

**Специализированный учебно-научный центр -
факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,
Школа имени А.Н. Колмогорова
Кафедра физики**

Общий физический практикум

Лабораторная работа №3.10

Измерение индуктивности катушки
и
наблюдение кривых гистерезиса
ферромагнетика.

Составитель Т.П. Корнеева
Постановка эксперимента – А.И. Бакшеев

Измерение индуктивности катушки и наблюдение кривых гистерезиса ферромагнетика.

Часть I

Измерение индуктивности катушки и коэффициента взаимной индукции двух последовательно соединенных катушек.

Цель работы:

1. Измерение индуктивности катушки по величине ее сопротивления переменному току.
2. Измерение коэффициента взаимной индукции двух катушек.

Приборы и оборудование:

Дроссельная катушка индуктивности с двумя обмотками, разборный стальной сердечник, источник переменного (50 Гц) напряжения, вольтметр, универсальный электроизмерительный прибор (тестер).

Теоретическое введение.

1. Явление электромагнитной индукции.

Открытое в 1831 г английским физиком Майклом Фарадеем явление электромагнитной индукции показало глубинную связь электрических и магнитных явлений и в конечном итоге привело к открытию нового физического понятия – электромагнитного поля.

Фарадей установил, что в не содержащем источников тока замкнутом проводящем контуре возникает электрический ток в

тех случаях, когда изменяется магнитный поток, пронизывающий данный контур. Этот ток был назван *индукционным*.

Направление индукционного тока определяется с помощью правила, которое было введено Э.Х. Ленцем и носит его имя: *«Индукционный ток, возникающий в замкнутом контуре, имеет такое направление, что создаваемый им магнитный поток компенсирует (частично или полностью) то изменение магнитного потока, которое вызвало данный ток»*.

Правило Ленца означает следующее: если индукционный ток возник вследствие увеличения внешнего магнитного потока через контур, то его собственный магнитный поток будет иметь противоположный знак; если же внешний магнитный поток убывает, то индукционный ток создает магнитный поток того же знака.

Заметим, что правило Ленца соответствует принципу, сформулированному Ле-Шателье, и хорошо известному в химии: *«Внешнее воздействие, выводящее систему из состояния термодинамического равновесия, вызывает в системе процессы, ослабляющие эффект воздействия»*.

В соответствии с представлениями о природе электрического тока в проводниках следует допустить, что индукционный ток возникает вследствие того, что на заряженные частицы в проводнике действуют «сторонние» (т.е. не имеющие электростатического происхождения) силы, которые характеризуются величиной ЭДС, в данном случае называемой *ЭДС индукции*.

Все вышеизложенное позволило М.Фарадею сформулировать *закон электромагнитной индукции* в виде:

ЭДС индукции в замкнутом контуре равна взятой с противоположным знаком скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную данным контуром.

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

Физические величины в этой записи закона измеряются в системе единиц СИ, а знаки алгебраических величин определяются в соответствии с выбором направления обхода замкнутого контура и связанного с ним направления нормали к поверхности, ограниченной контуром.

Физическая природа ЭДС индукции может быть различной в зависимости от конкретной ситуации, приводящей к изменению магнитного потока через поверхность контура.

Наибольший интерес представляет ситуация, когда в неподвижном контуре изменение магнитного потока вызвано меняющимся во времени магнитным полем.

В этом случае возникновение индукционного тока связано с появляющимся вследствие изменения магнитного поля *вихревым электрическим полем*. Вихревое электрическое поле действует на электрически заряженные частицы подобно электростатическому, но, в отличие от него, не обладает свойством потенциальности (его силовые линии замкнуты). Вихревое электрическое поле всегда возникает в тех точках пространства, где есть меняющееся во времени магнитное поле.

Таким образом, *в случае меняющегося во времени магнитного поля ЭДС индукции в замкнутом контуре есть отнесенная к величине заряда работа сил вихревого электрического поля в этом контуре.*

2. Явление самоиндукции. Индуктивность.

Если в электрической цепи течет ток, изменяющийся во времени, то создаваемое им магнитное поле также меняется во времени, что приводит к возникновению вихревого электрического поля. Со стороны этого вихревого поля на заряженные частицы в проводнике действуют силы, величина которых определяется величиной ЭДС, именуемой в данном случае *ЭДС самоиндукции*.

Явление самоиндукции протекает наиболее наглядно, когда в цепи постоянного тока происходит замыкание или

размыкание контактов. Так, при замыкании цепи, содержащей источник постоянного тока, ток не сразу достигает своего установившегося значения (см. рис.2).

