

ЛИЦЕЙ № 1580 при МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Лабораторный практикум по общей физике
(электричество и магнетизм)

Электромагнитная индукция. Самоиндукция.



воспитанник ТУ, ассистент физическ. кабинета в 1822 - 1823 гг., адъюнкт Пбг-й АН с 1830 г., чрезыч. академик с 1830 г., академик с 1834 г. Один из выдающихся физиков XIX в., исследователь электромагнетизма и физической географии.

Москва 2012

Теоретическое введение.

Исследования Эрстеда, Ампера, Био, Савара и многих других ученых, установивших взаимную зависимость электрического тока и магнетизма позволили Джеймсу Клерку Максвеллу в 1860 – 1865 годах обобщить результаты многочисленных исследований и создать эмпирическую теорию электромагнитного поля, которая является основой классической электродинамики (в отличие от современной квантовой электродинамики Ричарда Фейнмана). Описание электромагнитного поля было сведено к нескольким рационализированным уравнениям (т.е. без учета конкретных параметров среды). Уравнения могут быть представлены как в дифференциальной форме (дифференциальные уравнения), так и в интегральной форме (интегральные уравнения). Здесь в описании мы приводим уравнения в интегральной форме исключительно для наглядного представления о их содержании, поскольку изучение уравнений входит в программы университетов.

$$\oint \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = - \int (\partial \mathbf{B} / \partial t) \, d\mathbf{S} \quad (1)$$

$$\oint \mathbf{B} \, d\mathbf{S} = 0 \quad (2)$$

$$\oint \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = \int \{ \mathbf{j} + (\partial \mathbf{D} / \partial t) \} \, d\mathbf{S} \quad (3)$$

$$\oint \mathbf{D} \, d\mathbf{S} = \int \rho \, dV \quad (4)$$

Эти уравнения, записанные в векторной форме, нельзя вывести на основе других уравнений. Их следует воспринимать как основные аксиомы, постулаты электродинамики, полученные путем обобщения множества экспериментальных фактов. В электродинамике они играют такую же роль, как законы Ньютона в классической механике. С помощью этих уравнений нельзя решать конкретные задачи, поскольку в них отсутствуют параметры, характеризующие индивидуальные свойства среды. Для выполнения расчетов реальных процессов их необходимо записать в скалярной форме, с дополнительными уравнениями, которые учитывают свойства среды и которые называются материальными уравнениями. Например, для изотропных, неферромагнитных и несегнетоэлектрических сред материальные уравнения могут быть записаны в виде:

$$\mathbf{D} = \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad \text{где}$$

ϵ , μ , σ - постоянные, характеризующие свойства среды, соответственно, диэлектрическая, магнитная проницаемость и электрическая проводимость среды. К наиболее общим свойствам электромагнитного поля, которые следуют из уравнений Максвелла, относятся следующие:

1. Из уравнения (1) следует, что изменение магнитного поля приводит к возбуждению электрического поля, появление которого приводит в движение заряженные частицы, например электроны и возникновению эдс. Это явление известно как явление электромагнитной индукции, открытое Майклом Фарадеем, которое он сформулировал в следующей форме:

$$\mathcal{E} = - d\Phi / dt \quad (5)$$

где $d\Phi = B dS$ (6)

т.е. изменение магнитной индукции в области проводника, которое приводит к возникновению эдс индукции, можно интерпретировать как изменение магнитного потока в неподвижном замкнутом контуре, т.е. $\Phi_1 - \Phi_2$. Изменение магнитного потока в контуре может быть связано с движением контура, например вращением. Тоже может происходить при перемещении проводника конечной длины в магнитном поле при пересечении им магнитных силовых линий. В этом случае тока в проводнике быть не может, поскольку проводник конечной длины не является замкнутым контуром. Однако благодаря разделению зарядов по знакам формируется разность потенциалов на концах проводника, т.е. эдс индукции, которая определяется следующим образом:

$$\mathcal{E} = B l v \sin \beta \quad \text{где}$$

B – индукция магнитного поля, [Тл]

l – длина проводника, [м]

v – скорость движения проводника, [м / с]

β – угол между силовыми линиями магнитного поля и плоскостью, которую занимает проводник при своем движении (или, что тоже самое, между вектором индукции магнитного поля и плоскостью).

