

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра технической физики

Л.Н. Смурага, О.И. Авсеевич, Н.Ф. Галякевич

Изучение индуктивности и взаимной индуктивности в электрической цепи

Методическое руководство
к лабораторной работе по физике

для студентов инженерно-технических специальностей

Учебное электронное издание

Минск 2006

Авторы:

Л.Н. Смурага
О.И. Авсеевич
Н.Ф. Галякевич

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017) 293-77-52, факс (017) 293-91-37
E-mail: lsmuraga@bntu.by
Регистрационный № _____

© Смурага Л.Н., Авсеевич О.И., Галякевич Н.Ф., 2006
© БНТУ, 2006

Содержание

Цель работы.....	4
Контрольные вопросы.....	4
Литература.....	4
Краткое теоретическое введение.....	5
Явление самоиндукции в электрической цепи. Индуктивность контура и соленоида.....	5
Взаимная индуктивность.....	7
Экстратоки при замыкании и размыкании цепи постоянного тока.....	9
Индуктивность в цепи переменного тока.....	10
Физическая и математическая модель изучаемого явления. Метод расчета индуктивности.....	12
Метод измерения.....	14
Порядок выполнения работы.....	15

Цель работы: изучить явления самоиндукции и взаимной индукции в электрической цепи; научиться измерять индуктивность методом моста переменного тока.

Задачи эксперимента: определить индуктивность катушки; измерить взаимную индуктивность двух катушек и определить коэффициент их связи K ; вычислить относительную магнитную проницаемость сердечника катушек.

Контрольные вопросы

1. В чем сущность явления самоиндукции, взаимной индукции?
2. Записать законы Фарадея для самоиндукции и взаимной индукции.
3. Какие факторы влияют на индуктивность?
4. Записать формулу для определения индуктивности длинного соленоида?
5. Физический смысл коэффициента взаимной индуктивности.
6. Как влияет положение ферромагнитного стержня относительно катушки на его индуктивность?
7. По какому закону изменяются токи включения и отключения источника в цепи постоянного тока?
8. Какое сопротивление переменному току оказывает индуктивность цепи?
9. Сущность метода и принцип работы моста переменного тока?

Литература

1. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 4т., т. 2. – М.: Наука, 1977.
2. Атабеков, Г.А. Теоретические основы электроники. В 3т., ч. 1. – М.: Энергия, 1970.
3. Лабораторный практикум по физике ч. 2. Электричество и магнетизм. – Мн.: БПИ, 1974.
4. Матвеев, А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 1983.

Краткое теоретическое введение

● Слово *индукция* в переводе с латинского означает *наведение, возбуждение*. Закон электромагнитной индукции открыл в 1831 г. М. Фарадей, которого часто называют гением эксперимента. Он обнаружил, что в замкнутом контуре можно создать ЭДС тремя способами: двигая провод относительно магнита, двигая магнит относительно провода или меняя ток в соседнем проводе.

● Реальные электрические цепи обладают *сопротивлением R , емкостью C и индуктивностью L* . Эти элементы вызывают переходные процессы при коммутации токов (при включении и выключении).

Так, наличие емкости приводит к тому, что напряжение в цепи не может изменяться скачком. Индуктивность приводит к невозможности скачкообразного изменения тока. Наличие в цепи R , L и C элементов приводит в процессе переключений к затухающим колебаниям тока и напряжения.

Явление самоиндукции в электрической цепи. Индуктивность контура и соленоида

Ток в цепи создает в пространстве магнитное поле, магнитная индукция \vec{B} которого зависит от геометрического фактора, магнитных свойств среды и пропорциональна силе тока i . Поток Φ вектора \vec{B} через площадь, ограниченную токопроводящим контуром цепи, следует определить так:

$$\Phi = \int_S B_n dS ,$$

где B_n – проекция вектора \vec{B} на нормаль \vec{n} к поверхности dS ; S – площадь, ограниченная токопроводящим контуром цепи.

Этот поток пропорционален силе тока i :

$$\Phi = Li ,$$

где L – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии контура и относительной магнитной проницаемости среды μ .