Для количественного описания явления самоиндукции необходимо ввести физическую величину, характеризующую связь между магнитным потоком через замкнутый контур и током в контуре. Магнитное поле, создаваемое током в контуре, в любой точке пространства пропорционально силе тока. Поэтому и магнитный поток, пронизывающий контур, пропорционален току в контуре:

$$\Phi = LI \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности L называется *индуктивностью контура*, или *коэффициентом самоиндукции* и определяется геометрическими характеристиками контура и магнитными свойствами среды, в которой находится данный контур.

Используя закон электромагнитной индукции (1), для ЭДС самоиндукции получаем выражение:

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (3)$$

В обычных цепях постоянного тока величина индуктивности контура, а, значит, и роль ЭДС самоиндукции незначительны, если только в цепи не содержится катушка индуктивности.

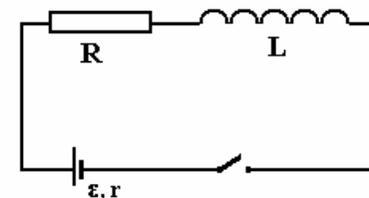


Рис.1. *Катушка индуктивности в цепи постоянного тока.*

Для цепи, содержащей катушку индуктивности (рис.1), закон Ома выглядит следующим образом:

$$I(R + r) = \varepsilon - L \frac{dI}{dt}, \quad (4)$$

где ε и r - ЭДС и внутреннее сопротивление источника постоянного тока, а R – сопротивление провода, из которого намотана катушка.

Применение уравнения (4) к случаю замыкания цепи ($I = 0$ при $t = 0$) позволяет получить закон изменения тока в зависимости от времени:

$$I(t) = I_m [1 - \exp\{-\frac{(R+r)}{L}t\}] = I_m [1 - \exp(-\frac{t}{\tau})],$$

где $I_m = \varepsilon / (R + r)$ – установившееся значение тока в цепи, а $\tau = L / (R + r)$ – характерное время установления тока.

Полученная зависимость может быть представлена графически.

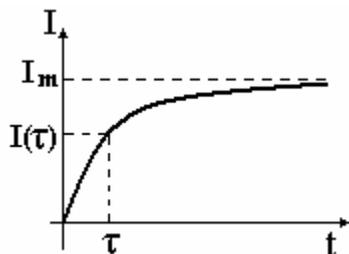


Рис.2. Установление тока в цепи с индуктивностью.

Из уравнения (4) следует, что разность потенциалов (напряжение) на концах катушки индуктивности определяется как величиной тока, так и скоростью его изменения:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = IR + L \frac{dI}{dt}. \quad (5)$$

Расчет индуктивности соленоида.

Рассчитаем индуктивность длинной катушки (соленоида), имеющей N витков, площадь сечения S и длину l .

Пусть по катушке протекает ток I . Тогда индукция магнитного поля внутри катушки равна $B = \mu_0 \frac{N}{l} I$.

Магнитный поток Φ_1 через поперечное сечение катушки равен

$$\Phi_1 = BS = \mu_0 \frac{NS}{l} I,$$

а суммарный магнитный поток через все N витков будет в N

раз больше: $\Phi = \mu_0 \frac{N^2 S}{l} I$.

Тогда, в соответствии с (2), получаем:

$$L = \mu_0 \frac{N^2 S}{l} = \mu_0 n^2 Sl = \mu_0 n^2 V, \quad (6)$$

где $n = \frac{N}{l}$ – число витков, приходящихся на единицу длины, а $V = Sl$ – объем катушки, внутри которой в основном и сосредоточено магнитное поле.

Если внутри катушки все пространство заполнено средой с магнитной проницаемостью μ , индуктивность увеличивается в μ раз:

$$L = \mu \mu_0 n^2 Sl = \mu \mu_0 n^2 V. \quad (7)$$

3. Взаимная индукция.

Говорят, что между двумя замкнутыми проводящими контурами (катушками) имеется магнитная (индуктивная) связь, если линии магнитного поля, создаваемого током в первом контуре (катушке), пронизывают второй контур (витки второй катушки). В этом случае существует магнитный поток через поверхность второго контура, величина которого пропорциональна току в первом контуре

$$\Phi_{21} = L_{21} I_1,$$

и аналогично

$$\Phi_{12} = L_{12} I_2.$$

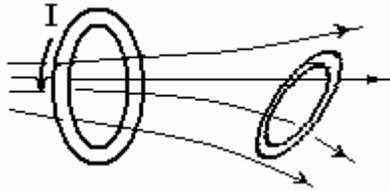


Рис.3. *Индуктивная связь двух контуров*

В случае простой конфигурации контуров (например, две катушки, надетые на общий сердечник) непосредственным расчетом можно показать, что $L_{12} = L_{21} \equiv M$. В общем случае это доказывается на основе закона сохранения энергии.

