

МГТУ им. Н.Э.Баумана

Баландина Л. И.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ.

Методические указания к лабораторной работе Э-12 по курсу общей физики.

Под ред. В.Н. Корчагина.

Москва, 1990.

Рассматриваются методы определения магнитной индукции на оси соленоида, ЭДС индукции, взаимной индуктивности двух соосных катушек в отсутствие ферромагнетиков и при их наличии. Предназначены для студентов второго курса всех специальностей.

Цель работы - изучить явление электромагнитной индукции, распределение магнитного поля вдоль оси соленоида и исследовать зависимость взаимной индуктивности двух цилиндрических катушек от их взаимного расположения.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Явление электромагнитной индукции было открыто Фарадеем в 1831 г. В замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток, который называют индукционным. Появление индукционного тока свидетельствует о том, что в контуре действует электродвижущая сила индукции. Правило, определяющее направление ЭДС индукции, сформулировано Ленцем - индукционный ток направлен так, что создаваемое им поле препятствует изменению магнитного потока. ЭДС индукции \mathcal{E} не зависит от способа, которым осуществляется изменение магнитного потока Φ , и определяется только скоростью изменения магнитного потока:

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

Формула (1) представляет собой закон электромагнитной индукции.

Явление электромагнитной индукции наблюдается во всех случаях, когда изменяется магнитный поток, пронизывающий проводящий контур. В частности, этот поток может создаваться током, текущим в самом рассматриваемом контуре. При изменении тока изменяется поток через контур и, следовательно, в контуре индуцируется ЭДС. Это явление называется самоиндукцией. Магнитный поток через контур в отсутствие ферромагнетиков вблизи контура пропорционален току i в контуре:

$$\Phi = L \cdot i \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью контура. В СИ индуктивность измеряется в генри (Гн). Индуктивность какого-либо контура зависит от его формы и размеров, а также от магнитных свойств окружающей среды.

Подставив в закон электромагнитной индукции (1) соотношение (2), получим выражение для ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E} = -\frac{d(L \cdot i)}{dt} = -\left(L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \right) \quad (3)$$

Если контур жесткий и поблизости от него нет ферромагнетиков, то индуктивность - величина постоянная. Тогда выражение (3) принимает вид

$$\mathcal{E} = -L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

Рассмотрим теперь два неподвижных контура 1 и 2 с токами (рис.1), расположенные близко друг к другу. Магнитное поле, создаваемое током i_1 первого контура, изображено графически сплошными линиями. Как видно из рисунка, часть линий индукции магнитного поля тока i_1 проходит через контур 2. С другой стороны, ток второго контура создает магнитное поле, линии индукции которого пронизывают контур 1. В этом случае между контурами 1 и 2 сущест-

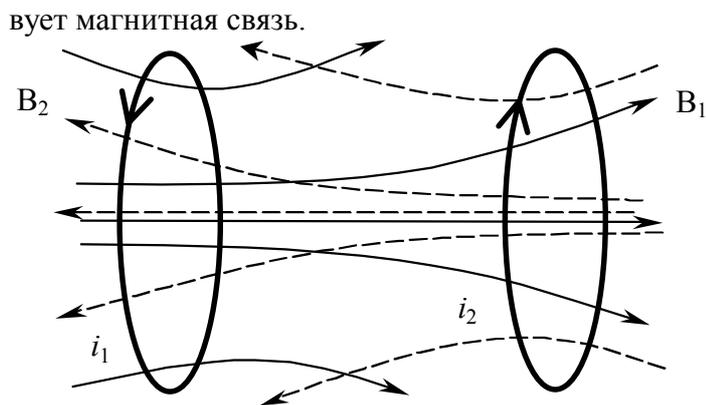


Рис.1

Наличие магнитной связи между контурами проявляется в том, что при изменении силы тока в одном из контуров в другом возникает ЭДС индукции. Это явление называется взаимной индукцией.

