

ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ, СОДЕРЖАЩЕМ ИНДУКТИВНОСТЬ

ЦЕЛЬ: исследовать зависимости электрического сопротивления и индуктивности контура от частоты переменного тока.

ОБОРУДОВАНИЕ: миниблок «Катушка с сердечником», генератор напряжений специальной формы, мультиметры.

В в е д е н и е

Вынужденные электрические колебания происходят в контуре под действием переменного напряжения. Если в электрическую цепь, содержащую катушку с индуктивностью L , включить переменную ЭДС

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \omega t,$$

то в цепи, кроме ε , будет наводиться ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_s = -L di / dt.$$

Ток в таком контуре колеблется с той же частотой ω , что и приложенная ЭДС, но отстает по фазе на φ :

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

Амплитуда тока I_m пропорциональна амплитуде ЭДС:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{Z}, \quad (1)$$

где Z – полное сопротивление контура переменному току (импеданс контура),

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

R – активное сопротивление цепи; $X_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление цепи; L – индуктивность соленоида; $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота переменного тока; ν – частота тока.

Индуктивность характеризует свойство контура создавать собственное потокоцепление и равна магнитному потоку Φ_m , сцепленному с контуром, при единичном токе:

$$\Phi_m = L I.$$

Индуктивность контура зависит от его размеров, формы и магнитной проницаемости среды μ_r , окружающей контур. Например, величина индуктивности длинного соленоида

$$L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2 S}{l}, \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; N – число витков соленоида; S – площадь сечения сердечника соленоида; l – длина средней осевой линии сердечника.

Индуктивность соленоида с ферромагнитным сердечником зависит еще и от тока I , протекающего в обмотке. Это следует из того, что магнитная проницаемость ферромагнетиков μ_r зависит от напряженности H магнитного поля, которая определяется током в соленоиде:

$$H = NI / l.$$

М е т о д и з м е р е н и й

В данной работе измерение полного сопротивления цепи Z основано, согласно закону Ома (1), на измерениях действующих значений переменного тока I и напряжения U :

$$Z = \frac{U}{I}. \quad (4)$$

Согласно выражению (2) в случае малой величины активного сопротивления (как правило, $R \ll Z$) полное сопротивление соленоида совпадает с индуктивным:

$$Z = \omega L. \quad (5)$$

Это позволяет определить индуктивность по формуле

$$L = \frac{Z}{\omega} = \frac{1}{2\pi\nu} \frac{U}{I}, \quad (6)$$

измеряя сопротивление катушки переменному току известной частоты ν .

Напряжение, измеренное на обмотке соленоида, в соответствии с выражениями (4) и (5) зависит от частоты переменного тока:

$$U = IZ = I\omega L. \quad (7)$$

Зависимость $U(\omega)$, полученная при фиксированном значении тока I , по форме совпадает с зависимостью $Z(\omega)$ и является линейной, если индуктивность соленоида L постоянна (не зависит от частоты). В таком случае величину L определяют экспериментально по угловому коэффициенту прямой $U(\omega)$, равному $K = IL$. Согласно формуле (3) это соответствует постоянному значению магнитной проницаемости μ_r , что характерно для неферромагнитных сред.

Для соленоида с ферромагнитным сердечником, как было отмечено, индуктивность зависит от силы тока, протекающего по обмотке. Вид этой зависимости можно установить экспериментально, определяя индуктивное сопротивление соленоида при различных токах.

Таким образом, измеряя напряжение на обмотке соленоида при протекании переменного тока различной частоты (при фиксированной величине действующего значения I), можно экспериментально определить индуктивность соленоида и ее частотную зависимость.

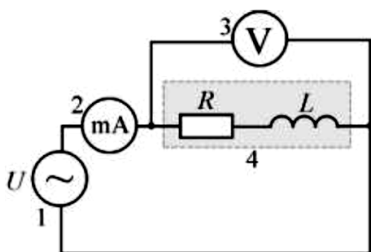


Рис. 1. Электрическая схема: 1 – генератор напряжений специальной формы; 2 – мультиметр (режим $A \sim 20 \text{ mA}$, входы COM, mA); 3 – мультиметр (режим $V \sim 2 \text{ В}$, входы COM, V Ω); 4 – миниблок «Катушка с сердечником», с индуктивностью L , сопротивлением R .

Катушка 4, имеющая индуктивность L и сопротивление R , и мультиметр 2, соединенные последовательно, подключают к генератору напряжений специальной формы 1. Напряжение на катушке измеряют мультиметром 3 с большим входным сопротивлением.