Коэффициент L называют *индуктивностью* контура. Малой индуктивностью обладают цепи, в которых участки с токами, текущими в противоположных направлениях, максимально сближены. Большой индуктивностью обладают катушки, имеющие много витков провода, намотанных на сердечник из ферромагнитного материала. Если длина катушки значительно больше ее диаметра, а витки плотно уложены друг к другу, то такую катушку называют *соленоидом*. Пренебрегая искажениями магнитного поля на концах катушки, для полного магнитного потока Ψ через витки можно записать

$$\Psi = N\Phi ,$$

где N – число витков соленоида, Φ – магнитный поток через один виток. Величину Ψ называют *потокосцеплением*.

Индуктивность соленоида вычисляют по формуле

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} ,$$

где μ_0 – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость среды, S – площадь витка катушки, l – длина соленоида.

За единицу индуктивности принимают индуктивность такого контура, магнитный поток которого при токе в 1 ампер равен 1 веберу. Эта единица индуктивности называется *генри* ($1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб}/1 \text{ А}$).

При изменении силы тока в соленоиде будет изменяться и поток магнитной индукции через его витки. В результате изменения магнитного потока в соленоиде в нем возникает ЭДС. **Явление возникновения ЭДС индукции в проводнике при изменении в нем силы тока называют самоиндукцией.**

Согласно закону Фарадея, ЭДС самоиндукции в проводнике ε_L равна

$$\varepsilon_L = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(Li) = -(L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dt}).$$

Если контур проводника не деформируется и магнитная проницаемость среды не изменяется, то $L = \text{const}$, тогда ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_L = -L\frac{di}{dt}. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что индуктивность численно равна ЭДС самоиндукции, возникающей в проводнике при изменении в нем тока на 1 А за 1 с (т. е. $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вс}/\text{А}$).

ЭДС самоиндукции для соленоида

$$\varepsilon_L = -\frac{Nd\Phi}{dt}.$$

ЭДС самоиндукции зависит от значения L и пропорциональна скорости изменения тока. Знак минус в формуле (1) обусловлен правилом Ленца. Это правило согласуется с физическим принципом Ле Шателье и указывает на то, что индукционный ток, возникающий при прохождении тока в цепи, имеет такое направление, при котором он препятствует изменению основного тока в цепи. (Ле Шателье сформулировал общий физический принцип: воздействие на систему стимулирует в данной системе процессы, препятствующие этому воздействию).

Действительно, если ток со временем возрастает, то $di/dt > 0$ и $\varepsilon_L < 0$, т. е. ток самоиндукции направлен навстречу току, обусловленному внешним источником, и тормозит его возрастание. При убывании основного тока $di/dt < 0$ и $\varepsilon_L > 0$, т. е. индукционный ток имеет такое же направление, как и ток в контуре, и замедляет его убывание. Следовательно, контур, обладающий индуктивностью, имеет своеобразную электрическую инертность, проявляющуюся в том, что любое изменение тока в контуре тормозится тем больше, чем больше его индуктивность.

В электрических цепях постоянного тока ЭДС самоиндукции наблюдают при замыкании и размыкании цепи. Токи, обусловленные самоиндукцией, называют *экстратоками*. После установления тока $di/dt = 0$, и поэтому $\varepsilon_L = 0$.

Взаимная индуктивность

Рассмотрим два неподвижных контура (1 и 2 на рис.1), расположенных близко друг от друга. Если в контуре 1 течет ток i_1 , то магнитный поток, создаваемый этим током, пронизывает контур 2 (магнитное поле, создающее этот поток, изображено на рис. 1 сплошными линиями):

$$\Phi_{21} = M_{21}i_1, \quad (2)$$

где M_{21} – коэффициент пропорциональности (*коэффициент взаимной индуктивности*), учитывающий геометрию формы и положение контуров в пространстве.