Если в контуре 1 течет ток i_1 , то создаваемый им магнитный поток Φ_{21} через контур 2 в отсутствие ферромагнетиков вблизи контуров пропорционален току i_1 :

$$\Phi_{21} = L_{21} i_1 \quad (5)$$

При изменении тока в первом контуре будет изменяться поток Φ_{21} и, согласно закону электромагнитной индукции Фарадея,

во втором контуре возникнет ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{di_1}{dt}. \quad (6)$$

Очевидно, что при изменении тока i_2 во втором контуре, в первом контуре, индуктивно связанном со вторым контуром, индуцируется ЭДС

$$\mathcal{E}_1 = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{di_2}{dt}. \quad (7)$$

Коэффициент пропорциональности L_{12} или L_{21} называется взаимной индуктивностью контуров. Значения коэффициентов L_{12} и L_{21} зависят от формы, размеров и взаимного расположения контуров, а также от магнитной проницаемости окружающей контуры среды. Взаимная индуктивность измеряется в тех же единицах, что и индуктивность.

Можно показать, что для любых двух контуров в отсутствие ферромагнетиков взаимные индуктивности равны друг другу

$$L_{12} = L_{21}. \quad (8)$$

Пусть в контуре 1 установился ток i_1 , создаваемый источником тока. В контуре 2 тока нет. Предположим, что ток равномерно уменьшается до нуля. Тогда вследствие магнитной связи в контуре 2 возникнет ЭДС взаимной индукции \mathcal{E}_2 и появится ток i_2 . Работа тока i_2 за время dt равна

$$dA_2 = \mathcal{E}_2 i_2 dt = -L_{21} \frac{di_1}{dt} i_2 dt = -L_{21} i_2 di_1. \quad (9)$$

Если L_{21} не зависит от тока, что возможно в отсутствие ферромагнетиков, то, проинтегрировав выражение (9) по току, получим работу, совершаемую током второго контура за все время, в течение которого происходит исчезновение магнитного поля, создаваемого током первого контура

$$A_2 = -\int_{i_1}^0 L_{21} i_2 di_1 = L_{21} i_1 i_2. \quad (10)$$

Совершение этой работы сопровождается исчезновением магнитного поля. Поэтому магнитное поле является носителем энергии, за счет которой и совершается работа. Эта энергия связанных контуров получила название взаимной энергии двух токов

$$W_{21} = L_{21} i_2 i_1. \quad (11)$$

Если такое же магнитное поле создать током второго контура, то, проведя аналогичные рассуждения, получим

$$A_1 = L_{12} i_1 i_2. \quad (12)$$

Но произведенная работа в обоих случаях должна быть одинакова. Отсюда следует, что $L_{12} = L_{21}$. При наличии ферромагнитной среды взаимные индуктивности L_{12} и L_{21} не равны друг другу так как они зависят не только от формы, размеров и взаимного расположения рассматриваемых

проводящих контуров, но также и от силы токов в них. Поток Φ_{12} и Φ_{21} не пропорциональны токам i_1 и i_2 . Однако формально соотношение (5) распространяют и на случай ферромагнетиков полагая при этом, что зависимость L_{21} от i_1 известна и, следовательно, каждому значению i_1 соответствует определенное значение L_{21} .

Если среда ферромагнитная, то по закону электромагнитной индукции Фарадея ЭДС взаимной индукции, возбуждаемая во втором контуре переменным магнитным полем первого контура, определяется по формуле

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d(L_{21} \cdot i_1)}{dt} = -\left(L_{21} \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dL_{21}}{dt} \right). \quad (13)$$

Так как $L_{21} = L_{21}(i_1)$, то

$$\frac{dL_{21}}{dt} = \frac{dL_{21}}{di_1} \frac{di_1}{dt}.$$

Тогда

$$\mathcal{E}_2 = -\left(L_{21} + i_1 \frac{dL_{21}}{di_1} \right) \frac{di_1}{dt}. \quad (14)$$

При наличии в контуре 2 переменного тока i_2 в контуре 1 возникает ЭДС

$$\mathcal{E}_1 = -\left(L_{12} + i_2 \frac{dL_{12}}{di_2} \right) \frac{di_2}{dt}. \quad (15)$$

Обратим внимание, что

$$L_{21} + i_1 \frac{dL_{21}}{di_1} = \frac{d\Phi_{21}}{di_1}, \quad (16)$$

$$L_{12} + i_2 \frac{dL_{12}}{di_2} = \frac{d\Phi_{12}}{di_2}. \quad (17)$$

Это так называемые динамические взаимные индуктивности, в то время как L_{12} и L_{21} - статические взаимные индуктивности.

