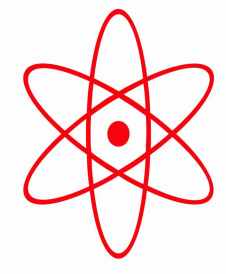


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ



**ФЭЛ-14**

**ИССЛЕДОВАНИЯ СДВИГА ФАЗ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Тула, 2010 г

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

## ИССЛЕДОВАНИЕ СДВИГА ФАЗ В ЦЕП ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

Цель работы: изучение цепей переменного тока, экспериментальная оценка сдвига фаз между током и напряжением для цепи переменного тока с последовательно соединенным активным сопротивлением, емкостью и индуктивностью.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

#### Основные характеристики переменного электрического тока.

В технике большое распространение получил синусоидальный переменный ток, то есть ток, величина которого изменяется со временем по закону синуса или косинуса:

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

где  $I_m$  - амплитуда тока,  $\Phi = (\omega t + \varphi_0)$  - фаза колебаний,  $\varphi_0$  - начальная фаза.

Мгновенными значениями силы тока  $i$ , напряжения  $u$ , ЭДС и мощности  $p$  в цепях переменного тока называют их значения в данный момент времени.

Амплитудными значениями силы тока  $I_m$ , напряжения  $U_m$ , ЭДС  $\mathcal{E}_m$  и мощности  $P_m$  в цепях переменного тока называют наибольшие мгновенные значения этих величин в случае синусоидального переменного тока за период.

Периодом  $T$  называется наименьший промежуток времени, через который переменный ток повторяет свои значения в той же самой последовательности (рис. 1).

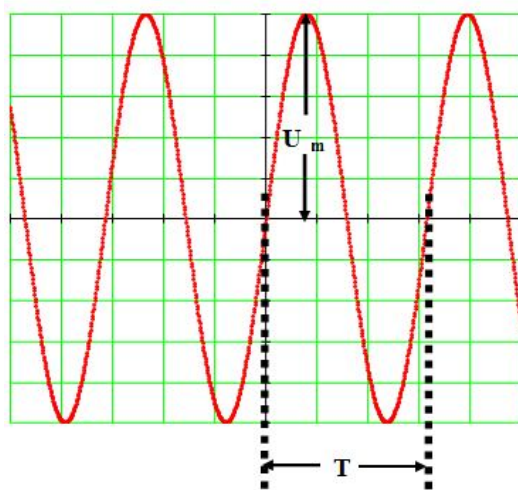


Рис. 1. Амплитудное значение напряжения  $U_m$  и период  $T$  сигнала.

Частотой  $\nu$  переменного периодического тока называется величина обратная периоду:

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad [\nu] = \text{Гц, Герц} \quad (2)$$

Циклической или круговой частотой называют величину:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu, \quad [\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \text{ радиан на секунду} \quad (3)$$

Сила тока и напряжение переменного тока непрерывно изменяются по величине, поэтому возникла необходимость каким-либо образом сравнивать различные токи друг с другом. При этом необходимо использовать такое действие переменного тока, которое бы не зависело от его направления. В этом отношении наиболее удобным оказалось тепловое действие тока. Причём по тепловому действию тока можно сравнивать переменные токи с постоянными. В связи с этим возникло понятие эффективного значения переменного тока.

Для синусоидального тока рис. 1, получим:

$$I_{\text{эфф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad U_{\text{эфф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

Наличие реактивных сопротивлений в цепи переменного тока приводит к тому, что возникает разность фаз между изменениями напряжения и тока в цепи (то есть ток и напряжение не одновременно достигают своего максимального значения). Это обстоятельство значительно усложняет расчёты цепей переменного тока.

### Сдвиг фаз в цепях переменного тока.

#### Цепь переменного тока с идеальной ёмкостью

Рассмотрим цепь переменного тока с последовательно включенным идеальным конденсатором, имеющим только ёмкостное сопротивление  $X_C$  (рис. 2). При этом полагаем, что в цепи  $R=0$ ,  $L=0$

Пусть источник переменного тока (генератор звуковой частоты), дающий напряжение  $U = U_m \sin \omega t$ , (где  $U_m$  – амплитуда входного напряжения, а  $\omega$  – циклическая частота) подключен к входу цепи.

Мгновенное значение силы тока в такой цепи с ёмкостью равно скорости изменения заряда на обкладках

конденсатора  $i = \frac{dq}{dt}$ . Так как  $q=Cu$ , то можно записать:

$$i = \frac{dCu}{dt} = C \frac{du}{dt} = \frac{dU_m \sin \omega t}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (5)$$

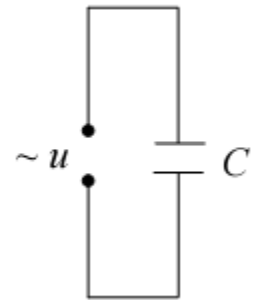


Рис.2. Цепь переменного тока с идеальной ёмкостью.