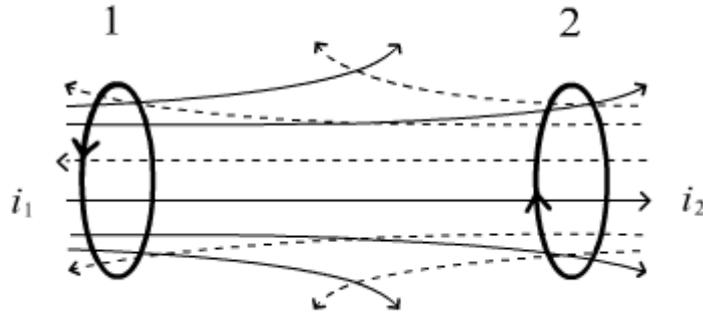


Рис.1

Формула (2) справедлива как для постоянного тока, так и для переменного при условии, что i_1 изменяется медленно.

При изменении тока i_1 , вследствие изменения магнитного потока Φ_{21} , в контуре 2 индуцируется ЭДС взаимной индукции ε_{21} для случая, если контур неподвижен или не деформируется ($M_{21} = \text{const}$).

$$\varepsilon_{21} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}.$$

ЭДС взаимной индукции ε_{21} в свою очередь вызовет в контуре 2 ток i_2 , который, как и i_1 , будет переменным. Ток i_2 создаст магнитный поток Φ_{12} (его поле изображено на рис.1 пунктиром), который пронизывает первый контур $\Phi_{12} = M_{12}i_2$ и индуцирует ЭДС ε_{12} в контуре 1, равную скорости изменения магнитного потока Φ_{12} , созданного током во втором контуре:

$$\varepsilon_{12} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M_{12} \frac{di_2}{dt}. \quad (3)$$

Контюры 1 и 2 называют *связанными*.

Возникновение ЭДС в одном из контуров при изменении тока в другом называют *взаимной индукцией*. Коэффициенты пропорциональности M_{21} и M_{12} называют *взаимной индуктивностью*. Установлено, что $M_{12} = M_{21} = M$ (теорема о взаимности), т. е. коэффициент взаимной индукции двух контуров (M) равен магнитному потоку, сцепленному с одним из контуров, когда ток в другом контуре равен единице.

Взаимная индуктивность зависит от геометрической формы, размеров, взаимного расположения контуров и от магнитных свойств среды, окружающей их. Взаимная индуктивность измеряется в тех же единицах, что и индуктивность – генри (Гн).

Из формулы (3) следует, что взаимная индуктивность двух контуров численно равна ЭДС индукции, возникающей в одном из этих контуров, когда ток в другом контуре изменяется на единицу за единицу времени.

Кроме ε_{21} и ε_{12} , в контурах возникают ЭДС самоиндукции, связанные с изменением собственных магнитных потоков Φ_{11} и Φ_{22} , вызванные токами i_1 и i_2 ; $\Phi_{11} = L_1 i_1$ и $\Phi_{22} = L_2 i_2$.

ЭДС самоиндукции соответственно в контурах 1 и 2 равны

$$\varepsilon_{11} = -\frac{d\Phi_{11}}{dt} = -\frac{d}{dt}(L_1 i_1) = -L_1 \frac{di_1}{dt},$$

$$\varepsilon_{22} = -\frac{d\Phi_{22}}{dt} = -\frac{d}{dt}(L_2 i_2) = -L_2 \frac{di_2}{dt}.$$

Суммарные ЭДС соответственно в контурах 1 и 2 равны

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{10} + \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} \quad \text{и} \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{22} + \varepsilon_{21},$$

где ε_{10} - стороннее ЭДС, действующее в контуре 1.

При $L = \text{const}$ и $M = \text{const}$

$$\frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{11}} = \frac{M}{L_1}.$$

Если взять соленоид с двумя обмотками, содержащими N_1 и N_2 витков соответственно,

$$\text{то } \frac{M}{L_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{или} \quad \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{11}} = \frac{N_2}{N_1}.$$

При малых токах в обмотках величина ε_{11} незначительно отличается от ε_{10} , поэтому можно считать, что $|\varepsilon_{21}| \approx \varepsilon_{10} \frac{N_2}{N_1}$. В этом состоит принцип действия трансформаторов переменного тока.

Экстратоки при замыкании и размыкании цепи постоянного тока

Для описания процессов в цепи постоянного тока схематически ее изображают в виде цепи с сосредоточенными параметрами L , R , ε (рис.2).

