

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. ИНДУКТИВНОСТЬ И ЕМКОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: определение зависимости индуктивного и емкостного сопротивлений от частоты, а также определение угла сдвига фаз тока и напряжения.

Теоретические положения

Электрический ток, изменяющийся с течением времени, называется переменным электрическим током. Электрический ток называется периодическим, если его значения повторяются через равные промежутки времени (периоды). В электротехнике чаще всего используется гармонический ток – периодический переменный электрический ток, меняющийся по закону косинуса или синуса.

Если на участок цепи, содержащий резистор (сопротивление резистора называют активным), подать напряжение, изменяющееся по гармоническому закону

$$U = U_m \cos \omega t \quad (8.1)$$

(U_m – амплитудное значение напряжения, В; ω – циклическая частота, рад/с; t – время, с), то мгновенное значение тока I в цепи определяется законом Ома:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t = I_m \cos \omega t,$$

где I_m амплитуда силы тока

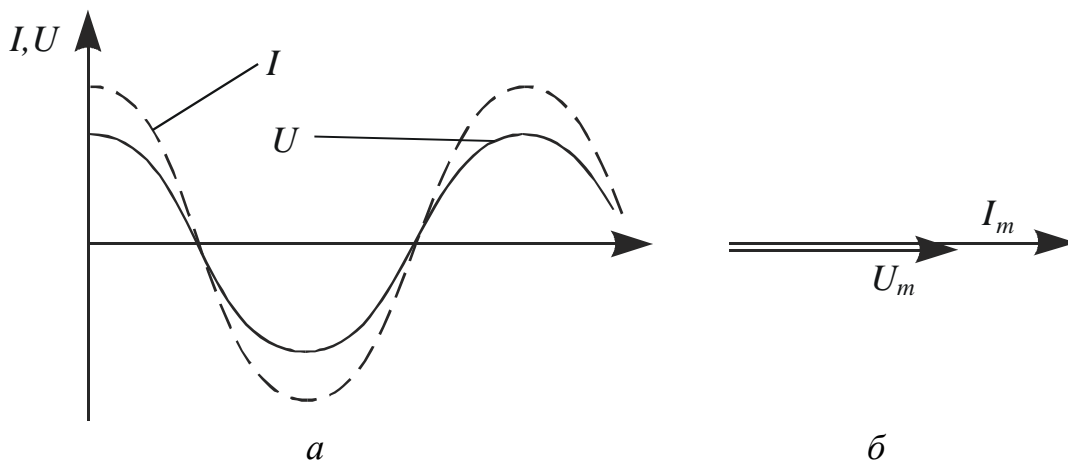


Рис. 8.1

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

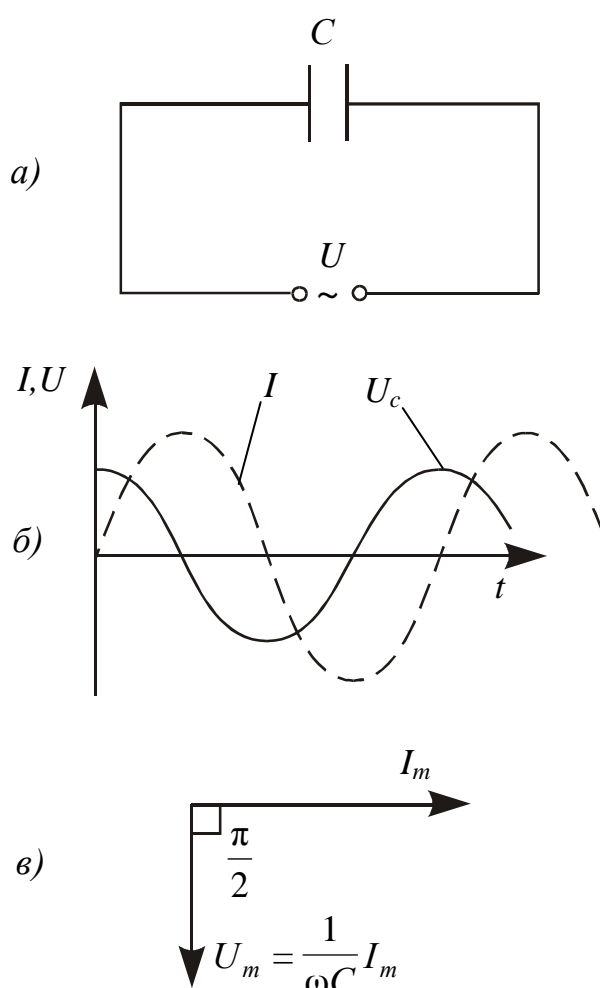


Рис. 8.2

На рис. 8.1,а приведены зависимости тока и напряжения от времени, а на рис. 8.1,б векторная диаграмма для амплитудных значений тока и напряжения. Как можно видеть из рисунков, сдвиг фаз между U_m и I_m равен нулю.