Коэффициент M называется *взаимной индуктивностью двух контуров* (или *коэффициентом взаимной индукции*). Его величина определяется геометрией обоих контуров, расстоянием между ними, их взаимным расположением и магнитными свойствами окружающей среды.

Если сила тока в одном из контуров меняется, то во втором контуре возникает ЭДС индукции

$$\varepsilon_2 = - M \frac{dI}{dt}.$$

Это явление можно непосредственно наблюдать в одном из опытов Фарадея:

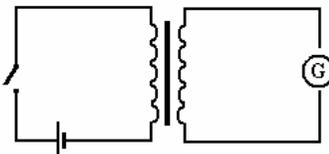


Рис.4. *Опыт Фарадея с двумя катушками индуктивности.*

В случае, когда во втором контуре также есть источник тока, ЭДС индукции во втором контуре будет определяться скоростью изменения тока в обоих контурах:

$$\varepsilon_2 = - L_2(dI_2/dt) \pm M(dI_1/dt), \quad (8)$$

при этом знак при коэффициенте взаимной индукции M определяется по правилу Ленца и зависит от взаимного расположения контуров.

Рассмотрим две последовательно соединенные катушки индуктивности, надетые на общий сердечник. Пусть направление обмотки в катушках одинаково и конец первой катушки соединен с началом второй (т.е. ток в катушках создает магнитное поле, направленное одинаково). Тогда общая ЭДС самоиндукции в цепи будет равна

$$\varepsilon = - L_1(dI_1/dt) - M(dI_2/dt) - L_2(dI_2/dt) - M(dI_1/dt).$$

Но поскольку $I_1 = I_2 = I$, для общей индуктивности цепи получаем:

$$L = L_1 + L_2 + 2M. \quad (9)$$

Если же поменять способ соединения катушек и к концу первой обмотки подключить конец второй, то для общей индуктивности цепи получим:

$$L = L_1 + L_2 - 2M. \quad (10)$$

4. Индуктивное сопротивление катушки переменному току.

Если через катушку протекает переменный ток, меняющийся по гармоническому закону, то и напряжение на концах катушки будет меняться по гармоническому закону.

Пусть изменение тока происходит по закону

$$I(t) = I_m \cos \omega t.$$

Когда омическое сопротивление катушки мало (первым слагаемым в уравнении (5) можно пренебречь), для напряжения на катушке получаем

$$U(t) = - U_m \sin \omega t = U_m \cos(\omega t + \pi/2),$$

где $U_m = I_m \omega L$, а величина $X_L = \omega L$ называется индуктивным сопротивлением катушки.

В случае, когда омическим сопротивлением катушки нельзя пренебрегать по сравнению с индуктивным, закон Ома для переменного тока приводит к уравнению:

$$U_m \cos(\omega t + \varphi) = I_m R \cos \omega t + I_m \omega L \cos(\omega t + \pi/2) \quad (5a)$$

Из уравнения (5а) непосредственно, или используя метод векторных диаграмм, можно получить следующий результат:

$$U_m = I_m \sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}.$$

По определению *сопротивлением какого-либо участка цепи переменному току называют отношение амплитудных или действующих (эффективных) значений напряжения и тока*:

$$Z = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}$$

В случае катушки индуктивности величина

$$Z = \sqrt{\omega^2 L^2 + R^2} = \sqrt{X_L^2 + R^2} \quad (11)$$

является полным сопротивлением катушки переменному току.

Измерив напряжение на концах катушки и силу тока в цепи, можно рассчитать индуктивность катушки:

$$L = \frac{\sqrt{U^2 - I^2 R^2}}{\omega I} \quad (12)$$

Экспериментальная часть.

1. Измерьте сопротивление катушки постоянному току (омическое сопротивление) с помощью тестера (мультиметра).

Для этого:

- переведите тестер в режим работы омметра;
- поставьте диапазон измерений «Ом» (Ω)
- измерьте сопротивление катушки (2400 витков).

2. Для измерений, позволяющих вычислить сопротивление катушки переменному току Z , соберите электрическую цепь, соединив последовательно катушку с миллиамперметром.