При замыкании ключа K в положение «1» в такой цепи кроме источника тока с ЭДС ε действует ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_i = -L \frac{di}{dt}.$$

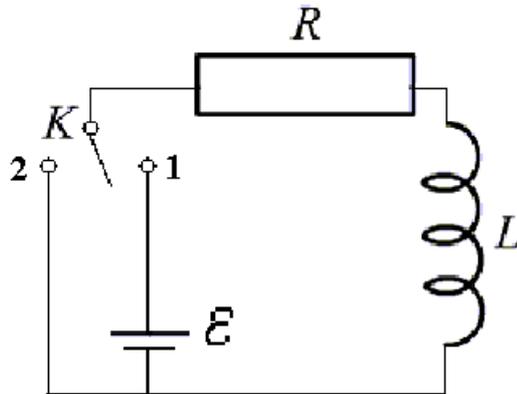


Рис. 2

Этот процесс можно описать с помощью уравнения Кирхгофа

$$\varepsilon - L \frac{di}{dt} = iR, \quad (4)$$

где ε – ЭДС источника; $-L \frac{di}{dt}$ – ЭДС самоиндукции; iR – падение напряжения в цепи.

Решение уравнения (4) имеет вид

$$i = i_0 \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}}\right), \quad \text{где} \quad i_0 = \frac{\varepsilon}{R}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что ток в цепи нарастает по экспоненциальному закону при включении источника (кривая 2 на рис. 3). Это объясняется правилом Ленца, согласно которому дополнительные токи, возникающие вследствие самоиндукции, направлены так, чтобы противодействовать изменению основного тока в цепи. Скорость нарастания тока в цепи определяется параметрами L , R , ε .

При замыкании ключа K в положение «2» процесс в цепи будет описываться уравнением Кирхгофа

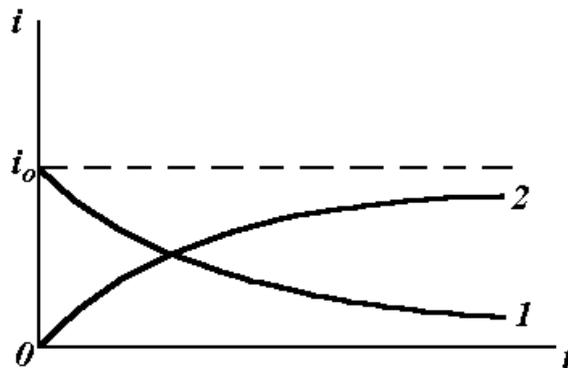
$$-L \frac{di}{dt} = iR,$$

решение которого имеет вид

$$i = i_0 e^{-\frac{Rt}{L}}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что после отключения источника ЭДС сила тока в цепи не обращается мгновенно в нуль, а убывает по экспоненциальному закону (кривая 1 рис.3). Скорость убывания тока определяется имеющей размерность времени, величиной $\tau = \frac{L}{R}$, которую называют постоянной времени цепи, представляющая собой время, в течение которого сила тока уменьшается в e раз. Из формулы для τ следует, что чем больше индуктивность цепи L и меньше ее сопротивление R , тем больше постоянная τ и тем медленнее спадает ток в цепи.

Рис. 3. Изменение силы тока в цепи, обладающей



индуктивностью, в моменты выключения (кривая 1) и включения (кривая 2) источника ЭДС

Формула (6) получена исходя из того, что цепь в момент отключения источника тока замыкается накоротко. Если просто разорвать цепь с большой индуктивностью, то возникающее высокое индуктивное напряжение (может значительно превысить ЭДС источника тока) создает искру или дугу в месте разрыва. Эти разряды вызывают электрическую эрозию контактов. Для борьбы с этим нежелательным явлением контакты шунтируют конденсаторами, сами контакты изготавливают из тугоплавких композиционных материалов.

Индуктивность в цепи переменного тока

В этой цепи (рис. 4) два источника ЭДС: $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \sin \omega t$, где ε_0 – амплитуда переменного напряжения, приложенного к клеммам, и $\varepsilon_2 = -L \frac{di}{dt}$ – ЭДС самоиндукции в цепи.