В справедливости равенства (8) и зависимости коэффициента взаимной индуктивности от взаимного расположения контуров с током можно убедиться экспериментально в случае двух проводников, выполненных, например, в виде соосных цилиндрических катушек разной длины.

Одна из катушек достаточно длинная. Тонкая проволока на цилиндрический каркас намотана

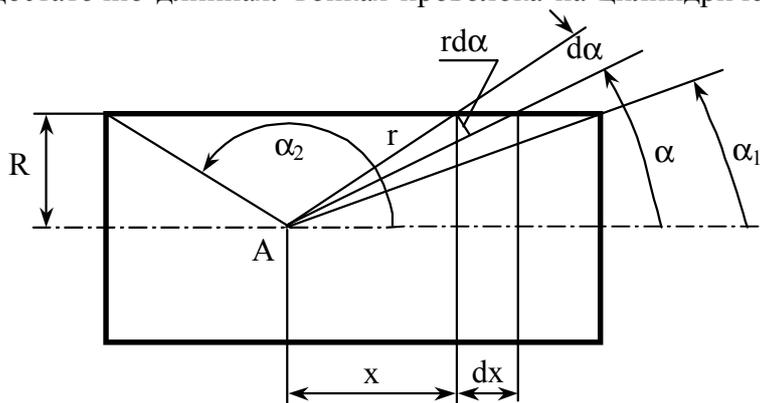


Рис. 2

плотно и равномерно, так что число витков обмотки на единицу длины является величиной постоянной и равной n . Соленоид можно рассматривать как совокупность колец с током, имеющих общую ось. Воспользуемся принципом суперпозиции магнитных полей для нахождения магнитной индукции в точке A на оси соленоида (рис.2). По соленоиду течет ток i . Выделим в соленоиде кольцо радиуса R и толщины dx с током i_k , как показано на рис.2. Индукция магнит-

ного поля в точке А, находящейся на оси кольца на расстоянии x от его центра, вычисляется по закону Био-Савара-Лапласа

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2i_K \pi R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (18)$$

Как видно из рис.2,

$$R^2 + x^2 = r^2, \quad (19)$$

$$r = \frac{R}{\sin \alpha}, \quad (20)$$

$$dx = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha}. \quad (21)$$

По кольцу протекает ток

$$i_K = i \cdot n \cdot dx = i \cdot n \frac{r}{\sin \alpha} d\alpha. \quad (22)$$

Подставив (19), (20) и (22) в выражение (18), получим

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} 2\pi \cdot i \cdot n \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha. \quad (23)$$

Векторы $d\vec{B}$ для всех витков соленоида направлены одинаково, поэтому модуль вектора \vec{B} запишется так:

$$B = \frac{\mu_0 i \cdot n}{2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu_0 i \cdot n}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (24)$$

где α_1 и α_2 - углы, показанные на рис 2.

Для бесконечно длинной катушки $\alpha_1=0$ и $\alpha_2=\pi$, поэтому в любой точке на оси соленоида бесконечно большой длины индукция

$$B_0 = \mu_0 i n. \quad (25)$$

Приведем график зависимости $\frac{B}{B_0} = f\left(\frac{x}{R}\right)$ вдоль оси катушки, длина которой в четыре раза

больше ее диаметра. На графике (рис.3) по оси ординат отложено отношение индукции магнитного поля B рассматриваемой катушки к индукции поля B_0 в катушке бесконечно большой длины с тем же количеством витков на единицу длины и с той же силой тока в каждом витке. По оси абсцисс отложено расстояние от центра катушки вдоль ее оси, выраженное в радиусах