Рассмотрим электрическую цепь, содержащую конденсатор (рис. 8.2,а). Такая цепь является разомкнутой, так как обкладки конденсатора разделены диэлектриком и между ними не может протекать электрический ток. Следовательно, постоянный ток не может протекать по цепи, содержащей конденсатор.

Иначе обстоит дело с переменным током. Пусть к цепи, содержащей конденсатор, приложено переменное напряжение, изменяющееся по закону (8.1)

$$U = U_m \cos \omega t.$$

В этом случае конденсатор будет всё время перезаряжаться и по цепи потечёт переменный ток. Если сопротивлением подводящих

проводов можно пренебречь, то напряжение на конденсаторе

$$U_c = U = \frac{q}{C} = U_m \cos \omega t, \quad (8.2)$$

где q – заряд конденсатора в момент времени t , Кл; C – ёмкость конденсатора, Ф.

Мгновенное значение силы тока

$$I = \frac{dq}{dt} = -\omega C U_m \sin \omega t = I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (8.3)$$

где $I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{1/(\omega C)}$ – амплитудное значение тока, А.

Величина $R_C = \frac{1}{\omega C}$ называется реактивным ёмкостным

сопротивлением (или ёмкостным сопротивлением). Для постоянного тока ($\omega = 0$) $R_C = \infty$, т.е. постоянный ток в цепи, содержащей конденсатор, течь не может.

Сопоставление выражений (8.2) и (8.3) приводит к выводу, что колебания силы тока опережают колебания напряжения на конденсаторе на $\pi/2$, что наглядно видно на векторной диаграмме (рис. 8.2, в). Это означает, что в момент, когда конденсатор начинает заряжаться, сила тока максимальна, а напряжение равно нулю. После того как напряжение достигает максимума, сила тока становится равной нулю и т.д. (рис. 8.2, б).

Рассмотрим электрическую цепь, содержащую катушку индуктивностью L (рис. 8.3, а), омическим сопротивлением и ёмкостью которой можно пренебречь ввиду их малости. Если к клеммам цепи приложено напряжение, изменяющееся по гармоническому закону (8.1), то по цепи потечёт переменный ток, в результате чего в катушке возникает ЭДС самоиндукции

$$E_s = -L \frac{dI}{dt}.$$

Поскольку активное сопротивление катушки практически равно нулю, то и напряжённость электрического поля внутри проводника в любой момент времени должна равняться нулю. Иначе сила тока, согласно закону Ома, была бы бесконечно большой. Отсюда следует, что напряжённость вихревого

электрического поля \vec{E}_i , порождаемого переменным магнитным полем, в точности уравнивается в каждой точке проводника напряжённостью

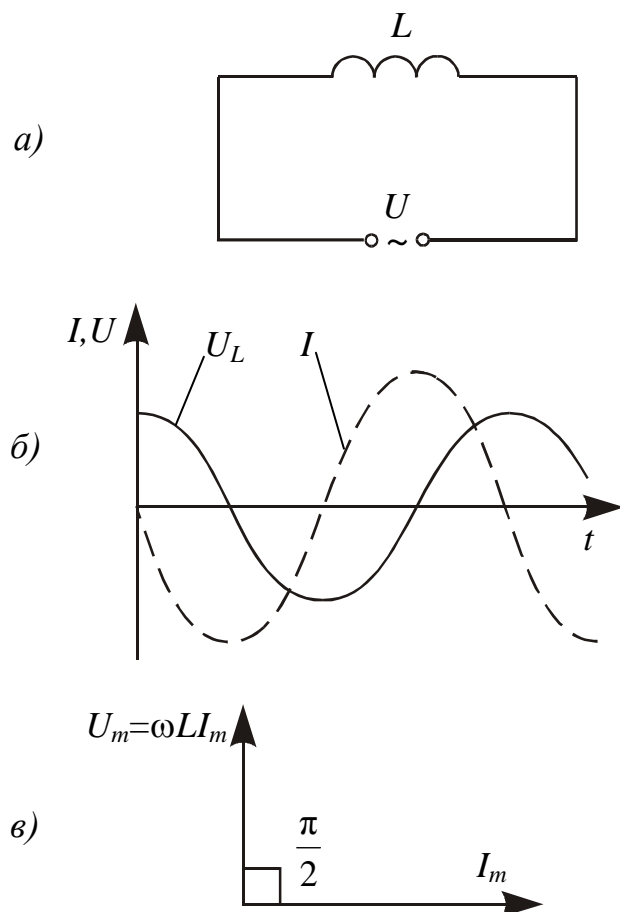


Рис. 8.3

кулоновского поля \vec{E}_k , создаваемого зарядами, расположенными на зажимах источника и проводах цепи.