Уравнение Кирхгофа для этой цепи имеет вид

$$\varepsilon_0 \sin \omega t - L \frac{di}{dt} = iR \quad . \quad (7)$$

(Сумма ЭДС источников равна падению напряжения на омической нагрузке).

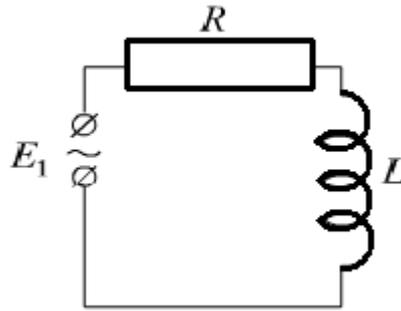


Рис. 4

Преобразовав выражение (7), получим дифференциальное уравнение, описывающее процессы в этой цепи:

$$\frac{di}{dt} + \frac{iR}{L} = \frac{\varepsilon_0}{L} \sin \omega t. \quad (8)$$

Этому уравнению должен удовлетворять установившийся переменный ток, определяемый уравнением

$$i = i_0 \sin(\omega t + \varphi),$$

где i_0 – амплитуда тока; ω – циклическая частота источника переменного напряжения; φ – сдвиг фаз между током и переменным внешним напряжением. Найдя $\frac{di}{dt} = i_0 \omega \cos(\omega t + \varphi)$ и подставив в (8), получим

$$i = i_0 \sin(\omega t + \varphi) + \frac{i_0 R}{L} \sin(\omega t + \varphi) = \frac{\varepsilon_0}{L} \sin \omega t. \quad (9)$$

Выражение (9) представим функциями простых тригонометрических аргументов:

$$i_0 \omega \cos \omega t \cos \varphi - i_0 \omega \sin \omega t \sin \varphi + \frac{i_0 R}{L} \sin \omega t \cos \varphi + \frac{i_0 R}{L} \cos \omega t \sin \varphi = \frac{\varepsilon_0}{L} \sin \omega t. \quad (10)$$

Выражение (10) выполняется при равенстве коэффициентов соответственно при $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$. Это условие позволяет выделить из уравнения (10) два уравнения:

$$i_0 \omega \cos \varphi + \frac{i_0 R}{L} \sin \varphi = 0 \quad (11)$$

и

$$-i_0 \omega \sin \varphi + \frac{i_0 R}{L} \cos \varphi = \frac{\varepsilon_0}{L}. \quad (12)$$

Из (11) получим

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{\omega L}{R}. \quad (13)$$

Следовательно, ток отстает по фазе от переменного напряжения на угол φ , равный

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(-\frac{\omega L}{R}\right).$$

В частности, при очень малом значении R ($R \ll \omega L$), ток отстает по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$.

Возводя в квадрат выражения (12) и (13) и складывая левые и правые части, получим

$$i_0^2 \omega^2 + i_0^2 \frac{R^2}{L^2} = \frac{\varepsilon_0^2}{L^2}.$$

Это выражение позволяет вычислить амплитуду переменного тока в цепи

$$i_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}}. \quad (14)$$

Выражение ωL в формуле (14) – индуктивное сопротивление цепи переменному току X_L :

$$X_L = \omega L.$$

Это сопротивление ограничивает ток без потребления энергии. Его называют *реактивным индуктивным сопротивлением*.

В практических целях для увеличения индуктивности катушку делают многослойной и вводят внутрь незамкнутый ферромагнитный сердечник. Такую катушку называют *дросселем*, ее применяют для ограничений переменного тока, а также в электро- и радиофильтрах.

Физическая и математическая модели изучаемого явления. Метод расчета индуктивности

Электрические цепи, в которых наводится ЭДС взаимной индукции, называют *индуктивно связанными*.

Для исследования индуктивных свойств электрической цепи в данной работе используют индуктивность, выполненную в виде длинной катушки.

Неоднородность магнитного поля, обусловленную краями катушки, не учитывают. Исследуемые катушки располагают на одном сердечнике, поэтому при расчетах магнитные свойства сердечника считают постоянными для двух катушек. В реальных условиях магнитная проницаемость сердечника зависит от тока в катушках и его частоты.