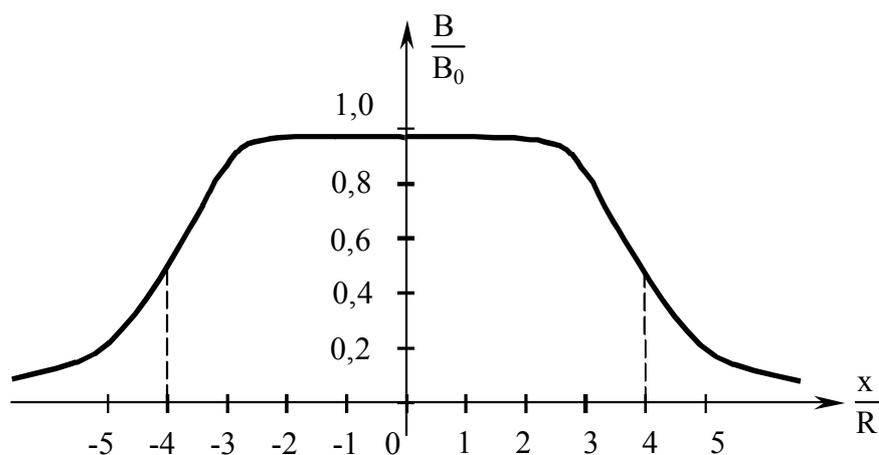


Рис. 3

катушки. Как видно из графика, в центральной части катушки магнитное поле практически совпадает с полем соленоида бесконечно большой длины. На концах катушки поле уменьшается почти в два раза. Этот вывод можно проверить экспериментально, так как в лабораторной

установке длинная катушка близка по пропорциям к катушке «четыре к одному».

В лабораторной установке на длинную катушку от генератора звуковой частоты подается переменное напряжение

$$U = U_m \cos \omega t. \quad (26)$$

Переменный ток

$$i = i_m \cos \omega t, \quad (27)$$

проходящий через катушку, создаст переменное магнитное поле, модуль вектора индукции которого будет изменяться по закону

$$B = B_m \cos \omega t, \quad (28)$$

где B_m - максимальное амплитудное значение модуля вектора индукции.

В качестве зонда используется измерительная катушка, которая может перемещаться внутри длинной катушки вдоль их общей оси. В измерительной катушке создается ЭДС индукции

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} (BS \cos \alpha) = -NS \cos \alpha \frac{dB}{dt}, \quad (29)$$

где N - число витков измерительной катушки; S - площадь ее поперечного сечения; α - угол между нормалью к поперечному сечению измерительной катушки и вектором \vec{B} .

Измерительная катушка подключается к входу осциллографа, входное сопротивление которого на несколько порядков выше сопротивления измерительной катушки (активного и индуктивного). Поэтому на экране осциллографа можно наблюдать колебания ЭДС индукции, возникающей в измерительной катушке. Подставив (28) в (29), получим

$$\mathcal{E} = B_m \cdot S \cdot N \cdot \omega \cos \alpha \sin \omega t. \quad (30)$$

Так как катушки соосны, то $\cos \alpha = 1$ и амплитудное значение ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_m = B_m \cdot S \cdot N \cdot \omega \quad (31)$$

Учитывая; что $\omega = 2\pi f$ (где f - частота напряжения на выходе звукового генератора, Гц), получим

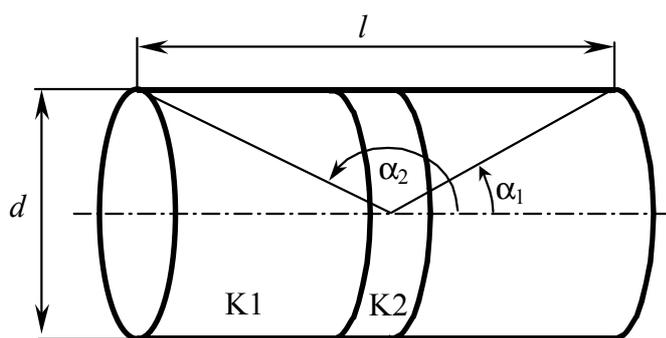
$$\mathcal{E}_m = B_m \cdot S \cdot N \cdot 2\pi f. \quad (32)$$

Тогда амплитудное значение модуля вектора индукции магнитного поля на оси длинной катушки

$$B_m = \frac{\mathcal{E}_m}{2\pi f \cdot S \cdot N}, \quad (33)$$

если известны S , N , f и определено с помощью осциллографа \mathcal{E}_m .