2. Из уравнения (2) следует, что поток вектора B через произвольно замкнутую поверхность всегда равен нулю. В отличие от потока вектора напряженности электрического поля поток вектора магнитной индукции через произвольно замкнутый контур всегда равен нулю, т.е. сколько их входит в контур, столько и выходит. Они не могут начинаться в произвольной точке пространства и заканчиваться. Это значит, что магнитные силовые линии замкнуты. Это также значит, что магнитных зарядов, подобных электрическим, не существует, т.е. магнитное поле возникает не благодаря наличию магнитных зарядов, а благодаря

движению электрических зарядов или наличию электрического тока, хотя Полем Дираком было показано, что теоретически никаких ограничений для существования магнитных зарядов (монополей) не существует. Число силовых линий, пронизывающих контур, обладающий единичной площадью поверхности перпендикулярной силовым линиям, численно равно величине индукции магнитного поля (6).

3. Из уравнения (3) следует, что наличие электрического тока (первое слагаемое в уравнении), приводит к возникновению магнитного поля. Это явление известно, как возникновение магнитного поля вокруг проводника с током, а также вокруг движущегося электрического заряда, как закон Био-Савара-Лапласа, который записывается в следующей форме:

$$dB = (\mu \mu_0 I / R^3) [r dl]$$

Второе слагаемое в уравнении (3) описывает возбуждение магнитного поля при изменении электрического поля, т.е. переменное электрическое поле является источником магнитного поля. Даже в вакууме всякое изменение электрического поля во времени возбуждает в окружающем пространстве магнитное поле. Это открытие всецело принадлежит Максвеллу. Оно аналогично открытию электромагнитной индукции, согласно которому переменные магнитные поля возбуждают электрические. Как следствие сказанного, здесь следует отметить, что неподвижные электрические заряды не создают магнитное поле и, следовательно, не взаимодействуют с внешним магнитным полем.

4. Наконец из уравнения (4) следует, что поток вектора D , индукции электрического поля, сквозь любую замкнутую поверхность равен сумме зарядов, охватываемых этой поверхностью. Это уравнение является прямым следствием теоремы Остроградского-Гаусса, которая связывает поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность с полным зарядом внутри этой поверхности.

Кроме того, из уравнений следуют более общие свойства электромагнитного поля:

1. Изменяющиеся во времени электрическое и магнитное поля нельзя рассматривать как независимые. Изменение во времени магнитного поля приводит к возбуждению электрического. Изменение же поля электрического, в свою очередь возбуждает магнитное поле. За счет непрерывного взаимопревращения или взаимодействия они сохраняются и распространяются в пространстве. Однако если поля стационарные, т.е. $E = \text{const}$ и $B = \text{const}$, то в этом случае электрическое и магнитное поля существуют независимо друг от друга, что и позволяет изучать

отдельно постоянное электрическое поле и независимо от него постоянное магнитное поле.

2. Векторы напряженности электрического поля E , и индукции магнитного поля B и скорости распространения электромагнитного поля (волны) взаимоперпендикулярны и образуют правовинтовую систему, рис 1, что является внутренним свойством электромагнитного поля, не зависящим от выбора системы координат.

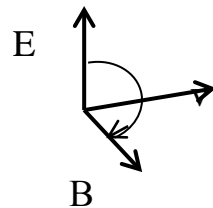


Рис. 1.

3. Векторы E и B всегда колеблются в одинаковых фазах, причем между мгновенными значениями E и B в любой точке существует связь:

$$\sqrt{\epsilon \epsilon_0} E = \sqrt{\mu \mu_0} H$$

т.е. E и B одновременно достигают максимума и одновременно обращаются в ноль.