Если в качестве миллиамперметра используется тестер, переведите его в соответствующий режим (\sim mA). Предел измерения установите первоначально 2500 мА.

Подключите цепь к источнику переменного напряжения.

3. Постепенно (начиная с нуля) установите выходное напряжение $U = 12$ В и зафиксируйте значение тока.

Если в качестве миллиамперметра используется стрелочный прибор, то в целях повышения точности измерений желательно, чтобы отклонение стрелки миллиамперметра превышало половину шкалы. Если это не так, измените предел измерения миллиамперметра.

4. Измерьте силу тока при двух других значениях выходного напряжения (например, 8 В и 10 В). **Результаты измерений занесите в заранее подготовленную таблицу.**

5. Для каждой пары значений напряжения и силы тока рассчитайте значение сопротивления катушки переменному току. Найдите среднее значение и оцените случайную погрешность как среднее арифметическое по трем измерениям.

6. Используя формулу (12), вычислите индуктивность катушки, подставив значение $\omega = 2\pi f$, где $f = 50$ Гц.

7. Прделайте пункты 2 – 6 для катушки с незамкнутым и полностью замкнутым сердечником.

Оцените влияние сердечника на величину индуктивности.

8. Прделайте все измерения (пп. 1 – 6) для второй обмотки катушки (1200 витков) при **замкнутом сердечнике**.

9. Наденьте катушку на замкнутый сердечник, соединив концы обмоток, и, проделав соответствующие измерения, оцените коэффициент взаимной индукции M . (**Способ соединения концов обмоток задается преподавателем**).

Сделайте выводы о проделанной работе.

Часть II

Наблюдение кривых гистерезиса ферромагнетика в переменном магнитном поле с помощью осциллографа.

Цель работы:

Наблюдение на экране осциллографа кривой намагничивания стального сердечника.

Приборы и оборудование:

Представленная на рис.8 плата с собранной на ней электрической схемой, электронный осциллограф, регулируемый источник переменного напряжения.

Теоретическое введение.

Магнитное поле в веществе отличается от магнитного поля в вакууме. Так, если магнитное поле, созданное некоторой системой токов, характеризуется в вакууме величиной магнитной индукции B_0 , то после заполнения всего пространства, в котором создано поле, однородной средой величина магнитной индукции станет равной B .

Величина отношения $\mu = B/B_0$ характеризует магнитные свойства среды и называется *магнитной проницаемостью*.

По своим магнитным свойствам все вещества делятся на три класса: *парамагнетики* ($\mu > 1$), *диамагнетики* ($\mu < 1$) и *ферромагнетики* ($\mu \gg 1$). К ферромагнетикам относятся три химических элемента – *железо (Fe)*, *никель (Ni)*, *кобальт (Co)*, а также многие их сплавы. Тот факт, что магнитное поле в

ферромагнетиках значительно превышает по величине поле, создаваемое внешними источниками, объясняется тем, что в этих веществах существуют макроскопические области спонтанного намагничивания (домены). Под действием внешнего поля домены, направление намагниченности которых наиболее близко к направлению внешнего поля, увеличиваются за счет сокращения размеров доменов с менее выгодным направлением намагниченности (подробнее см.[1]).

Более того, даже при исчезновении внешних источников собственное поле в ферромагнетике не исчезает – ферромагнетик приобретает остаточную намагниченность и сам становится источником магнитного поля. Ферромагнетики с остаточной намагниченностью – это хорошо всем известные постоянные магниты.

Доменная структура ферромагнетиков приводит к возникновению явления, которое носит название *гистерезис*, и означает отставание следствия от порождающей его причины.

Для ферромагнетиков это выглядит следующим образом. Если первоначально не намагниченный ферромагнетик поместить в постепенно возрастающее внешнее поле B_0 , то поле в ферромагнетике B тоже будет увеличиваться. Заметим, однако, что это увеличение не носит характера прямой пропорциональности, т.е. величина магнитной проницаемости зависит от величины внешнего намагничивающего поля.

Если же, начиная с некоторого значения, мы начнем уменьшать внешнее поле, то поле внутри ферромагнетика тоже начнет уменьшаться, но значения индукции этого поля все время будут превышать те значения, которые соответствовали внешнему полю в процессе намагничивания. При снятии внешнего поля поле в ферромагнетике не исчезает – он становится постоянным магнитом. При изменении направления внешнего поля поле в ферромагнетике уменьшается и исчезает при некотором значении внешнего поля. Эта величина внешнего поля носит название *коэрцитивная сила*.