Определим взаимную индуктивность двух катушек, одна из которых, короткая катушка



2, может перемещаться относительно другой, длинной катушки 1, вдоль их общей оси. Пусть катушка 2 находится на середине катушки 1, как указано на рис.4. Если, по катушке 1 длины l и диаметра d , имеющей N_1 витков течет ток i_1 , то магнитная индукция на оси катушки 1 в ее центре может быть вычислена по формуле (24). Учитывая, что

$$\cos \alpha_1 = -\cos \alpha_2 = \frac{l}{\sqrt{l^2 + d^2}},$$

Рис.4

получим

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot i \cdot N_1}{\sqrt{l^2 + d^2}}.$$

Считая площади поперечных сечений S_1 катушек одинаковыми, запишем полный магнитный поток сцепленный с катушкой 2 (потокосцепление)

$$\Psi_{21} = N_2 B_1 S_1 = \frac{\mu_0 N_1 N_2 S_1}{\sqrt{l^2 + d^2}} i_1. \quad (35)$$

Сопоставляя (35) и (5), находим, что при совпадении центров двух соосных катушек их взаимная индуктивность

$$L_{21} = \frac{\mu_0 N_1 N_2 S_1}{\sqrt{l^2 + d^2}}. \quad (36)$$

В данной работе взаимная индуктивность двух катушек измеряется следующим образом. От генератора Г звуковой частоты (рис. 5) переменное напряжение U подается на последовательно соединенные резистор сопротивлением R и катушку 1 индуктивностью L_1 . Полное электрическое сопротивление цепи, содержащей катушку 1 с активным сопротивлением R_1 , $Z = \sqrt{(R_1 + R)^2 + (\omega L_1)^2}$.

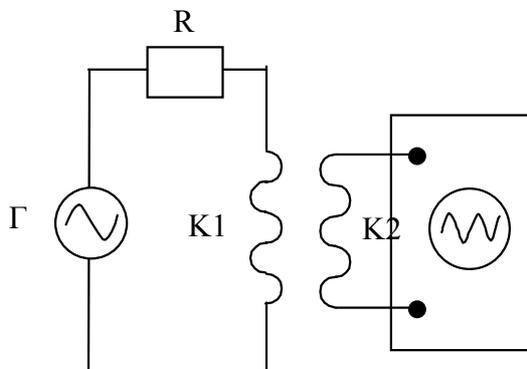


Рис. 5

Если сопротивление резистора R выбрать достаточно большим, то полное сопротивление цепи можно принять равным R . Тогда ток, проходящий через катушку определяется по формуле

$$i_1 = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t. \quad (37)$$

Переменный ток i_1 в катушке 1 создает изменяющийся во времени магнитный поток через катушку 2, и в катушке 2 возникает ЭДС индукции

в катушке 2 возникает ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_2 = -L_{21} \frac{di_1}{dt} = L_{21} \frac{U_m}{R} \omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{m2} \sin \omega t. \quad (38)$$

На экране осциллографа, присоединенного к катушке 2, можно наблюдать колебания ЭДС индукции, амплитуда которой

$$\mathcal{E}_{m2} = L_{21} \frac{U_m}{R} \omega. \quad (39)$$

Учитывая, что $\omega = 2\pi f$ получим

$$\mathcal{E}_{m2} = L_{21} \frac{U_m}{R} 2\pi f. \quad (40)$$

Поэтому взаимную индуктивность L_{21} можно найти, зная R , f и U и измерив \mathcal{E}_{m2} :

$$L_{21} = \frac{\mathcal{E}_{m2} R}{2\pi f U_m}. \quad (41)$$

Если генератор звуковой частоты и резистор R соединить последовательно с катушкой 2, а осциллограф подключить к катушке 1, то можно найти взаимную индуктивность

$$L_{12} = \frac{\mathcal{E}_{m1} R}{2\pi f U_m}. \quad (42)$$

Сравнивая найденные экспериментально в отсутствие ферромагнитного сердечника L_{12} и L_{21} , можно проверить справедливость равенства (8).