Из равенства $\vec{E}_i = \vec{E}_k$ следует, что работа вихревого поля по перемещению единичного положительного заряда (т. е. ЭДС самоиндукции E_S) равна по модулю и противоположна по знаку работе кулоновского поля, равной в свою очередь напряжению на концах катушки:

$$E_S = -U.$$

Отсюда следует:

$$U_m \cos \omega t = L \frac{dI}{dt}. \quad (8.4)$$

Так как внешнее напряжение приложено к катушке индуктивности, то

$$U_L = L \frac{dI}{dt} \quad (8.5)$$

есть падение напряжения на катушке. Из (8.4) следует, что

$$dI = \frac{U_m}{L} \cos \omega t dt.$$

После интегрирования, принимая постоянную интегрирования равной нулю, получим

$$I = \frac{U_m}{\omega L} \sin \omega t = \frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = I_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (8.6)$$

где $I_m = \frac{U_m}{\omega L}$ - амплитудное значение тока, А.

Величина $R_L = \omega L$ называется индуктивным сопротивлением. Из этого определения следует, что индуктивное сопротивление катушки постоянному току ($\omega = 0$) равняется нулю. Подставляя

значение $U_m = \omega L I_m$ в (8.4) с учётом (8.5), получаем $U_L = \omega L I_m \cos \omega t$. Сравнивая полученное выражение с (8.6), приходим к выводу, что падение напряжения на катушке U_L опережает по фазе ток I , текущий

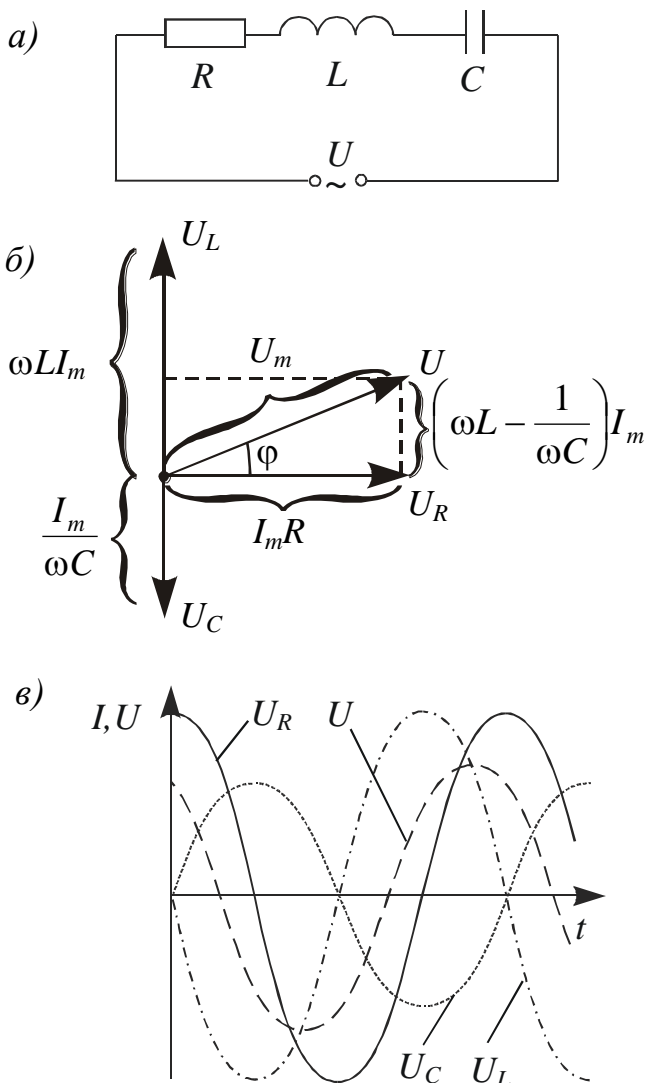


Рис. 8.4

через катушку, на $\pi/2$, что можно видеть на графике (см. рис. 8.3,б) и векторной диаграмме (рис. 8.3,в).