4. Скорость распространения электромагнитного поля в непроводящей неферромагнитной среде равна:

$$v = c / \sqrt{\epsilon \mu} \quad c = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$$

Важной характеристикой магнитного поля является магнитная индукция, которая служит мерой силового воздействия поля на заряды, токи, вещество и другие магнитные поля. Магнитное поле характеризуется также напряженностью магнитного поля. Напряженность магнитного поля – это векторная физическая величина, являющаяся количественной характеристикой магнитного поля. Эта величина не зависит от свойств окружающей среды. В среде с магнитной проницаемостью μ магнитная напряженность определяет тот вклад в магнитную индукцию, который дают внешние источники поля, например, электрический ток. Индукция магнитного поля B связана следующим соотношением с напряженностью магнитного поля H .

$$B = \mu \mu_0 H \quad \text{где}$$

μ - магнитная проницаемость среды

μ_0 - магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

Из соотношения можно сделать заключение, что силовые свойства поля возникают благодаря магнитным свойствам среды (μ и μ_0).

Основным параметром конечно, является индукция магнитного поля B . Это — силовой вектор, и его следовало бы называть напряженностью магнитного поля в веществе, по аналогии с напряженностью электрического поля E , которое тоже является силовой характеристикой. Однако по историческим причинам напряженностью магнитного поля в веществе называют вектор H , а силовой параметр B получил неудачное название магнитной индукции. Такая нерациональная терминология сложилась потому, что исторически учение о магнетизме развивалось по аналогии с электростатикой. Источниками магнитного поля считались магнитные заряды, а их, как было установлено позднее, в действительности не существует. Однако традиционно приходится пользоваться этой нерациональной терминологией ввиду того, что она общепринята.

Явление самоиндукции.

Явление электромагнитной индукции и, в частности, самоиндукции принято связывать с правилом Ленца.

Генрих Фридрих Эмиль Ленц, портрет которого помещен на титульный лист, родился в г. Дерпте, ныне г. Тарту, 12 февраля 1804 года. Там же получил образование в университете, специализируясь на теологии, филологии и естественных науках. В 1827 году получил степень доктора в Гейдельбергском университете. С 1830 года, приехав в Санкт-Петербург, преподавал в Михайловском артиллерийском училище, одновременно будучи академиком и директором физического кабинета при Академии наук. С 1836 года преподает на кафедре физики Санкт-Петербургского университета, являясь деканом физического факультета. Среди многочисленных научных работ Ленца особенно известны две: “Об определении направления гальванических токов, возбуждаемых электродинамической индукцией”, 1834 г и “О законах выделения тепла гальваническим током”, 1843 г. известных как правило Ленца и закона Джоуля - Ленца. Многочисленные труды Ленца дают основание считать его одним из создателей учения об электричестве и магнетизме. Помимо научной работы Ленц уделял огромное внимание преподавательской работе. Его “Руководство к физике для русских гимназий” выдержало 11 изданий. Участвовал в кругосветной научной экспедиции, а также в экспедициях по Кавказу и Каспию. Скончался 29 января 1865 года в Риме. Там же похоронен.

Наиболее известный и простой опыт, демонстрирующий проявление электромагнитной индукции, связан с изменением магнитной индукции, а, следовательно, и с изменением магнитного потока в области катушки путем перемещения магнита вблизи катушки или внутри нее, которое приводит к возникновению эдс в катушке. При этом, в соответствии с правилом Ленца, эдс в катушке приводит к возникновению магнитного поля, которое противодействует изменению внешнего магнитного поля. Если внешнее магнитное поле возрастает, то противодействующее поле тоже пропорционально возрастает, но с противоположным направлением вектора магнитной индукции, противодействуя возрастанию внешнего магнитного поля. Если внешнее магнитное поле уменьшается, противодействующее поле возрастает. Однако вектор его индукции уже направлен в ту же сторону, что и у внешнего магнитного поля. Тем самым индуцированное поле противодействует уменьшению внешнего магнитного поля, стремясь сохранить его исходную величину. Этим объясняется наличие минуса в правой части уравнений электромагнитной индукции (1 и 5).

Однако уравнение (5) можно записать в ином виде, заменив изменение магнитного потока

$$d\Phi = L dl / dt \quad \text{где}$$

L - индуктивность проводников,

dl / dt - скорость изменения тока в цепи с индуктивностью.

