен 1 Вб при токе 1 А.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В данной работе определяют взаимную индуктивность двух катушек (длинной катушки L_1 и короткой катушки L_2 , которую надевают на катушку L_1 и могут перемещать вдоль её оси). Обе катушки размещены внутри корпуса блока ФПЭ-05; с помощью переключателей $П_1$, $П_2$ и выходных клемм катушки могут быть подключены к генератору синусоидального напряжения и осциллографу. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 3. Питание катушки L_1 осуществляется от генератора, напряжение

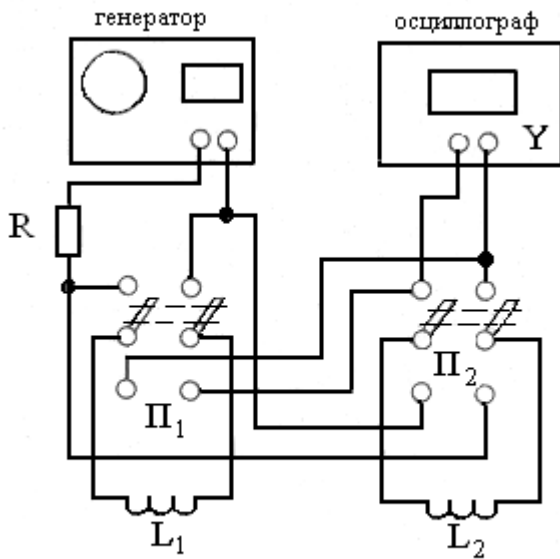


Рис.3. Схема установки.

$$U = U_0 \cos \omega t \quad (9)$$

с которого подаётся через резистор сопротивлением R . Сопротивление R установлено в блоке ФПЭ-О5, $R = 10^4$ Ом и удовлетворяет условию

$$R \gg \sqrt{R_1^2 + (L_1 \omega)^2}, \quad (10)$$

где L_1 – индуктивность катушки L_1 , R_1 – её активное сопротивление, ω – циклическая частота синусоидального напряжения на катушке индуктивности

L_1 . В этом случае силу тока, протекающего через катушки L_1 , можно определить по формуле

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \cos \omega t = I_{01} \cos \omega t. \quad (11)$$

Переменный ток в катушке L_1 создаёт ЭДС индукции в катушке L_2 :

$$\varepsilon_2 = -M_{21} \frac{dI_1}{dt} = -M_{21} \frac{U_0}{R} \omega \sin \omega t. \quad (12)$$

Для измерения ε_2 в данной работе используется осциллограф. Амплитуда ЭДС индукции

$$\varepsilon_{02} = M_{21} \frac{U_0}{R} \omega = M_{21} \frac{U_0}{R} 2\pi \nu, \quad (13)$$

где ν – частота сигнала генератора. Таким образом, имеем

$$M_{21} = \frac{\varepsilon_{02} R}{2\pi \nu U_0}. \quad (14)$$

Если поменять местами катушки L_1 и L_2 , то можно определить

$$M_{12} = \frac{\varepsilon_{01} R}{2\pi \nu U_0}. \quad (15)$$

Вместо перестановки катушек используется простая схема переключения: переключатели Π_1 и Π_2 нужно перевести в противоположное положение (пере-

ключатель Π_1 подключает к катушке L_2 либо генератор, либо осциллограф, переключатель Π_2 обеспечивает аналогичное подключение к катушке L_1).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Изучить установку для изучения взаимной индукции. Включить её в сеть 220 В и дать прогреться в течении 3-5 минут.

УПРАЖНЕНИЕ 1.

ИЗМЕРЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ M_{21} И M_{12} И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ КАТУШЕК.

1. С помощью кабеля подключить выход генератора с входом Y осциллографа. Ручкой изменения выходного напряжения подать на осциллограф сигнал амплитудой 1-2 В, а частоту – в пределах 30 – 100 кГц. Амплитуду сигнала на осциллографе измерить с помощью масштабных делений на экране, а затем умножить на коэффициент отклонения луча по вертикали. Далее установленное значение напряжения в упражнении 1 не менять!
2. Отключить кабель от осциллографа и подключить приборы, как показано на рис.4. С помощью переключателей Π_1 и Π_2 установленное напряжение подать на катушку L_1 , а ЭДС с катушки L_2 на осциллограф.
3. Установить подвижную катушку L_1 в крайнее положение. Перемещая её в противоположное крайнее положение через каждый сантиметр, запишите значения ЭДС магнитной индукции \mathcal{E}_{02} в цепи катушки L_2 , измеренные с помощью осциллографа (см. п. 1).