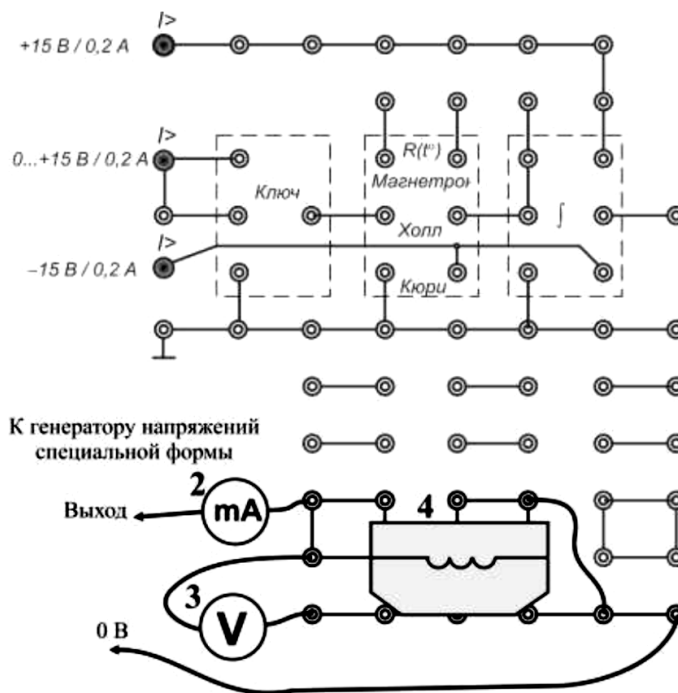


Рис. 2. Монтажная схема; 2, 3, 4 – см. рис. 1

П о р я д о к в ы п о л н е н и я р а б о т ы

Задание 1. Исследование зависимости полного сопротивления Z от частоты.

Выполнение измерений

1. С помощью мультиметра измерьте сопротивление R катушки и запишите его в табл. 1.
2. Соберите электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 2, подключив катушку L без сердечника.
3. Ручку «Амплитуда» генератора напряжений специальной формы поверните влево до упора. Установите ручку «Форма» в положение «». Включите генератор напряжений специальной формы.

Таблица 1

Катушка $R=$ Ом					
без сердечника			с ферромагнитным сердечником		
$I=$ мА			$I=$ мА		
ν , кГц	U , В	Z , Ом	ν , Гц	U , В	Z , Ом
2			200		
4			210		
6			220		
8			230		
10			240		
12			250		
14			260		
16			270		
18			280		
20					

4. Поворачивая ручку «Частота», установите максимальное значение частоты 20 кГц. С помощью ручки «Амплитуда» установите значение тока в цепи в пределах от 2 до 5 мА. При этом фиксированном значении тока измеряйте и записывайте в таблицу напряжение на катушке, изменяя частоту тока ν в соответствии с заданием (табл. 1).

ПРИМЕЧАНИЕ. По мере изменения частоты следует поддерживать фиксированный ток I , регулируя уровень сигнала ручкой «Амплитуда».

5. Установите сердечник в катушку. Проведите измерения, описанные в п. 4. Ток подбирайте (см. п. 4) при частоте 280 Гц.

Обработка результатов измерений

1. Вычислите полное сопротивление переменному току Z по формуле (4) и индуктивность по формуле (6). Сравнивая R и Z , убедитесь в справедливости приближения $R \ll Z$ для рабочих формул (5)–(7). Выполните это для обеих катушек.
2. Постройте графики зависимостей $Z = f(\omega)$ для обеих катушек.
3. В выводе по работе:
 - 1) сравните зависимости полного сопротивления Z от частоты двух соленоидов: с ферромагнитным сердечником и без него;
 - 2) отметьте особенности зависимости индуктивности от частоты для двух соленоидов.

Задание 2. Исследование зависимости индуктивности соленоида от тока.

Выполнение измерений

1. Используется та же электрическая цепь, что и в задании 1.
2. Подключите катушку L без сердечника. Установите частоту тока 10...15 кГц.
3. Изменяя силу тока ручкой «Амплитуда» (от 1 мА до 4 мА с шагом 0,2 мА), запишите в табл. 2 напряжение на соленоиде.
4. Установите ферромагнитный сердечник в катушку L и проведите измерения по п. 3 с частотой 200...220 Гц. Результаты занесите в табл. 2.

Катушка без сердечника				С ферромагнитным сердечником		
$\nu =$ Гц				$\nu =$ Гц		
$I, \text{мА}$	$U, \text{мВ}$	$Z, \text{Ом}$	$L, \text{Гн}$	$U, \text{мВ}$	$Z, \text{Ом}$	$L, \text{Гн}$
1,0						
1,2						
1,4						
1,6						
1,8						
2,0						
2,2						
2,4						
2,6						
3,0						
3,2						
3,4						
3,6						
3,8						
4,0						

Обработка результатов измерений

1. Вычислите значения Z и L по формулам (4) и (6) для обеих катушек.
2. Постройте графики зависимости $L = f(I)$. Сделайте выводы.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Запишите закон изменения тока в цепи при вынужденных колебаниях.
2. Чем определяются частота и амплитуда вынужденных колебаний?
3. Какая ЭДС вызывает вынужденные колебания?
4. Какие ЭДС действуют в колебательном контуре при вынужденных колебаниях? Запишите выражение для ЭДС самоиндукции.
5. Что характеризует и от каких величин зависит индуктивность цепи?
6. От каких параметров зависит полное сопротивление контура переменному току?
7. Чем объясняется зависимость индуктивности соленоида с ферромагнитным сердечником от частоты тока?
8. На чем основано измерение полного сопротивления цепи Z в данной работе?
9. Какой характер имеет зависимость $U(\omega)$, полученная при фиксированном значении тока I в случае соленоида без сердечника?
10. Какой прибор используется в работе в качестве источника переменного тока?
11. Укажите режим работы цифрового мультиметра при измерении напряжения на катушке (режимы и входы).
12. С какой целью в работе определяют активное R и полное сопротивление Z ?
13. Каким образом определяют в данной работе индуктивность катушки с сердечником и без него? Запишите рабочие формулы.

Л и т е р а т у р а

1. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высшая школа, 1989. – §§ 25.2, 28.3.
2. Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – М.: Наука, 1977. – §§ 219–220.