Тогда закон электромагнитной индукции примет вид:

$$\mathcal{E} = - L dl / dt \quad (6)$$

Одним из следствий проявления электромагнитной индукции является самоиндукция, которая проявляется в электрических цепях с индуктивностью. В действительности индуктивностью обладают все без исключения проводники в большей или меньшей мере также как и емкостью. Величина индуктивности зависит от формы и размеров проводника. Чем больше длина проводника, тем больше его индуктивность (в частности катушек). Индуктивность проводников и катушек прямо пропорциональна магнитной проницаемости окружающей среды. Индуктивность измеряется в Генри [Гн]. Например, индуктивность цилиндрической катушки можно вычислить по формуле:

$$L = (\mu \mu_0 / 4 \pi) n^2 d K \quad [\text{Гн}] = [\text{В с} / \text{А}] \quad \text{где}$$

μ - магнитная проницаемость среды,

μ_0 - магнитная постоянная,

n - число витков обмотки,

d - средний диаметр катушки,

K - коэффициент, зависящий от отношения длины катушки к ее диаметру, т.е. d/l . При $d/l = 1$, $K = 6,79$.

При $d/l = 0,01$, $K = 34,5$.

Следует отметить, что аналогичную роль в электростатике выполняет емкость проводника, которая также зависит только от размеров и формы проводника, а также от диэлектрической проницаемости среды.

Для понимания самоиндукции рассмотрим электрическую цепь, рис. 1.

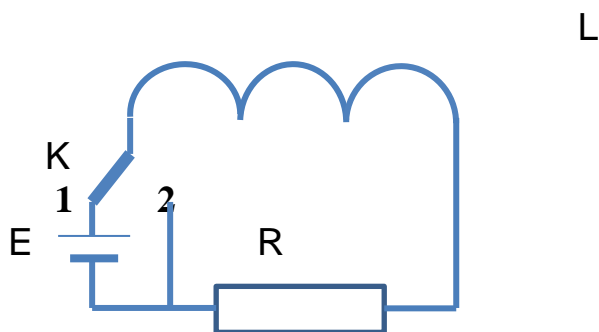


Рис. 1.

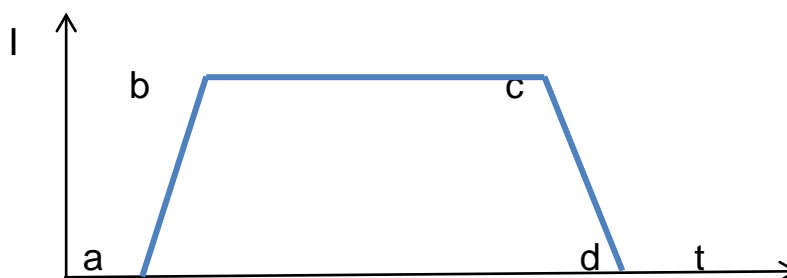


Рис. 2

На схеме показана катушка индуктивности L , и последовательно соединенные с ней активное сопротивление R , коммутатор (выключатель) K и источник тока E . Если коммутатор замкнуть, на источник тока, положение коммутатора **1**, то в катушке начнет

нарастать ток от источника тока $I_{\text{ист}}$, рис. 2, участок ab . (Следует иметь в виду, что процесс на рис. 2 показан в весьма упрощенном виде). В соответствии с законом электромагнитной индукции нарастающий ток источника тока dI/dt создаст в катушке нарастающее магнитное поле, которое возбудит в катушке эдс индукции \mathcal{E} , соответственно, электрический ток, который станет вторичным по отношению к исходному току источника $I_{\text{ист}}$. Этот вторичный индуцированный ток, который принято называть током самоиндукции $I_{\text{син}}$, в соответствии с правилом Ленца, будет направлен навстречу первичному току и будет противодействовать его нарастанию. На участке bd , при неизменном токе в цепи, электромагнитной индукции происходить не будет. Далее, если коммутатор переключить в положение **2**, энергия, накопленная в индуктивности начнет рассеиваться на резисторе в виде тепла в соответствии с законом Джоуля-Ленца. Ток в цепи будет падать, рис. 2, отрезок cd . В соответствии с правилом Ленца при уменьшении тока в цепи, снова в катушке возникнет противоэдс \mathcal{E} , соответственно, ток самоиндукции $I_{\text{син}}$, который в этом случае будет течь в том же направлении, что и ток источника $I_{\text{ист}}$, поддерживая, тем самым, ток в цепи и не давая ему уменьшиться. Как уже было показано (6), эдс самоиндукции \mathcal{E} , соответственно, ток самоиндукции зависит от величины индуктивности и скорости нарастания тока в цепи.