Рассмотрим простейший случай (рис.5), когда соленоид изготовлен двухслойным, с числом витков N_1 и N_2 в соответствующих слоях катушки. Если витки такого соленоида включены

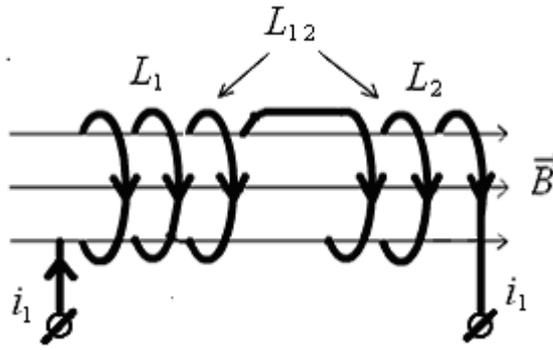


Рис. 5

так, что токи в них одинаковы и параллельны, то можно считать общее число витков N' равным

$$N' = N_1 + N_2.$$

Индуктивность такого соленоида L' в соответствии с формулой (8) равна

$$L' = \mu\mu_0 \frac{N'^2 S}{l} = \mu\mu_0 \frac{N_1^2 S}{l} + \frac{2\mu\mu_0 N_1 N_2 S}{l} + \mu\mu_0 \frac{N_2^2 S}{l}$$

или

$$L' = L_1 + L_2 + 2\sqrt{L_1 L_2}. \quad (15)$$

Если катушки подключить так, чтобы токи в витках обоих слоев стали антипараллельными, то тогда $N'' = N_1 - N_2$ и соответственно

$$L'' = L_1 + L_2 - 2\sqrt{L_1 L_2}. \quad (16)$$

Выражение $\sqrt{L_1 L_2}$, входящее в формулы (15) и (16), – коэффициент взаимной индуктивности M для этих катушек:

$$M = \sqrt{L_1 L_2}. \quad (17)$$

В частности, если в двухслойном соленоиде $N_1 = N_2$, то результирующая индуктивность его L'' , в соответствии с выражением (16) будет равна нулю. Такая намотка катушки называется *бифилярной*, она используется для изготовления проволочных безиндукционных сопротивлений.

Выражения (15) и (17) справедливы как для двухслойного соленоида, так и для катушек индуктивности, расположенных на одном замкнутом ферромагнитном сердечнике.

Если катушки находятся на незамкнутом сердечнике и разобщены геометрически, то взаимная индуктивность в результате рассеяния магнитных потоков будет меньше:

$$M = K\sqrt{L_1 L_2},$$

где K – коэффициент индуктивной связи. В общем случае $0 < K \leq 1$.

В предлагаемых измерениях, из-за частичного рассеяния магнитных потоков, уравнения (15) и (16) следует записать в форме

$$L' = L_1 + L_2 + 2M ;$$

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M .$$

Измерив индуктивности L_1 , L_2 , L' , L'' с помощью моста переменного тока индуктивности, находят коэффициент взаимной индуктивности M :

$$M = \frac{L' - L''}{4} \quad (18)$$

и коэффициент индуктивной связи K :

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} . \quad (19)$$

Метод измерения

Для измерения индуктивности катушек используется метод моста переменного тока, схема которого приведена на рис. 6, где L_x - катушка, индуктивность которой должна быть измерена; R_x - активное сопротивление катушки; R_2 и R_4 - магазины сопротивлений; C - эталонный конденсатор с параллельно присоединенным к нему резистором R_3 ; $И$ - нуль-индикатор.