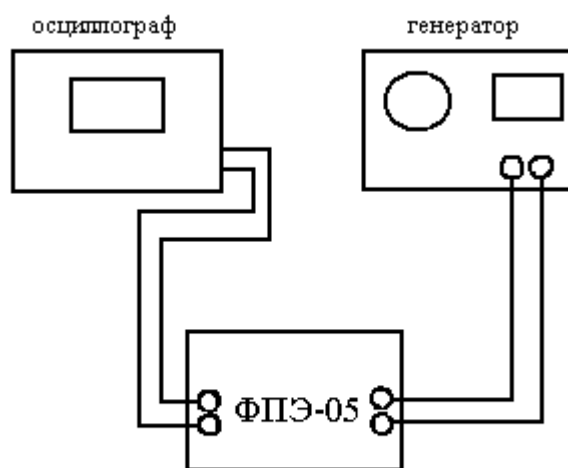


Рис.4.Блок-схема установки.

- По формуле (14) рассчитать M_{21} . Данные измерений и вычислений занести в таблицу 1.
- С помощью переключателей Π_1 и Π_2 поменяв местами катушки L_1 и L_2 , повторить измерения по п. 3–4. M_{12} рассчитать по формуле (15).
- Построить графики зависимости M_{21} и M_{12} как функции координаты Z (Z – расстояние между центрами катушек L_1 и L_2).

Таблица 1.

Z , см	ε_{02} , В	M_{21} , Гн	Z , см	ε_{01} , В	M_{12} , Гн

$U_0 =$ В, $\nu =$ Гц

УПРАЖНЕНИЕ 2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС И M_{21} ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТ ГЕНЕРАТОРА.

- Поставить катушку L_2 в среднее положение относительно катушки L_1 .
- Установить амплитуду напряжения генератора по указанию преподавателя (например, 2 В), (см. упр.1, п.1).
- Изменяя частоту генератора от 5 до 30 кГц, снять зависимость амплитуды ЭДС индукции ε_{02} от частоты подаваемого напряжения (не менее 10 точек).
- По формуле (14) рассчитать M_{21} . Данные измерений и вычислений занести в таблицу 2.
- По данным таблицы 2 найдите среднее значение M_{21} .

Таблица 2.

ν , Гц	
ε_{02} , В	
M_{21} , Гн	

$U_0 = 2$ В, $R = 10^4$ Ом

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Сформулируйте закон электромагнитной индукции и правило Ленца.
2. В чём состоит явление взаимной индукции? От чего зависит взаимная индуктивность?
3. На замкнутом железном сердечнике с магнитной проницаемостью μ намотаны две катушки с числом витков N_1 и N_2 . Вывести формулу для взаимной индуктивности, если длина сердечника l , а площадь поперечного сечения S .
4. Привести примеры применения явления взаимной индукции.
5. Как следует расположить две круглые плоские катушки, чтобы их взаимная индуктивность была максимальна? минимальна (не разнося их на большое расстояние)?
6. Если у соленоида имеется железный сердечник, будет ли его индуктивность L постоянной?
7. Два соленоида обладают одинаковыми длиной и площадью поперечного сечения. Обмотки обоих соленоидов плотно намотаны, но у одного более толстым проводом, чем у другого. У какого из соленоидов будет больше индуктивность?
8. Возникает ли индукционный ток в проводящей рамке, поступательно движущейся в однородном магнитном поле?
9. Покажите, что закон Фарадея есть следствие закона сохранения энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Практикум по физике. Электричество и магнетизм. Под ред. Ф.А.Николаева.-М.: Высшая школа, 1991.-151 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики.-М. :Высшая школа, 1997.-542 с.
3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.-М.: Наука, 1985.-512 с.