

Е.В. Лушин

магистрант, кафедра «Авиационные приборы и устройства»,

*Арзамасский политехнический институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»*

А.Н. Долгов

*канд. тех. наук, доцент, кафедра «Авиационные
приборы и устройства»,*

*Арзамасский политехнический институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»*

СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКТИВНОСТИ

Аннотация. В статье рассмотрена причина появления индуктивности проводника. Отмечены полезные и паразитные стороны ее влияния на работу электрических цепей. Изучены основные способы измерения индуктивности с выявлением достоинства и недостатков. Обоснован выбор резонансного способа измерения индуктивности для построения измерительного прибора.

Ключевые слова: индуктивность, катушка индуктивности, измерение индуктивности, реактивное сопротивление.

E.V. Lushin, Nizhni Novgorod State Technical University (Arzamas Branch)

A.N. Dolgov, Nizhni Novgorod State Technical University (Arzamas Branch)

METHODS FOR MEASURING INDUCTANCE

Abstract. The article describes the cause of the inductance of the conductor. Marked useful and spurious by its effect on the electrical circuits. We study the main ways to measure inductance, identifying the advantages and disadvantages. The choice of the method of measuring the resonant inductance for constructing instrument.

Keywords: inductance, inductor, measurement of inductance, reactance

Природа возникновения индуктивности основана на взаимодействии тока и магнитного потока проводника. Согласно закону Фарадея известно, что при изменении магнитного потока Φ проводника, находящегося в магнитном поле, в проводнике возникает ЭДС, определяемая по формуле:

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

Из этого следует, что подключение проводника к источнику постоянного напряжения будет вызывать в нем протекание постоянного тока I , не мгновенно установившегося значения, обусловленного тем, что в проводнике индуцируется ЭДС, препятствующая нарастающему току. Ток перестает нарастать только, тогда когда магнитный поток перестанет изменяться. Если к проводнику подключить источник переменного напряжения, то ток и магнитный поток будут изменяться непрерывно и, наводимая в проводнике, ЭДС будет препятствовать протеканию переменного тока, что эквивалентно увеличению сопротивления проводника. При увеличении частоты измерения напряжения, приложенного к проводнику, величина наводимой ЭДС будет увеличиваться, следовательно, будет возрастать сопротивление проводника переменному току. Это сопротивление X_L не связано с потерями энергии, поэтому является чисто реактивным. При приложении к проводнику переменного тока, наводимая ЭДС будет равна

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -\omega L I_m \cos \omega t. \quad (2)$$

Она пропорциональна частоте ω , а коэффициентом пропорциональности является индуктивность L . Следовательно, индуктивность характеризует способность проводника оказывать сопротивление переменному току. Величина этого сопротивления равна:

$$X_L = \omega L. \quad (3)$$

Если проводник намотан на каркас, то образуется катушка индуктивности. В этом случае магнитный поток концентрируется, и величина индуктивности возрастает. Следует отметить, что индуктивность всегда положительна, а ее величина зависит только от геометрических размеров контура и магнитных свойств среды (сердечника).

Как было отмечено ранее, индуктивность определяет свойство проводника оказывать сопротивление переменному току, т.е. определение величины индуктивности проводника позволяет оценить его работу в электрической цепи, в которой он включен. Индуктивность может быть, как и необходимым параметром, задающим режимы работы электронных схем таких, как частотные фильтры, колебательные кон-

туры генераторов, индуктивные датчики, так и паразитным параметром, повышающим шумы, время быстрогодействия и тому подобные. Так, например, подключающие провода или контактные дорожки печатных плат должны обладать минимальным активным сопротивлением, не зависящим от частоты тока, однако они обладают индуктивной составляющей (хотя и незначительной), которая привносит в работу этих элементов искажения и потери энергии. Индуктивность как параметр, определяющий частотные характеристики измерительных каналов, может оказывать существенное влияние на измерительный сигнал датчиков, и даже полностью исказить его. Для улучшения качества работы электроники необходимо учитывать величину индуктивности тех или иных электронных узлов или деталей. Хотя индуктивность и возможно рассчитать в процессе проектирования по известным формулам с достаточно высокой точностью, все равно будут возникать неучтенные конструктивные и технологические факторы, оказывающие влияние на ее величину. Здесь незаменимым способом оценки индуктивности является ее непосредственное измерение с применением специальных методик и приборов [1].

