

## Лабораторная работа №10 Определение индуктивности соленоида<sup>1</sup>

**Цель работы:** ознакомление с одним из методов определения индуктивности соленоида.

**Приборы и принадлежности:**



мультиметр – 2 шт.  
1 – амперметр,  
2 – вольтметр



генератор звуковой учебный ГЗМ



соленоид 1



соленоид 2



соединительные провода

*Для работы подготовлены соленоиды с разными параметрами.*

	Соленоид 1	Соленоид 2
число витков	$N = 452$	$N = 530$
длина соленоида	$l = 26,75$ см	$l = 52,0$ см
диаметр соленоида	$D = 7,2$ см	$D = 3,1$ см
диаметр проволоки	$d = 0,59$ мм	$d = 0,98$ мм

<sup>1</sup> Работа подготовлена в рамках выполнения ВКР студентом группы 5 «Д» факультета МФиИ Авсянником Вадимом Сергеевичем. Научный руководитель Романов Р.В. – 2013 год.

## Теоретическое введение

### 1. Электромагнитная индукция

Явление электромагнитной индукции, открытое Фарадеем, заключается в том, что в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток. Этот ток получил название индукционного тока и связан с возникновением в контуре ЭДС индукции.

Причины, вызывающие появление индукционного тока, могут быть различными: перемещение постоянного магнита относительно контура, перемещение другого контура с током относительно данного, изменение тока либо в другом контуре, либо в нём самом и т.д.

Максвелл установил, что во всех случаях ЭДС электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, то есть

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (10.1.1)$$

Знак «минус» в этой формуле соответствует правилу Ленца: индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей.

### 2. Самоиндукция

Эффект открыт независимо Генри (1832) и Фарадеем (1835).

Пусть есть проводник с током, который увеличивается по какой-либо причине. Этот ток создаёт также увеличивающееся магнитное поле. Но оно по правилу Ленца и закону электромагнитной индукции Фарадея создаёт противоположный ток. Явление называется самоиндукцией, а ток – экстратокком самоиндукции. Это частный случай закона электромагнитной индукции, когда поле создаётся самим током.

Так как  $B \sim I$ , следовательно,  $\Phi \sim B \sim I$ . Тогда

$$\varepsilon \sim -\frac{dI}{dt}.$$

Коэффициент пропорциональности, необходимый в этой формуле, получил название индуктивности проводника  $L$ .

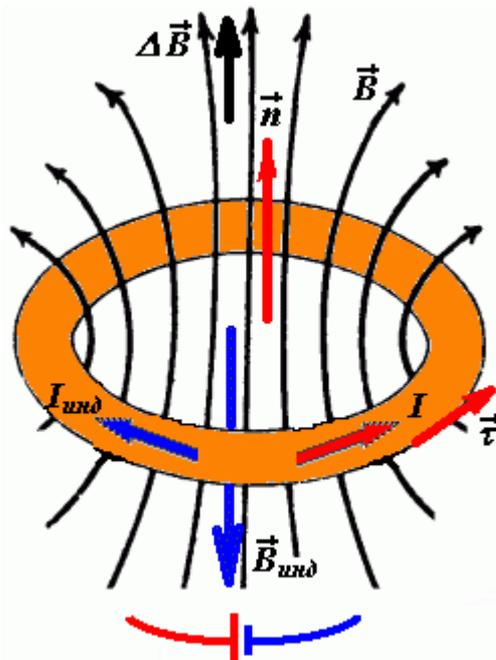


Рис.10.2.1

Параметр электрической цепи, определяющий величину ЭДС самоиндукции, наводимой в цепи при изменении протекающего по ней тока (или при её деформации), называется индуктивностью.

Тогда закон самоиндукции (или ЭДС самоиндукции)

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}. \quad (10.2.2)$$

### 3. Индуктивность

Индуктивность электрической цепи измеряется в генри (Гн).

Один генри – единица индуктивности SI, равная индуктивности такой цепи, в которой возникает ЭДС самоиндукции 1 В при равномерном изменении тока в ней со скоростью 1 А/с.

Индуктивность является характеристикой данного контура, определяющей его свойства в цепях переменного тока и зависящей от его формы и размеров, а также от магнитных свойств среды, в которой он находится. Если она изменяется, то

$$\varepsilon = -\left( L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} \right) = -\frac{d(LI)}{dt}. \quad (10.3.1)$$

Сравнивая (10.3.1) и (10.1.1), можно записать, что

$$\Phi = LI. \quad (10.3.2)$$

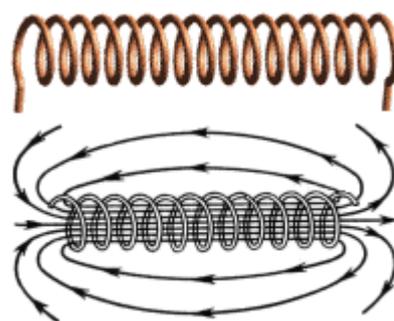


Рис. 10.4.1

### 4. Соленоид

Соленоид<sup>1</sup> (от греч. solen – трубка и eidos – вид) – это однослойная катушка цилиндрической формы, витки которой намотаны вплотную, а длина значительно больше диаметра. При протекании тока по проводнику внутри соленоида создаётся параллельное оси и достаточно однородное магнитное поле, напряжённость которого пропорциональна силе тока и числу витков. Внешнее магнитное поле подобно полю стержневого магнита.