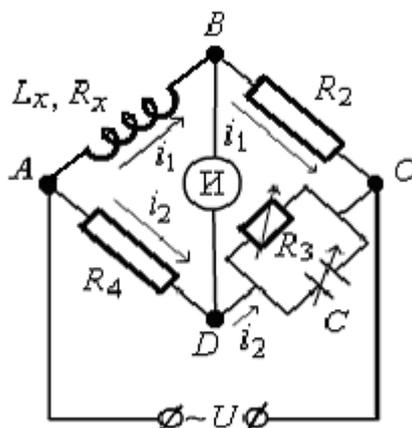


Рис. 6. Схема моста переменного тока

Метод моста основан на подборе емкости конденсатора C и сопротивления R_3 таким образом, чтобы ток в диагонали BD отсутствовал. Для этого необходимо достичь равенства напряжений и сдвига фаз на участках AB и AD и соответственно на участках BC и CD , что осуществимо при выполнении двух условий равновесия моста переменного тока $R_x = \frac{R_2 R_4}{R_3}$

и $L_x = CR_2 R_4$.

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать индуктивность катушки «А» по формуле $L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l}$, используя значения длины, диаметра, числа витков, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, $\mu = 1$, $S = \frac{\pi d^2}{4}$.

Примечание: Измерить индуктивность катушки можно с помощью:

а) измерителя Иммитанса Е7-15. Кнопки: «Параметры» в позицию «LC»; «Частота» в позицию 1 кГц;

б) Моста переменного тока Р5010. Кнопки: «Измерение» в позицию «L»; «Запуск» в позицию «АВТОМ».

2. Измерить индуктивность катушки «А».

Таблица 1

l	d	N	$L_{\text{выч}}$	$L_{\text{изм}}$
9,3 см	2,2 см	660		

3. Результат измерения занести в таб. 1. Сравнить вычисленное и измеренное значение индуктивности катушки «А».

4. Измерить индуктивность катушек 1 и 2 без сердечника тем же способом. Результаты измерений L_1 и L_2 записать в табл. 2 и 3.

Таблица 2

L_1 без сердечника	L_2^* с сердечником	$\mu_2 = \frac{L_2^*}{L_2}$	–	–	–
			–	–	–
L_2 без сердечника	L_2^{**}	$\mu_2^* = \frac{L_2^{**}}{L_2}$	L_1 без сердечника	L_1^{**}	$\mu_1^* = \frac{L_1^{**}}{L_1}$

5. Для исследования влияния магнитной проницаемости μ сердечника и зависимости μ от положения катушки относительно стержня ввести стержень только в катушку 2 и измерить индуктивность L_2^* . Результат записать в табл. 2. Вычислить эффективное значение μ_2 для этого случая.

6. Ввести полностью сердечник в катушки 1 и 2, и измерить значения L_1^{**} и L_2^{**} . Результат записать в табл. 2 и 3. Вычислить для этих значений μ_1^* и μ_2^* и записать в табл. 2.

7. Катушки 1 и 2 соединить последовательно, как показано на рис. 7, а, и измерить индуктивность L_{12}^1 системы. Результат записать в табл. 3.

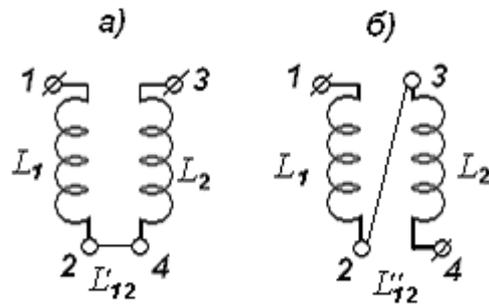


Рис. 7

8. Поменять местами провода в одной из катушек, соединив их при этом по схеме рис. 7, б. Измерить индуктивность системы L_{12}^{11} . Результат записать в табл. 3.

9. Вычислить значения M и K в соответствии с формулами (18) и (19). Результат записать в табл. 3.

Таблица 3

L_1 без сердечника	L_1^{**} с сердечником	L_2 без сердечника	L_2^{**} с сердечником	L_{12}^1	L_{12}^{11}	M	K

10. Измерить индуктивности L_3 и L_4 катушек 3 и 4, находящихся на замкнутом кольцевом сердечнике. Результат занести в табл. 4.

11. Выполнить измерения по пунктам 7 и 8 для катушек 3 и 4. Вычислить во формулам (18) и (19) M и K для этой пары катушек. Результаты измерений записать в табл. 4.

Таблица 4

L_3	L_4	L_{34}^1	L_{34}^{11}	M	K