Для визуального наблюдения самоиндукции и измерения эдс и тока самоиндукции схему на рис. 1 можно модифицировать. Вместо ручного переключения коммутатора, переключение тока в цепи можно осуществлять с помощью генератора импульсов, наблюдая при этом за процессом с помощью осциллографа, рис. 3.

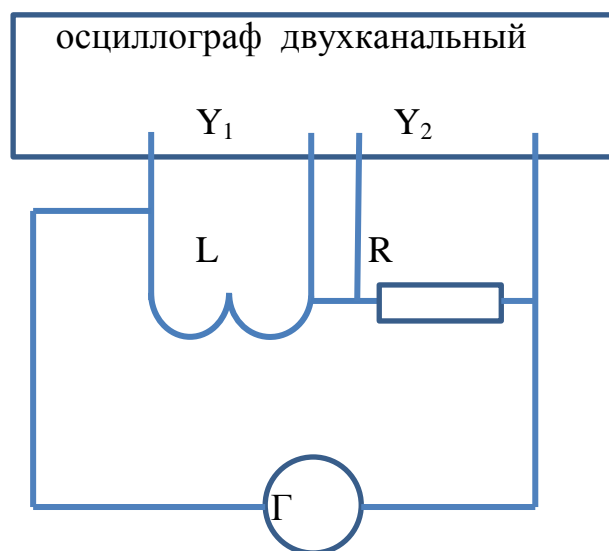


Рис. 3.

В исходном состоянии, без подключенной индуктивности и активного сопротивления (на схеме, рис. 3 это не показано) на экране осциллографа будет видна последовательность прямоугольных импульсов, приходящих с выхода генератора импульсов, осциллограмма, рис. 4. На осциллограмме видно, что нарастание напряжения, участок ab

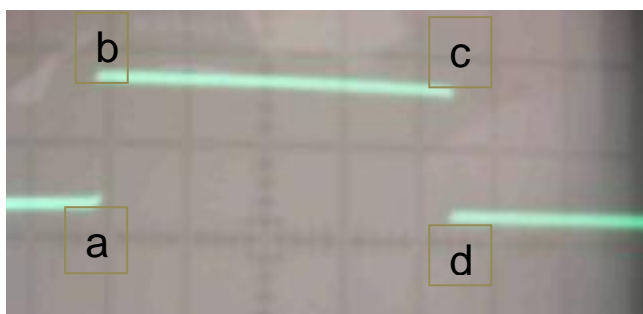


Рис. 4.

(которое называют передним фронтом импульса) и спад напряжения cd (которое называют задним фронтом импульса) имеют относительно короткое время и импульс в целом имеет почти прямоугольную форму. При этом в течение времени между фронтами, bc напряжение не изменяется (эта часть импульса называется крышей импульса). В течение этого времени можно считать, что по цепи течет постоянный ток, который равен:

$$I_0 = E / R \quad \text{где}$$

E - амплитуда импульса, которую можно принять за величину эдс источника,
 R - активное сопротивление.

Сопротивление источника эдс нужно считать пренебрежимо малым.