Если в соленоиде длина много больше диаметра, то индукция магнитного поля определяется по формуле

$$B = \mu\mu_0 \frac{N}{l} I, \quad (10.4.1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $\mu$  – магнитная проницаемость среды,  $N$  – число витков соленоида,  $l$  – его длина,  $I$  – сила тока.

Магнитный поток через  $N$  витков соленоида равен

<sup>1</sup> Соленоид изобретён в 1820 г. А. Ампером (A. Ampere) для усиления открытого Х. Эрстедом (H. Oersted) магнитного действия тока и был применён Д. Араго (D. Arago) в опытах по намагничиванию стальных стержней. Свойства экспериментально изучены Ампером в 1822 г. (ФЭ. Т. 4, 1992. С.571).

$$\Phi = NBS = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} SI, \quad (10.4.2)$$

где  $S$  – площадь сечения соленоида. Сравнивая формулы (10.3.2) и (10.4.2) легко найти, что индуктивность соленоида

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S. \quad (10.4.3)$$

Если длина соленоида сравнима с его диаметром  $D$ , то в формулу (10.4.3) вводится поправочный множитель. Приближённо

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S \left(1 - \frac{4D}{3\pi l}\right), \quad (10.4.4)$$

Из формулы также следует, что при изменении магнитной проницаемости среды  $\mu$ , заполняющей соленоид, изменяется величина его индуктивности. В случае, когда средой, заполняющей соленоид, является ферромагнетик, индуктивность устройства будет зависеть от интенсивности его намагничивания, то есть от силы тока, создающего магнитное поле в соленоиде.

Сопротивление проволоки соленоида можно найти по формуле

$$R = \frac{4\rho a}{\pi d^2}, \quad (10.4.5)$$

где  $a$  – длина проволоки, из которой сделан соленоид,  $d$  – диаметр проволоки,  $\rho$  – удельное сопротивление проволоки.

## 5. Индуктивность, ёмкость и сопротивление в цепи переменного тока

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из сопротивления  $R$ , катушки индуктивности  $L$ , конденсатора ёмкостью  $C$ , к которым приложена внешняя переменная ЭДС.

Для данной цепи выполняется закон Ома, связывающий амплитудные значения силы тока и напряжения

$$I = I_m \sin(\omega t),$$

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

$$U_m = I_m |Z|,$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad Z = R + i\left(L\omega - \frac{1}{\omega C}\right), \quad (10.5.1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

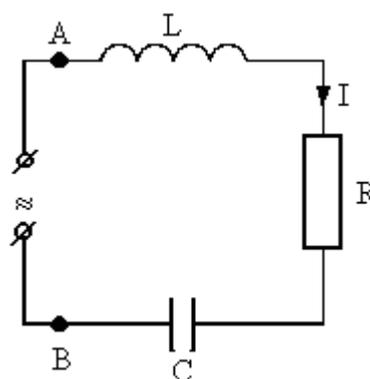


Рис. 10.5.1

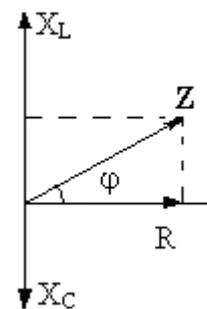


Рис. 10.5.2

Здесь  $Z$  – импеданс или полное сопротивление цепи переменного тока,  $R$  – омическое (активное) сопротивление,  $X_L = L\omega$  – индуктивное сопротивление,  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  – ёмкостное сопротивление,  $\omega = 2\pi\nu$  – циклическая частота. Величину  $X = X_L - X_C$  – часто называют реактивным сопротивлением.

Если в цепи отсутствует конденсатор, то из (10.5.1) можно получить

$$\frac{U_0}{I_0} = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}. \quad (10.5.2)$$

Измерительные приборы, как правило, показывают эффективные значения электрических величин  $U_s = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$  и  $I_s = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ .

Эффективным значением, например, силы переменного тока называют такую величину постоянного тока, который в омическом сопротивлении выделяет ту же мощность, что и переменный ток.