В результате на графике зависимости B (B_0), представленном на рис.5, получается замкнутая кривая, которую называют *петлей гистерезиса*.

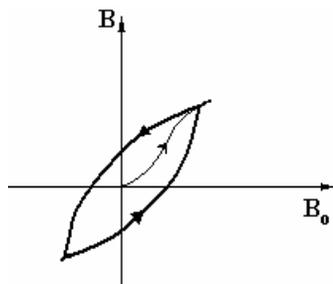


Рис. 5. *Примерный вид кривой гистерезиса.*
(Величины B и B_0 отложены по осям в разных масштабах!)

Все вышесказанное о процессе намагничивания ферромагнетиков приводит нас к выводу, что *величина магнитной проницаемости ферромагнетиков не является постоянной, а зависит как от величины внешнего магнитного поля, так и от состояния намагниченности образца перед помещением его во внешнее поле.*

Кроме того, для каждого ферромагнетика существует определенная температура (точка Кюри), выше которой вещество перестает быть ферромагнетиком и становится парамагнетиком.

Экспериментальная часть

1. Обоснование метода.

В данной работе мы хотим увидеть на экране осциллографа зависимость между величиной магнитного поля в стальном сердечнике, вставленном в катушку, и полем, которое существовало бы в катушке в отсутствие сердечника.

Основным элементом установки, используемой в этой части работы, является трансформатор, на первичную обмотку которого подается переменное напряжение $U(t)$.

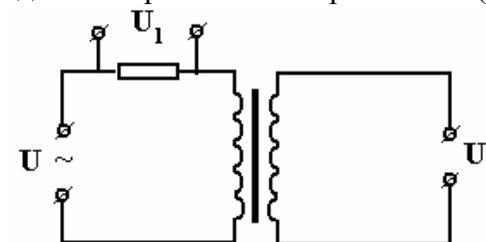


Рис. 6. *Получение сигнала U_1 , пропорционального индукции магнитного поля B_0 , создаваемого током в первичной обмотке*

В отсутствие сердечника магнитное поле в первичной катушке определялось бы только силой тока, протекающей через катушку: $B_0(t) \sim I_1(t) = I_m \sin \omega t$.

Если на одну пару отклоняющих пластин осциллографа подать напряжение $U_1(t)$ с резистора, по которому протекает ток в первичной обмотке, мы получим сигнал, пропорциональный полю $B_0(t)$ и меняющийся по закону

$$U_1(t) = U_{1m} \sin \omega t.$$

Очевидно, что напряжение U_2 на концах вторичной катушки определяется магнитным полем $B(t)$, существующим в сердечнике внутри катушки:

$$U_2 = \varepsilon_i = NS \frac{dB}{dt} \quad (13)$$

Поскольку $B(t)$ определяется значениями $B_0(t)$ в один и тот же момент времени, а $B_0(t) \sim \sin \omega t$, напряжение $U_2(t)$ меняется по закону

$$U_2(t) = U_{2m} \cos \omega t.$$

Таким образом, напряжение $U_1(t)$ и напряжение $U_2(t)$ изменяются со сдвигом фаз $\pi/2$.

Заметим, что для получения на экране осциллографа зависимости между двумя величинами, каждая из которых меняется по гармоническому закону, необходимо, чтобы

между их изменениями отсутствовал сдвиг фаз. Только тогда соотношение между мгновенными значениями этих величин не будет меняться со временем (иначе мы увидим фигуры Лиссажу).

Чтобы получить сигнал, пропорциональный интересующей нас величине $V(t)$, который меняется по закону $\sim \sin \omega t$, необходимо проинтегрировать величину $U_2(t)$:

$$V(t) = \frac{1}{NS} \int U_2(t) dt. \quad (14)$$

Для интегрирования сигнала применяют разного рода интегрирующие схемы. Простейшая из них состоит из соединенных последовательно резистора и конденсатора (рис.7) и выполняет свое назначение, если выходной сигнал много меньше входного: $U_{\text{ВЫХ}} \ll U_{\text{ВХ}}$.

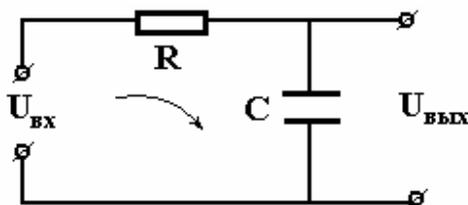


Рис.7. Простейшая интегрирующая схема – RC-ячейка.