Рассмотрим вначале режим размыкания цепи, рис. 3, т.е. задний фронт импульса cd (спад импульса). Момент начала спада импульса примем $t = 0$, т.е. начало заднего фронта соответствует отключению в цепи эдс. Как только в цепи сила тока начнет убывать в катушке возникнет эдс самоиндукции, противодействующая этому убыванию. Тогда сила тока в цепи может быть описана уравнением:

$$I R + L \, dl / dt = 0$$

или $dl / dt + R I / L = 0$

или $dl / I = - R \, dt / L$

Проинтегрировав, получим:

$$\ln I = - R t / L + \text{Const}$$

С учетом дальнейших преобразований Const запишем, как $\ln \text{Const}$, потенцируя, получим:

$$I = \text{Const} \, e^{-R t / L}$$

Значение Const можно найти из начальных условий, при $t = 0$ сила тока была равна $I_0 = E / R$, следовательно $\text{Const} = I_0$. Тогда получим:

$$I = I_0 \, e^{-R t / L} \quad (8)$$

Таким образом, при прохождении заднего фронта импульса, (еще раз напоминаем, что это аналог размыкания цепи и отключения эдс) сила тока не падает сразу до нуля, как в исходном импульсе, а постепенно убывает по экспоненциальному закону из-за противодействия тока самоиндукции, кривая 1, рис. 4. При этом скорость убывания определяется отношением:

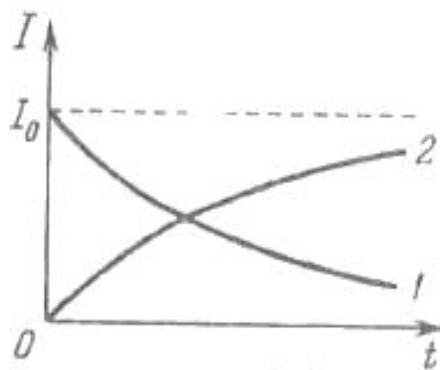


Рис. 4.

$$\tau = L / R \quad \text{или} \quad 1 / \tau = R / L$$

τ имеет размерность времени и называется постоянной времени цепи, т.е. это время в течение которого сила тока уменьшается в e раз. Тогда уравнение (8) окончательно можно записать в виде:

$$I = I_0 e^{-t/\tau} \quad (9)$$

Из формулы (8) видно, что чем больше индуктивность цепи L и меньше ее активное сопротивление, тем больше постоянная времени τ и тем медленнее спадает ток в цепи. Если же просто разорвать цепь с большой индуктивностью, возникающая противоэдс создаст искру или дугу в месте разрыва. Это приведет к оплавлению контактов.

В случае нарастания тока в цепи с индуктивностью (передний фронт импульса) будут происходить аналогичные процессы. Ток в цепи будет нарастать также по экспоненте, кривая 2, рис. 4.

На рис. 5 показаны осциллограммы импульсов с частотой повторения 100 Гц и скважностью, равной 2. (Скважностью называют отношение периода повторения импульсов к его длительности.) Соответственно длительность импульсов равна 5 миллисекундам (мс). На эюре, рис. 4 показаны исходные импульсы на выходе генератора, отключенного от RL цепи. В следующих парах эюр ab, cd, ef, gh каждая верхняя эюра соответствует изменению напряжения на активном сопротивлении R , каждая нижняя изменению напряжения на катушке индуктивности и, следовательно току самоиндукции $I_{\text{син}}$ катушки. На эюрах видно, что в момент начала импульса (передний фронт, эюра на рис. 4,) ток самоиндукции резко увеличивается до максимального значения, эюра b на рис. 5. При этом ток $I_{\text{син}}$ направлен в противоположную сторону и не дает быстро увеличиться току источника, эюра a рис. 5, следовательно, и падению напряжения на сопротивлении R , эюра a . Однако по мере спада тока $I_{\text{син}}$, эюра b , ток источника $I_{\text{ист}}$ достигает своего максимального значения, следовательно, и напряжение на сопротивлении R тоже достигает своего максимального значения, эюра b . Далее аналогичный процесс происходит с задним фронтом импульса cd рис. 4, т.е. при быстром спаде амплитуды импульса снова возникает ток самоиндукции $I_{\text{син}}$, эюра b , который в этом случае уже совпадает по направлению с током источника $I_{\text{ист}}$ и поддерживает его, не давая ему уменьшиться. На всех остальных эюрах зафиксированы аналогичные процессы, но с меньшей постоянной времени τ , т.е. $\tau_{ab} > \tau_{cd} > \tau_{ef} > \tau_{gh}$. Из осциллограм видно, что с уменьшением постоянной времени L/R спад тока самоиндукции происходит быстрее и поэтому импульс напряжения на сопротивлении R восстанавливается тоже быстрее, эюры a, c, e, g . Таким образом, чем меньше постоянная времени τ , тем меньше искажается импульс в электрической цепи.