Следовательно

$$\left(\frac{U_s}{I_s}\right)^2 = R^2 + (L\omega)^2, \quad (10.5.3)$$



*Рис.10.5.4.*  
Общий вид установки

## Лабораторная работа №10

### Определение индуктивности соленоида

Выполнил студент \_\_\_\_\_  
 Факультет \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_  
 Проверил \_\_\_\_\_  
 Показания сняты \_\_\_\_\_  
 Зачтено \_\_\_\_\_

#### Порядок выполнения работы

##### Задание 1

1. Выпишите параметры используемого вами соленоида:

$N =$  \_\_\_\_\_ – число витков;       $D =$  \_\_\_\_\_ см – диаметр соленоида;  
 $l =$  \_\_\_\_\_ см – длина соленоида;       $d =$  \_\_\_\_\_ мм – диаметр проволоки.

2. Измерьте мультиметром активное сопротивление соленоида. Учтите, что у мультиметра есть собственная погрешность.

$R =$  \_\_\_\_\_ Ом,       $\Delta R =$  \_\_\_\_\_ Ом.

3. Соберите цепь по схеме 10.1. В качестве амперметра и вольтметра используйте мультиметры, установленные на соответствующие пределы измерения:

*По току – «переменный 2 А», по напряжению – «переменный 20 В».*

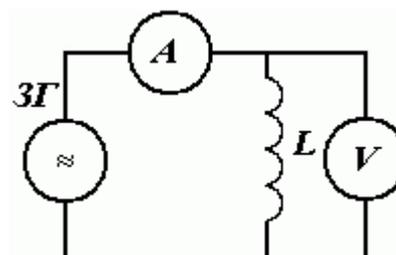


Схема 10.1

4. Установите ручку переключателя генератора на нужный множитель частот в диапазоне от 200 Гц до 2000 Гц. Используйте выход «общ÷5 Ом».

5. Включите генератор. Включите мультиметры. Подождите 3÷5 мин. Ручку «Усиление» поверните до максимума, наблюдая за показаниями мультиметров. Ток не должен превышать 1 ампера.

6. Вращая ручку на звуковом генераторе, изменяйте частоту тока от 200 Гц до 1000 Гц с шагом 100 Гц<sup>1</sup>, записывая показания тока и напряжения в таблицу 1.

Таблица 1

$\nu$ , Гц	$U$ , В	$I$ , А	$Z$ , Ом	$X_L$ , Ом	$L$ , Гн	$\nu^2$ , Гц <sup>2</sup>	$Z^2$ , Ом <sup>2</sup>
200							
300							
400							
500							
600							
700							
800							

<sup>1</sup> Показания приборов на 50 Гц достаточно нестабильны. Диапазон рабочих частот мультиметров 40÷1000 Гц.

900							
1000							

7. Рассчитайте модуль импеданса, индуктивное сопротивление и индуктивность для каждого случая по формулам

$$|Z| = \frac{U_3}{I_3}, \quad X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}, \quad L = \frac{X_L}{2\pi\nu}. \quad (10.П.1)$$

8. Результаты занесите в таблицу 1. Найдите среднее значение индуктивности и результат занесите в таблицу 2 (3 строка).

Таблица 2

1			$L$ , Гн		$R$ , Ом
2	Теоретические	$L_{теор} =$		$R_{теор} =$	
3	Измеренные	$L_{изм} =$		$R_{изм} =$	
4	По графику	$L_{эксп} =$		$R_{эксп} =$	

9. По указанию преподавателя по данным таблицы 1 постройте график зависимости  $L = L(\nu)$ . Сделайте вывод.

10. Рассчитайте по формуле (10.4.4) индуктивность соленоида по его геометрическим характеристикам. Результат занесите в таблицу 2 (2 строка).

11. Подумайте, как можно определить длину проволоки, из которой сделан соленоид, и рассчитайте её.

12. Рассчитайте по формуле (10.4.5) активное сопротивление соленоида. Удельное сопротивление меди  $\rho = (1,73 \pm 0,03) \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Результат занесите в таблицу 2 (2 строка).

13. Сравните измеренные и теоретические значения. Сделайте вывод.

## Задание 2

(Для студентов физических специальностей)

1. Заполните последние две колонки в таблице 1 и постройте график зависимости  $Z^2 = Z^2(\nu^2)$ .

2. Определите по графику методом наименьших квадратов коэффициент и свободный член в уравнении прямой, и рассчитайте индуктивность и активное сопротивление соленоида, исходя из формулы

$$Z^2 = 4\pi^2 L^2 \nu^2 + R^2. \quad (10.П.2)$$

3. Заполните последнюю строку в таблице 2. Сделайте выводы.

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон электромагнитной индукции и правило Ленца.
2. Дайте определение явления самоиндукции.
3. Дайте определение индуктивности проводника и единицы её измерения.
4. Какова роль индуктивности и сопротивления в цепи переменного тока?
5. Как определяется величина индуктивного сопротивления, ёмкостного сопротивления, полного сопротивления в цепи переменного тока?

### Литература

(см. основной список литературы)

### Приложение

масштабно-координатная бумага для построения графиков