Измерить индуктивность возможно тремя способами: 1) Вольтметра-Амперметра; 2) мостовой; 3) резонансный.

Очень важно перед измерением индуктивности катушки убедиться в отсутствии в ней обрыва и наличия короткозамкнутых витков. Для этого существуют свои специальные методики.

1. Сравнительно большие индуктивности порядка от 1 до 1000 Гн возможно измерять методом вольтметра - амперметра. Сущность этого метода заключается в том, что на катушку заданное переменное напряжение частотой $f = 50:1000$ Гц. Одновременно при этом замеряют полный ток (i), а полное напряжение (\dot{U}) посредством подключенных к катушке амперметра и вольтметра (рис. 1). Затем по закону Ома рассчитываются полное сопротивление [1]:

$$z_1 = \frac{\dot{U}}{i} . \quad (4)$$

Известно, что полное сопротивление катушки можно рассчитать по формуле:

$$z = \sqrt{R^2 + X_L^2} . \quad (5)$$

Как было сказано ранее данный метод применим для достаточно больших индуктивностей, что подразумевает собой существенное превышение реактивной составляющей над активной, с учетом малых активных потерь. Из этого следует, что $X_L \gg R$, поэтому активную составляющую (R) полного сопротивления (Z) можно отбросить, тогда будем иметь

$$Z \approx X_L = \omega L = 2\pi fL . \quad (6)$$

Приравниваем формулы (4) и (6) получим

$$\frac{\dot{U}}{i} \approx 2\pi fL . \quad (7)$$

Отсюда:

$$L_x \approx \frac{\dot{U}}{i2\pi f} . \quad (8)$$

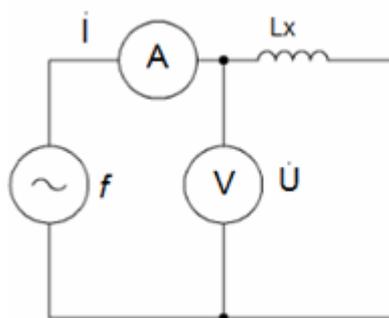


Рисунок 1 – Схема измерения индуктивности методом вольтметра–амперметра

Достоинство этого метода являются относительная простота и дешевизна при приемлемой точности для больших индуктивностей. Недостатком является то, что точность данного метода существенно зависит от величины соотношения активной и индуктивной составляющей сопротивления катушки.

Как было отмечено выше, данный способ применяется для индуктивностей большой величины (до 1000 Гн). С целью уменьшения габаритов, катушки изготавливаются с сердечниками. Наличие сердечника приводит к нелинейной зависимости магнитного потока от тока катушки. Отсюда следует, что измерение индуктивности катушек с сердечником по методу вольтметра-амперметра следует проводить в условиях близких к рабочему режиму. С учетом подмагничивания сердечника постоянной составляющей тока протекающего через катушку. Измерительная схема (рис. 2) будет иметь вид:

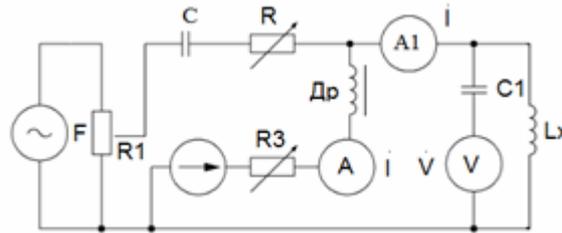


Рисунок 2 – Схема измерения индуктивности катушек с сердечником по методу вольтметра–амперметра

Режим работы катушки L_x задается установкой постоянного тока подмагничивания. Этот ток устанавливается реостатом R_2 и контролируется по миллиамперметру постоянного тока I_1 . Для исключения взаимного влияния измерительных цепей постоянного и переменного тока друг на друга применяются разделительный конденсатор C и дроссель Dr . Приборы измеряющие A_1 и V_1 в данной схеме не должны реагировать, на постоянные составляющие тока и напряжения (i) и (U). Для вольтметра V_1 этого легко добиться включив с ним последовательно разделительную емкость C_p в несколько микрофарад. Достоинством данной схемы является возможность учета режима работы при наличии постоянного тока подмагничивания сердечника и его влияния на величину индуктивности.