При выполнении этого условия

$$I \approx U_{\text{ВХ}} / R, \\ U_{\text{ВЫХ}} = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I(t) dt \approx \frac{1}{RC} \int U_{\text{ВХ}} dt. \quad (15)$$

Мы видим, что выходной сигнал RC-ячейки действительно пропорционален интегралу от входного сигнала.

В нашем случае

$$U_C(t) = \frac{1}{RC} \int U_2(t) dt. \quad (16)$$

Этот вывод тем ближе к истине, чем больше величина RC (постоянная времени) превосходит характерное время

процесса. В данном случае характерным временем является период изменения напряжения $T = 0,02$ с.

2. Получение осциллограммы.

Для получения осциллограммы петли гистерезиса используется схема, показанная на рис.8, состоящая из трансформатора со стальным сердечником, резисторов и конденсатора.

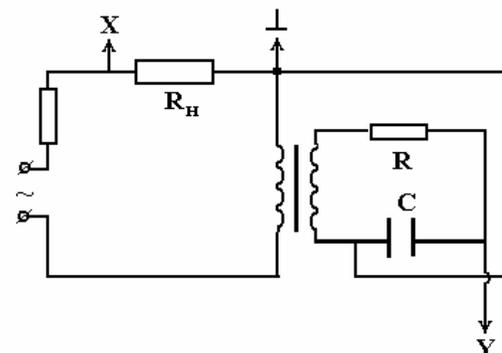


Рис.8. Схема для получения петли гистерезиса на экране осциллографа

В данной схеме первичная обмотка трансформатора через сопротивления подключается к источнику переменного напряжения (выводы, обозначенные знаком «~»).

Цепь вторичной обмотки содержит интегрирующую цепочку (резистор R и конденсатор C).

Напряжение на конденсаторе U_C подается на вход «Y» осциллографа (выводы, обозначенные знаком «Y» и «⊥» – «земля»)

С сопротивления нагрузки $R_Н$ снимается напряжение U_1 , подаваемое на вход «X» осциллографа (вывод, обозначенный знаком «X», вывод «⊥» - общий с цепью первичной обмотки).

Порядок выполнения работы.

1. Зарисуйте схему, приведенную на рис.8.
2. Подключите выводы схемы в соответствии с их обозначениями.
3. Установите на выходе источника напряжение $U = 5$ В.
4. Получите на экране осциллографа устойчивую картинку и зарисуйте полученную кривую (петлю гистерезиса).
5. Получите аналогичные кривые при значениях напряжения на источнике 10 В, 20 В и 30 В и зарисуйте их *в том же масштабе на одном чертеже*.
6. Проанализируйте различия в полученных кривых

Сделайте выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы для получения допуска к работе.

1. Сформулируйте цель работы.
2. Какие измерения Вы будете выполнять в первой и во второй части работы, в какой последовательности, и какие приборы будут Вами использованы для выполнения каждого из этих измерений?
3. В какой форме Вы представите результаты измерений?
4. Как по результатам измерений рассчитать индуктивность катушки?
5. Объясните, что представляют собой сигналы, подаваемые на вход “Х” и вход “У” осциллографа.

Контрольные вопросы для подготовки к защите работы.

1. Какие выводы Вы сделали по результатам проделанной Вами работы?
2. Что такое катушка индуктивности? Для чего применяют катушки индуктивности?
3. Что называется индуктивностью замкнутого проводящего контура?
4. Что называется сопротивлением участка цепи переменному току?
5. Что такое индуктивное сопротивление?
6. От чего зависит индуктивность длинного соленоида? Приведите формулу.
7. Сформулируйте закон электромагнитной индукции и правило Ленца.
8. Как связаны между собой ток и напряжение на участке цепи, имеющем сопротивление R и индуктивность L , при подключении его к переменному напряжению?
9. Что такое индуктивная связь проводящих контуров?
10. Что называется коэффициентом взаимной индукции?
11. Как различаются вещества по своим магнитным свойствам?
12. Приведите примеры веществ с различными магнитными свойствами.
13. Что такое явление гистерезиса?
14. От чего зависит величина магнитного поля в ферромагнетиках?
15. Для чего служит RC-цепочка в данной работе?

Рекомендуемая литература

1. Г.Я. Мякишев, А.З. Сияков **ФИЗИКА. Электродинамика.** 10 -11 классы. - М.: Дрофа, 2002 г.
2. Г.Я. Мякишев, А.З. Сияков **ФИЗИКА. Колебания и волны.** 11 класс. - М.: Дрофа, 2002 г.