Из формулы (6) следует, что ЭДС индукции в катушке 2 зависит от скорости изменения тока i_1 . Это приводит к тому, что амплитуда ЭДС индукции (40) зависит от частоты колебаний тока в катушке, подключенной к звуковому генератору. Этот эффект также проверяется экспериментально.

Для усиления магнитного потока применяют ферромагнитные материалы. Экспериментально можно убедиться, что наличие ферромагнитного сердечника в соленоиде приводит к увеличению амплитуды ЭДС индукции и к изменению взаимной индуктивности катушек.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис.6 приведена принципиальная электрическая схема экспериментальной установки. Генератор Г звуковой частоты и соединенный с ним последовательно резистор R с помощью

переключателей П1 и П2 подключается к катушкам. Эти же переключатели соединяют катушки К1 и К2 с осциллографом. Поочередное подключение катушек к генератору и осциллографу

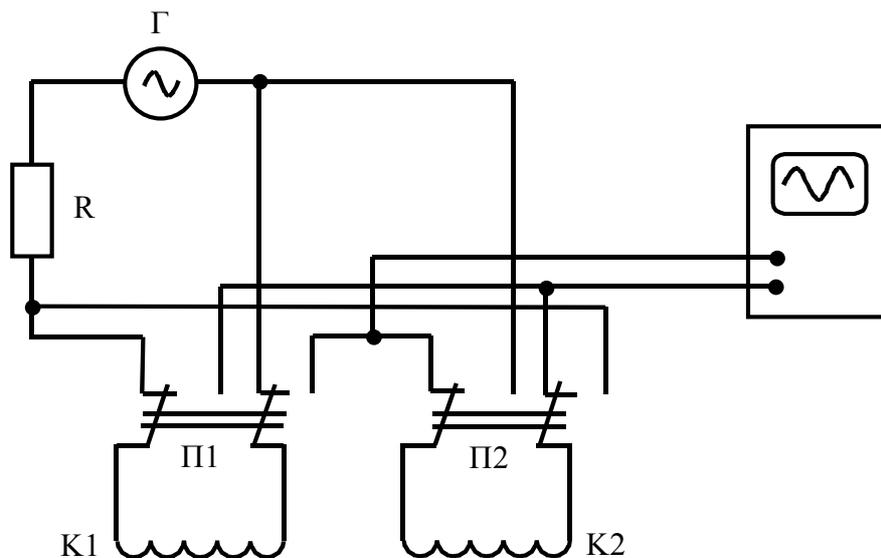


Рис. 6

осуществляется в соответствии с указанными на установке положениями переключателей. Катушка 1 состоит из N_1 витков проволоки, намотанной в один слой на керамический каркас. Катушка 2 имеет N_2 витков проволоки, навитой на каркас из оргстекла. Обе катушки, резистор и переключатели, соединенные проводниками, расположены на изоляционной панели.

Зонд для исследования поля на оси катушек 1 и 2 представляет собой измерительную катушку, N витков которой намотаны в одном направлении на тонкую трубку, помещаемую внутрь катушки 1. На трубке находится шкала по которой можно определять смещение измерительной катушки относительно центра катушки 1. Измерительная катушка непосредственно присоединяется к осциллографу.

Размеры катушек, а также число витков катушек указаны на установке.

ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Присоединить звуковой генератор и осциллограф к соответствующим клеммам на установке. Включить в сеть звуковой генератор и осциллограф и дать приборам прогреться.

Задание 1. Определить индукцию магнитного поля на оси цилиндрической катушки.

1. Установить по оси катушки 1 измерительный датчик. Измерительная катушка должна находиться на середине катушки 1, что можно проконтролировать по рискам, нанесенным на трубку через 1 см.
2. Подключить с помощью переключателя катушку 1 к звуковому генератору, а измерительную катушку соединить со входом Y осциллографа.
3. Установить на выходе звукового генератора переменное напряжение $U=10$ В частоты $f=15$ кГц.
4. Установить чувствительность b входного усилителя осциллографа, достаточную для наблюдения в пределах экрана осциллографа колебаний ЭДС индукции, возникающей в измерительной катушке. Генератор развертки осциллографа отключен.
5. Медленно перемещая от центра измерительную катушку вдоль оси катушки 1 через 1 см ($r=0, 1, 2, \dots, 14$ см), измерить с помощью координатной сетки экрана осциллографа длину штриха h_1 (размах колебаний ЭДС индукции, возникающей в измерительной катушке), вычислить