Рассмотрим цепь (рис. 8.4,а), состоящую из резистора сопротивлением R , катушки индуктивностью L и конденсатора ёмкостью C , на концы которой подаётся переменное напряжение по закону (8.1). При этом на элементах цепи возникнут падения напряжения U_R , U_C и U_L . На рис. 8.4,б приведена векторная диаграмма амплитуд падений напряжений на элементах цепи и результирующего напряжения U_m . Амплитуда U_m приложенного напряжения равна сумме амплитуд падений напряжений на элементах цепи. Как видно из рис. 8.4,б, угол φ равен разности фаз между напряжением на концах цепи и силой тока. Тогда

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R}. \quad (8.7)$$

Из прямоугольного треугольника получаем

$$(RI_m)^2 + ((\omega L - 1/(\omega C))I_m)^2 = U_m^2,$$

откуда амплитуда силы тока имеет значение

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2}}. \quad (8.8)$$

Следовательно, если напряжение в цепи изменяется по закону (8.1), то в цепи потечёт ток

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad (8.9)$$

где φ и I_m определяются из уравнений (4.7) и (4.9). Графики зависимостей U_R , U_C , U_L и I от времени приведены на рис 8.4,в.

Выражение (8.8) представляет собой закон Ома для цепи переменного тока. Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}$$

называется полным сопротивлением цепи.

Описание установки

Лабораторная установка включает в себя лабораторный модуль и генератор гармонических колебаний (рис.8.5). В качестве измерительных приборов используют осциллограф марки GOS-310 и (или) мультиметр и электронный вольтметр. Схема установки изображена на лицевой панели модуля (рис. 8.6).

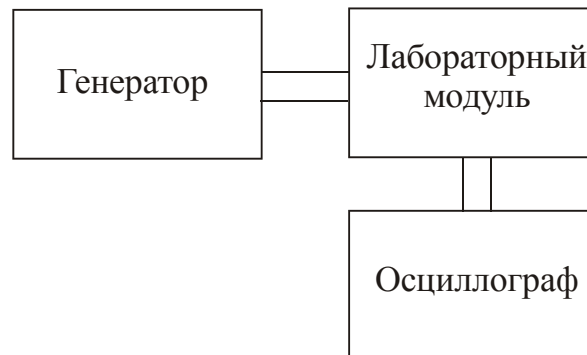


Рис. 8.5

К гнездам "PQ" на лицевой панели подключается генератор синусоидальных колебаний. Для определения зависимости реактивного сопротивления от частоты к гнездам "PA" подключается микроультиметр, а к гнездам "POYI" – электронный осциллограф.

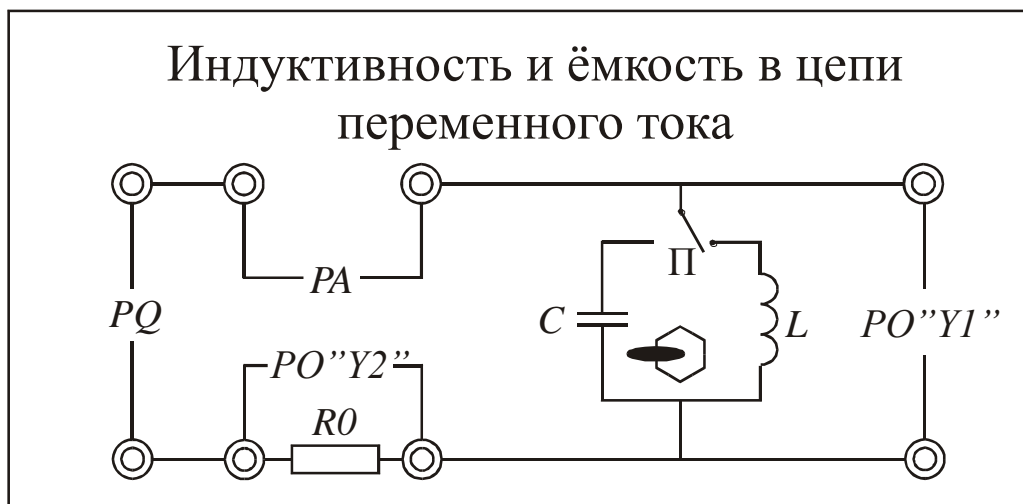


Рис. 8.6

Для определения угла сдвига фаз между током и напряжением к гнездам "POYI" одновременно подключаются каналы "INPUT" и "EXT" к электронного осциллографа. Развертка осциллографа теперь запускается через EXT вход.. Это будет эталонный сигнал. Ручкой H.POSITION установите начало изображения на крайнюю левую вертикальную линию

шкалы. Отсоедините кабель от входа INPUT и подайте на этот вход сигнал от гнезд "POYI".