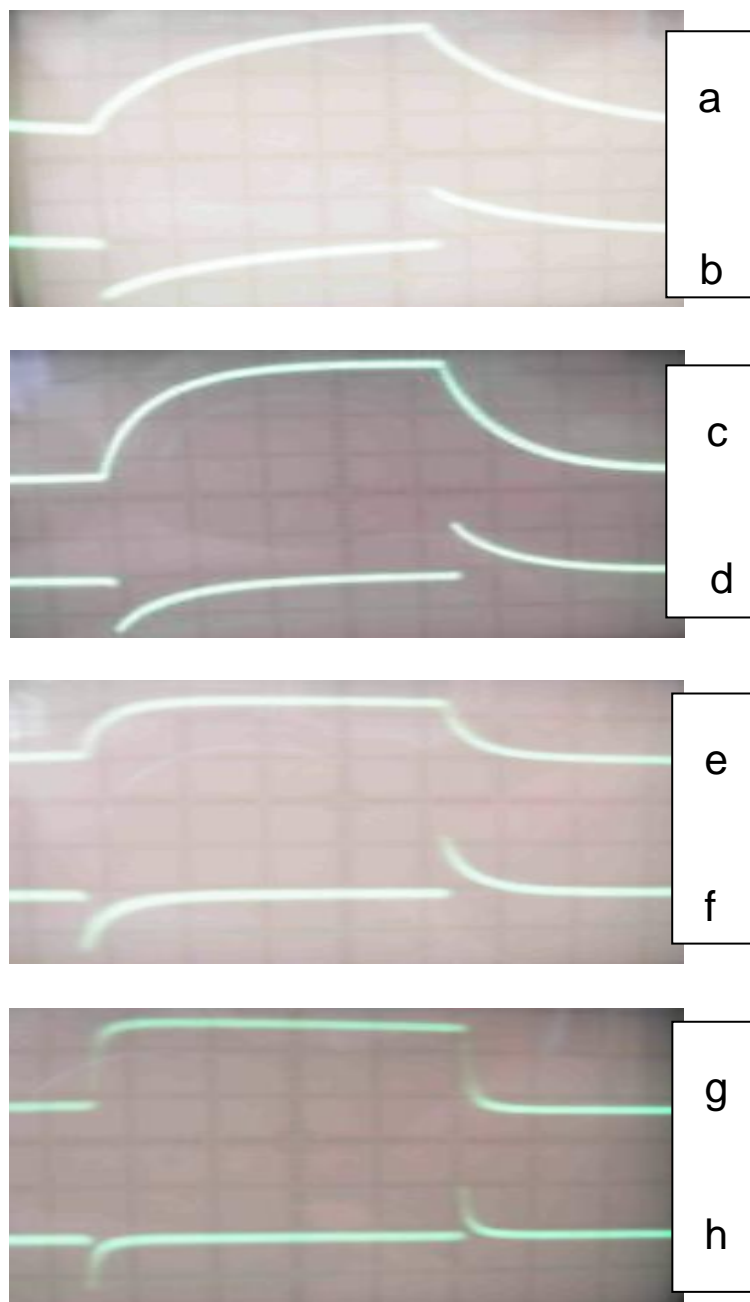


Рис. 5.

Явление самоиндукции в катушках индуктивности в RL цепях, а также в RC цепях очень широко используется в радиоэлектронных цепях для формирования импульсов с необходимыми параметрами. Такие цепи получили название интегрирующих и дифференцирующих цепей, в зависимости от действия, которые они производят с импульсом.

Описание экспериментальной установки.