$$\mathcal{E}_{m1} = b \frac{h_1}{2} \text{ и записать в табл. 1.}$$

Таблица 1

r , см	h_1 , мм	h_2 , мм	\mathcal{E}_{m1} , мВ	\mathcal{E}_{m2} , мВ	B_{m1} , Тл	B_{m2} , Тл	ΔB_{m1} , Тл	ΔB_{m2} , Тл
0								
± 1								
± 2								
...								
± 14								

- Установить трубку с измерительной катушкой с другой стороны катушки 1 и повторить п.5.
- Подключив к звуковому генератору катушку 2, повторить пп.1, ..., 6, вычислить \mathcal{E}_{m2} и записать в табл. 1.
- Удалить трубку с измерительной катушкой из соленоида.
- Вычислить амплитудные значения индукции магнитного поля B_{m1} и B_{m2} по формуле (33) и занести в табл. 1. Значения S и N указаны на установке.
- Построить графики зависимостей $B_{m1}(r)$ и $B_{m2}(r)$.

Задание 2. Изучить зависимость ЭДС индукции от частоты в отсутствие ферромагнетиков.

- Установить катушку 2 на середине катушки 1. С помощью переключателей подключить катушку 1 к звуковому генератору, а катушку 2 к осциллографу.
- Установить на выходе звукового генератора переменное напряжение 5 В частотой 20 кГц.
- Установив необходимую чувствительность b усилителя Y осциллографа и включив генератор развертки осциллографа добиться устойчивой картины колебаний на экране.
- Увеличивая частоту подаваемого на катушку 1 переменного напряжения от 20 до 100 кГц, наблюдать на экране осциллографа изменение амплитуды колебаний.
- При измерении амплитуды ЭДС индукции рекомендуется выключить развертку осциллографа. Измерив с помощью координатной сетки экрана осциллографа длину штриха h_2 , вычислить $\mathcal{E}_{m2} = b \frac{h_2}{2}$ и записать в табл.2. Увеличивая частоту напряжения следить за тем, чтобы выходное напряжение генератора, равное 5 В, оставалось неизменным.

Таблица 2

f , кГц	2	3	4	5	6	7	8	9
h_2 , мм								
\mathcal{E}_{m2} , В								
$\Delta \mathcal{E}_{m2}$, В								

- По данным табл.2 построить график зависимости амплитуды ЭДС индукции от частоты.

Задание 3. Определить взаимную индуктивность и изучить ее зависимость от взаимного расположения катушек в отсутствие ферромагнетиков.

- Переместить катушку 2 на конец катушки 1.
- На катушку 1 подать переменное напряжение от звукового генератора $U=5$ В, $f=15$ кГц. Амплитудное значение напряжения U_m связано с действующим значением* U равенством

$$U_m = U\sqrt{2}. \quad (43)$$

- На осциллографе установить необходимую чувствительность усилителя Y.
- Включить генератор развертки осциллографа и добиться устойчивой картины колебаний на экране. Передвигая катушку 2 вдоль катушки 1, следить за изменением амплитуды колебаний на экране осциллографа.
- Повторить эксперимент, поменяв подключение катушек с помощью переключателей.
- Отключить развертку осциллографа. Перемещать катушку 2 вдоль катушки 1, измеряя расстояние r от конца катушки 1 по рискам, нанесенным на металлический стержень. При каждом фиксированном через 1 см положении катушки 2 измерить длину штриха h на экране осцилло-

*) Вольтметр звукового генератора измеряет действующее напряжения.

графа, подключая катушки сначала согласно п.2, а затем согласно п.5. Вычислить \mathcal{E}_{m2} и \mathcal{E}_{m1} и записать в табл.3.

7. По данным табл.3 вычислить взаимные индуктивности L_{12} и L_{21} . Подставив (43) в формулы (41) и (42), получим:

$$L_{12} = \frac{\mathcal{E}_{m1} R}{2\sqrt{2\pi} fU}, \quad L_{21} = \frac{\mathcal{E}_{m2} R}{2\sqrt{2\pi} fU} \quad (44)$$

Сопротивление резистора R указано на установке. Записать полученные значения в табл.3.