где  $I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{1/\omega C}$  - закон Ома для цепи переменного тока с

идеальной ёмкостью. Из этого следует, что роль сопротивления в цепи играет величина:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \text{ называемая реактивным ёмкостным сопротивлением. } [X_C] = \text{Ом.}$$

Таким образом получаем, что:

$$\begin{cases} u = U_m \sin \omega t \\ i = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{cases} \text{ - то есть в такой цепи ток опережает по фазе напряжение на } \frac{\pi}{2}$$

График напряжения и тока в данной цепи, а также векторная диаграмма представлены на рис 3.

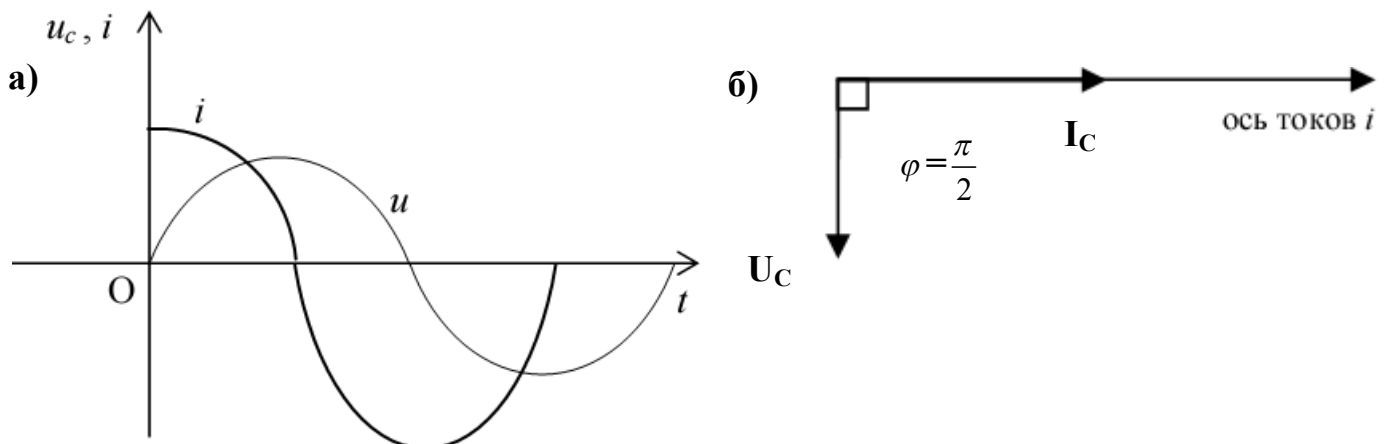


Рис.3 Графики тока и напряжения в цепи переменного тока, содержащей только идеальную ёмкость а) и векторная диаграмма цепи б)

Для практического применения, часто используется последовательная RC цепочка (рис. 4). Обозначим  $U_{0R}$ ,  $U_{0C}$  соответственно амплитудные значения напряжения на резисторе UR, конденсаторе UC. Полное напряжение на всей цепи, равное напряжению, поступающему с генератора, обозначим как U. Пользуясь тем, что напряжение  $U_{0R}$  на резисторе UR пропорционально току в цепи и синфазно с ним, можно построить векторную диаграмму аналогичную рис. 3.

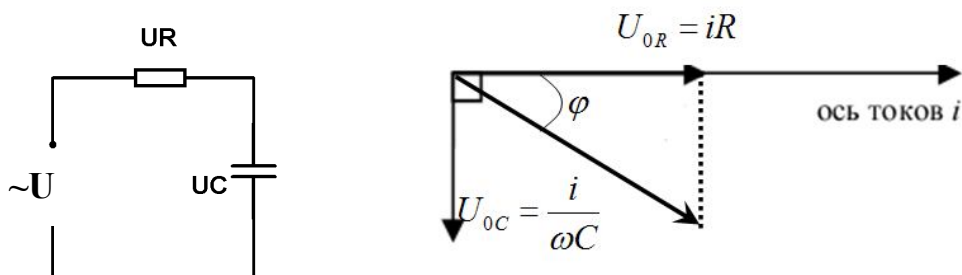


Рис.4. Последовательная RC цепочка и векторная диаграмма для этой цепи.

Напряжение на емкости  $U_{0C}$  всегда отстает по фазе от напряжения на сопротивлении  $U_{0R}$  на  $\frac{\pi}{2}$ , как показано на условной векторной диаграмме (рис.4), где вектор  $\vec{U}_{0C}$  соответствует амплитудному значению напряжения на емкости, а вектор  $\vec{U}_{0R}$  – амплитудному значению напряжения на сопротивлении. Из закона Ома для цепи переменного тока амплитудное значение напряжения на емкости:

$$U_{0C} = i_0 \frac{1}{\omega C} \quad (6)$$

где  $C$  – емкость,  $\omega$  – круговая частота,  $i_0$  – амплитудное значение тока.