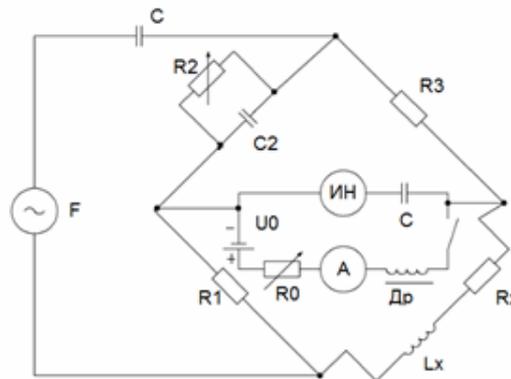


Рисунок 3 – Схема мостового метода

2. Рассмотренный выше метод измерения индуктивности основывается на допущении, что активные потери энергии в ней малы. Это условие сохраняет свою справедливость при высоких частотах тока протекающего через катушку. Однако при низкочастотных режимах работы катушки, от нескольких единиц до десятков и сотен Герц, или большом активном сопротивлении провода реактивная составляющая становится соизмеримой с активной, которую отбрасывать уже нельзя и необходимо учитывать. Осуществить такие измерения позволяет «мостовой метод».

Мост для измерения индуктивности включает в себя два плеча чисто активного сопротивления, плечо, с исследуемой индуктивностью сопротивлением которого в целом является комплексным, и плечо с реактивным элементом (конденсатор) (рис. 3).

Уравновешивание моста (то есть сведение показаний индикатора нуля (ИН) к нулю) осуществляется переменным конденсатором C_2 (R_2 шунтирующий резистор, служит для компенсации сопротивления потерь R_x , исследуемой катушки, которая создает фазовый сдвиг).

Мост будет уравновешен при выполнении следующих условий [1]:

$$\begin{cases} Z_x Z_2 = Z_1 Z_3, \\ \varphi_x + \varphi_2 = \varphi_1 + \varphi_3 \end{cases} \quad (9)$$

Учтем, что сопротивления плеч Z_1 и Z_3 чисто активные, поэтому будет иметь нулевые фазы в них $\varphi_1 = \varphi_3 = 0$, отсюда следует, что $\varphi_x = -\varphi_2$ и тангенсы фазовых углов будут равны $\operatorname{tg} \varphi_x = -\operatorname{tg} \varphi_2$. В плече Z_2 активная (R_2) и реактивная составляющие (C_2) параллельны, по этому при отрицательном значении угла φ можно записать, что:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = R_2 X_L = R_2 2\pi f C_2. \quad (10)$$

В плече Z_x реактивная и активная составляющая последовательны это значит, что тангенс фазы будет равен:

$$\operatorname{tg} \varphi_x = \frac{X_L}{R_x} = \frac{2\pi f L_x}{R_x}. \quad (11)$$

Согласно условиям равенства фаз будем иметь

$$\frac{2\pi f L_x}{R_x} = 2\pi f C_2 R_2. \quad (12)$$

Решая совместную систему (9) и уравнение (12) будем иметь соотношения для вычисления активной и реактивной составляющей исследуемой катушки:

$$L_x = C_2 R_1 R_3, \quad (13)$$

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}. \quad (14)$$

Следует отметить, что C_2 и R_2 могут быть оснащены шкалами для непосредственного указания значений R_x и L_x . Установки осуществляются с помощью C_2 и R_2 и не зависят друг от друга, что позволяет быстро уравнивать мост. Для измерения параметров катушек со стальными сердечниками, измеряемый мост добавляется схема с источником постоянного тока с регулировкой и контролем постоянного тока подмагничивания (аналогично схеме в первом методе). Достоинствами мостовой схемы являются ее более высокая чувствительность к малым значениям индуктивностей. Мостовой метод обладает более высокой степенью точности. К недостаткам такого метода можно отнести малую скорость измерения (мост надо балансировать) и сложность автоматики для такой балансировки.