Задание 1

Определение зависимости реактивного сопротивления от частоты

Порядок выполнения работы

1. Подсоединить к гнездам "PQ" на лицевой панели модуля генератор гармонических колебаний.
2. Подсоединить к гнездам "PA" микроультиметр, а к гнездам "POYI" – электронный осциллограф.
3. Включить в сеть генератор гармонических колебаний, микроультиметр, электронный осциллограф.
4. Установить напряжение генератора равным 5 В.
5. Установить переключатель "П" в положение "С".
6. Изменяя частоту генератора от 300 до 2000 Гц, измерить значения тока и напряжения (5–6 значений), результаты занести в табл.8 .1.

Таблица 8.1

| № | $C = \dots \Phi$ | | | | $L = \dots \text{Гн}$ | | | |
|-----|------------------|-----------|-----------|------------|-----------------------|-----------|-----------|------------|
| | ν , Гц | U_C , В | I_C , А | R_C , Ом | ν , Гц | U_L , В | I_L , А | R_L , Ом |
| 1 | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | |

7. Установить положение переключателя в положение "L".

8. Прodelать те же измерения, что и в п. 6.

Обработка результатов измерений

1. По формуле $R_C = U_C/I_C$ рассчитать емкостное сопротивление и результаты занести в табл. 8.1.

2. По формуле $R_L = U_L/I_L$ рассчитать индуктивное сопротивление и результаты занести в табл. 8.1.

3. Построить график зависимости $R_L = f(2\pi\nu)$ и определить тангенс угла наклона зависимости к оси абсцисс ($\text{tg } \alpha = L$).

4. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности определения индуктивности.

5. Построить график зависимости $R_C = f(1/2\pi\nu)$ и определить тангенс угла наклона зависимости к оси абсцисс ($\text{tg } \beta = 1/C$).

6. Рассчитать абсолютную и относительную погрешности определения ёмкости.

Задание 2

Определение угла сдвига фаз между током и напряжением

Порядок выполнения работы

1. Подсоединить к гнездам "POY1" каналы INPUT и EXT.
2. Замкнуть перемычкой гнезда "PA".
3. Установить переключатель "П" в положение "С".
4. Установить значение частоты генератора 500 Гц.
5. Установите начало изображения на крайнюю левую вертикальную линию шкалы (рис. 8.7).
6. Отсоедините один из кабелей от входа «POY1» и подайте на него сигнал с гнезд PO Y2. Измерить координаты $X(I)$ и $X(U)$ максимумов тока I (напряжения на R_0) и напряжения U . Примерный вид изображения на экране осциллографа при подключении конденсатора приведён на рис. 8.7.

7. Измерьте число делений по горизонтали между точкой запуска эталонной волны и сравниваемой. Фазовый сдвиг может быть рассчитан по формуле $\Phi = 360t/T$. Величина сигнала, подаваемого на осциллограф с гнезд "Y2", будет пропорциональна току в цепи.

8. Установить переключатель "П" в положение "L".

9. Установить значение частоты генератора, равное 2000 Гц.

10. Прodelать измерения согласно п. 6 и 7.

Контрольные вопросы

1. Записать закон Ома для цепи, содержащей R , C и L .

2. Чему равен сдвиг фаз между напряжением и током в цепи, содержащей катушку, ёмкость?

3. Изобразить векторную диаграмму для цепи, содержащей R , C и L .

4. Можно ли подобрать R , C и L таким образом, чтобы напряжение на участке цепи, содержащем R , C и L и подключенном к источнику переменного напряжения, было равно нулю?

5. Каким образом можно уменьшить потери электрической энергии, затрачиваемой на прохождение тока в цепи, содержащей R , C , L ?

Лабораторная работа

Индуктивность и ёмкость в цепи переменного тока

Состав работы:

- лабораторная полка _____ 1 шт.
- лабораторный модуль _____ 1 шт.
- генератор гармонических колебаний
типа GFG-8219A _____ 1 шт.
- электронный осциллограф
типа ОСУ - 20 _____ 1 шт.
- мультиметр типа МУ - 67 _____ 1 шт.

Параметры установки:

- ёмкость конденсатора, $C = 0,086 \text{ мкФ}$,
- индуктивность катушки, $L = 0,19 \text{ Гн}$,
- сопротивление в цепи $R = 20 \text{ Ом}$,
- сопротивление катушки индуктивности $R_K = 75 \text{ Ом}$,
- частота генератора, $\nu = (0,5 - 4,0) \text{ кГц}$.