Таблица 3

$$R = \quad ; U = \quad ; f = \quad$$

r, см	h ₁ , мм	h ₂ , мм	\mathcal{E}_{m2} , В	\mathcal{E}_{m1} , В	L ₁₂ , мГц	L ₂₁ , мГц	ΔL_{12} , мГц	ΔL_{21} , мГц
0								
1								
2								
...								
17								
18								

8. По данным табл.3 на одном графике построить зависимости $L_{12}(r)$ и $L_{21}(r)$.

9. Рассчитать по формуле (36) взаимную индуктивность катушек и сравнить ее с экспериментальным значением, соответствующим установке катушки 2 на середине катушки 1.

Задание 4. Изучить зависимость ЭДС индукции от частоты при наличии ферромагнетиков.

Поместив в катушку 1 ферромагнитный сердечник, повторить задание 2. Чувствительность усилителя осциллографа следует уменьшить.

Задание 5. Определить взаимную индуктивность и изучить ее зависимость от взаимного расположения катушек при наличии ферромагнетиков.

Поместив в катушку 1 ферромагнитный сердечник, повторить задание 3 пп.1 ... 8.

АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Погрешность при измерении индукции магнитного поля на оси соленоида, взаимной индуктивности и ЭДС индукции складывается из случайной погрешности измерения и приборной погрешности. Случайные погрешности появляются при измерении длины штриха на экране осциллографа и при установке по шкалам звукового генератора напряжения и частоты. Опыт показывает, что приборные погрешности существенно превышают случайные, поэтому полная погрешность измерения равна результирующей приборных погрешностей.

Укажем также некоторые возможные систематические погрешности, возникающие при измерении взаимной индуктивности. К ним следует отнести погрешность, с которой определены сопротивление резистора и систематическое занижение взаимной индуктивности вследствие того, что формула (44), по которой ведется расчет, не учитывает активного и индуктивного сопротивлений катушки. Наличие в экспериментальной установке стальных деталей и несоосность катушек также увеличивают погрешность измерений.

Задание 1. Абсолютную максимально допустимую погрешность измерения амплитуды индукции магнитного поля на оси катушки можно вычислить по формуле

$$\Delta B_m = B_m \sqrt{\left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2}.$$

Для осциллографа погрешность чувствительности усилителя не превышает 10%, т.е. $\frac{\Delta b}{b} = 0,1$.

Максимальную абсолютную погрешность длину штриха Δh можно принять равной 0,5 мм. По

паспорту генератора ГЗ-102 $\frac{\Delta f}{f} = 0,01$. Найденные значения ΔB_{m1} и ΔB_{m2} записать в табл.1 и

нанести на график.

Задание 2. Абсолютную максимально допустимую погрешность измерения амплитуды ЭДС индукции можно вычислить по формуле

$$\Delta \mathcal{E}_{m2} = \mathcal{E}_{m2} \sqrt{\left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2}.$$

Найденные значения $\Delta \mathcal{E}_{m2}$ записать в табл.2 и нанести на график. Убедиться, что зависимость $\mathcal{E}_{m2}(f)$ является линейной в пределах погрешности измерений.

Задание 3. Абсолютную максимально допустимую погрешность измерения взаимной индуктивности можно вычислить по формуле

$$\Delta L = L \sqrt{\left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2}.$$

По паспорту генератора ГЗ-102 $\frac{\Delta U}{U} = 0,04$. Вычисленные значения ΔL_{12} и ΔL_{21} записать в табл.3 и нанести их на график. Убедиться что L_{12} в L_{21} совпадают в пределах погрешностей измерений в отсутствие ферромагнетиков.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется взаимной индуктивностью двух контуров и от чего она зависит?
2. Почему взаимная индуктивность катушек уменьшается при перемещении катушки 2 от середины к концу катушки 1?
3. Чему равна ЭДС взаимной индукции двух катушек?
4. Чему равна механическая работа при медленном сближении двух контуров с током?

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С.Г. Электричество. - М.: Наука, 1985.