3. Резонансный метод позволяет осуществлять измерение индуктивности катушек работающих на высокочастотных диапазонах колебаний. В данном методе исследуемая индуктивность L_x является частью резонансного контура, образованного подключением ее к образцовой емкости C_0 . Колебания f_0 в контуре $L_x C_0$ возбуждаются внешним генератором высокой частоты (ВЧ) (рис. 4). Генератор ВЧ подключается к контуру $L_x C_0$ через разделительный конденсатор C_1 (емкость 2-10 пФ).

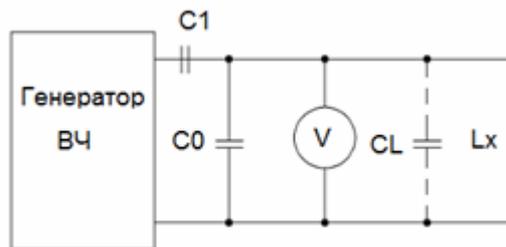


Рисунок 4 – Резонансная схема измерения индуктивности

Собственная (резонансная) частота контура $L_x C_0$ рассчитывается по известной формуле [1]:

$$\omega_{LC} = \frac{1}{\sqrt{L_x C_0}}. \quad (15)$$

При условии резонанса частот генератора и собственной контура то есть $\omega_{LC} = 2\pi f_0$, будем иметь следующее равенство:

$$2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_x C_0}}. \quad (16)$$

Задавая частоту генератором, и определяя наличие резонанса по показаниям вольтметра, включенного параллельно контуру, рассчитывают величину индуктивности, по формуле:

$$L_x = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_0}. \quad (17)$$

Следует отметить, что для исключения влияния на резонанс собственной паразитной емкости катушки C_L , измерительную емкость C_0 следует брать как можно большей, однако при измерении малых индуктивностей соотношение L_x/C_0 будет достаточно малым, что затруднит выявление показаний индикатора при резонансе. На практике принимают величину емкости C_0 порядка 1000 пФ.

Измерения можно также производить, применяя генератор с фиксированной настройкой частоты. При этом резонанса добиваются путем изменения величины емкости C_0 . Для расширения диапазона предусматривают работу генератора на нескольких переключаемых фиксированных частотах. Погрешность измерения индуктивностей резонансным методом лежит в пределах 3–10 %.

К недостаткам резонансного метода следует отнести необходимость оптимального выбора дополнительной емкости, с учетом противоречащих друг другу условий обеспечения точности и появления явного резонанса. К достоинствам следует отнести то, что резонансные схемы измерения индуктивностей и емкостей, можно объединить в одном приборе, так как они имеют общие элементы (ВЧ генератор, индикатор резонанса, элементы связи).

Сравнивая выявленные в статье достоинства и недостатки рассмотренных методов, можно сказать, что резонансный метод измерения является наиболее оптимальным для построения прибора. Резонансный метод при своей достаточной простоте (малое количество вспомогательных элементов измерительной цепи), обладает достаточной точностью. Кроме того, данный метод позволяет создать универсальный измерительный прибор (для измерения индуктивности и емкости), не внося существенных изменений в схему. Метод позволяет осуществлять измерения в широких пределах измеряемых значений причем, это никак не сказывается на его точности и сложности измерительных схем.

Список литературы:

1. Меерсон А.М. Радиоизмерительная техника. – М.: Энергия, 1978. – 408 с.
2. Попов В.С. Электротехнические измерения и приборы. – Изд. 7-е, перераб. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 544 с.
3. Шишмарев В.Ю. Средства измерений. – Изд. 4-е, стер. – М.: Академия, 2010. – 320 с.