В комплект оборудования для проведения эксперимента, рис.6 входит катушка индуктивности 1, которая состоит из двух секций с числом витков 2400 и числом витков 1200. Общее число витков равно 3600, что соответствует индуктивности 1,04 Генри (Гн). Генератор импульсов 2, который генерирует импульсы со скважностью 2. Магазин сопротивлений 3, посредством которого можно изменять активное сопротивление в электрической цепи и, соответственно, изменять постоянную времени τ . Двухканальный осциллограф 4, который предназначен для наблюдения переходных процессов одновременно на катушке индуктивности 1 и активном сопротивлении 3.



Рис.6.

Задание № 1

Исследовать явление самоиндукции, как составную часть электромагнитной индукции. В частности исследовать проявление самоиндукции в электрических цепях, содержащих индуктивность и активное сопротивление. Рассмотреть влияние постоянной времени $R L$ цепи на коммутирование электрического тока.

Последовательность выполнения эксперимента.

1. Прежде чем собрать рабочую схему нужно включить импульсный генератор и осциллограф. Затем на вход Y1 осциллографа подключить выход генератора импульсов. Установить частоту повторения импульсов на выходе генератора, равную 100 Гц и установить стабильную осциллограмму импульсов на экране осциллографа амплитудой примерно 2 В.
2. Убедившись в наличии импульсов с необходимыми параметрами на экране осциллографа, выключить приборы и собрать схему показанную на рис. 3.
3. По известной постоянной времени τ , указанной в таблице 1 и значению индуктивности катушки, равной 1,04 Гн, рассчитать и установить на магазине сопротивлений значение R. (В таблице постоянная времени указана в миллисекундах, мс).

Таблица 1

τ , мс	0,1	0,5	1	3	5	8	10	30	50	100
L, Гн										
R, Ом										
I, А										

4. Снова включить приборы и стабилизировать осциллограммы на обоих каналах осциллографа.
5. Сфотографировать или перерисовать с экрана осциллографа полученные осциллограммы для внесения их в отчет лабораторной работы. Фотографировать рекомендуется только те осциллограммы, постоянная времени которых в таблице 1 обозначена жирным цветным шрифтом.
6. По измеренному значению амплитуды напряжения импульса на сопротивлении R по закону Ома вычислить амплитуду импульса тока I_0 .
7. Затем вычислить силу тока I импульса для заднего фронта импульса длительностью 5 мс, т.е. для $t = 5$ мс для всех значений постоянной времени τ , по формулам (8) или (9).
8. Построить график функции (9), с помощью программы Logger Pro 3.
9. На основе полученных осциллограмм и графика объяснить процессы, протекающие на катушке индуктивности L и активном сопротивлении R.

Задание 2.

Наблюдать за изменением формы импульса в зависимости от изменения индуктивности катушки. Индуктивность катушки изменять путем перемещения в катушке сердечника из ферромагнитного сплава.

Последовательность выполнения эксперимента.

1. Установить R и L для постоянной времени $0,1$ мс.
2. Установить стабильное изображение на экране осциллографа.
3. Взять ферромагнитный сердечник катушки и опустить его в катушку. Поднимая и опуская сердечник наблюдать за изменением формы импульса на экране осциллографа.
4. Поставить постоянную времени равную $\tau = 10$ мс повторить п.п. 2 и 3.
5. Данные наблюдений внести в отчет лабораторной работы. Объяснить причину изменения формы импульсов, происходящую при перемещении сердечника в катушке индуктивности.

Контрольные вопросы.

1. Каковы условия возникновения электромагнитной индукции ?
2. Чем отличается электромагнитная индукция в отрезке проводника от электромагнитной индукции в замкнутом контуре ?
3. Какова природа электродвижущей силы (эдс) при возникновении электромагнитной индукции ?
4. В каком случае возникает явление самоиндукции ?
5. Что такое постоянная времени электрической цепи и от чего она зависит ?
6. Что называют интегрирующими цепями и какую роль они выполняют в электронных схемах ?

Литература.

1. Калашников С.Г. Электричество, М. Физматлит, 2003.
2. Мякишев Г. Я. Электродинамика, М. Дрофа, 2006.
3. Программа построения графиков Logger Pro 3.