Таким образом, суммарное амплитудное напряжение на RC-цепочке (которое равно напряжению с выхода генератора  $U$ ) равно векторной сумме  $\vec{U}_{0R} + \vec{U}_{0C}$ , т.е.:

$$U = i_0 \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (7)$$

Очевидно, что это **полное напряжение  $U$  отстает от напряжения на сопротивлении  $U_{0R} = iR_0$  (а значит и от тока в цепи) на угол  $\varphi$** . Этот фазовый сдвиг можно определить из векторной диаграммы:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{i/\omega C}{iR} = \frac{1}{\omega RC} \quad (8)$$

### **Цепь переменного тока с последовательно включенными R, L, C.**

Рассмотрим электрическую цепь с последовательно включенными активным сопротивлением  $R$ , индуктивностью  $L$  и емкостью  $C$  (рис. 5).

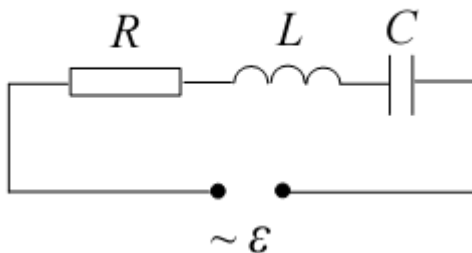


Рис.5. Цепь переменного тока с последовательно соединенными R, L, C

Пусть ток в цепи меняется по гармоническому закону  $I = I_0 \sin(\omega t)$

По закону Ома на активном сопротивлении падение напряжения равно:

$$U_R = IR = I_0 R \sin(\omega t) \quad (9)$$

Сдвига фаз между током  $I$  и напряжением  $U_R$  на резисторе нет.

Напряжение на конденсаторе равно:

$$U_C = \frac{q}{C} \quad (10)$$

Но  $I = \frac{dq}{dt}$ ,  $q = \int Idt = I_0 \int \sin(\omega t) dt = -\frac{I_0 \cos(\omega t)}{\omega}$ . Тогда из (10) следует,

что на конденсаторе:

$$U_C = \frac{I_0 \cos(\omega t)}{\omega C} = \frac{I_0 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}{\omega C} \quad (11)$$

На емкости имеется сдвиг фаз: напряжение  $U_C$  отстает от тока  $I$  на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

При протекании через катушку переменного тока, в ней по закону Фарадея возникает ЭДС самоиндукции  $\varepsilon_s = -L \frac{di}{dt}$ . По второму правилу

Кирхгофа с учетом того, что активное сопротивление катушки равно нулю  $R_A = 0$  Ом, запишем:

$$\begin{aligned} IR_A &= \varepsilon + \varepsilon_s \\ \varepsilon &= -\varepsilon_s = L \frac{dI}{dt} \end{aligned}$$

Таким образом, можно записать:

$$U_L = L \frac{dI}{dt} \quad (12)$$

Тогда:

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = LI_0 \omega \cos(\omega t) = I_0 \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (13)$$

На индуктивности сдвиг фаз: напряжение  $U$  опережает ток  $I$  на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

При протекании переменного тока через катушку  $L$  и конденсатор  $C$  тепло не выделяется. Сопротивления  $X_C$  и  $X_L$  называются реактивными. Реактивное сопротивление  $LCR$ -контура равно:

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (14)$$

Построим векторную диаграмму токов и напряжений для последовательного LCR контура.

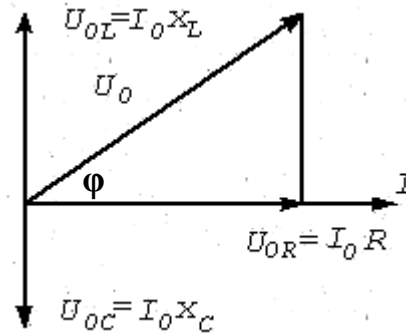


Рис.6. Векторная диаграмма для цепи переменного тока с последовательно соединенными R, L, C

Длина вектора амплитуды напряжения на клеммах контура равна:

$$U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (15)$$

Полное сопротивление контура называется импедансом и равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (16)$$

Напряжение на клеммах контура равно:

$$U = U_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (17)$$

где сдвиг фаз между током  $I$  в контуре полным напряжением  $U$  равен:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (18)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left( \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right)$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Методика измерений.

Для измерения сдвига фаз можно использовать фигуры Лиссажу, получаемые на экране осциллографа. Пусть имеются два синусоидальных напряжения одинаковой частоты  $\omega$ . Подадим эти напряжения на вертикальные и горизонтальные пластины осциллографа. Смещение луча под действием этих напряжений пропорционально напряжению:

по горизонтали  $x = A \sin(\omega t)$

по вертикали  $y = B \sin(\omega t + \varphi)$ , где  $\varphi$  – сдвиг фаз между напряжениями;  $A = s_1 \cdot u_1$ ,  $B = s_2 \cdot u_2$  – амплитуды смещения луча, пропорциональные амплитудам напряжения  $u_1$  и  $u_2$  и коэффициентам усиления  $s_1$  и  $s_2$  соответствующих каналов осциллографа. Исключив время  $t$ , получим:

$$\left(\frac{x}{A}\right)^2 + \left(\frac{y}{B}\right)^2 - \frac{2xy}{AB} \cos \varphi = \sin^2 \varphi \quad (19)$$

Выражение (19) – уравнение эллипса, описываемого электронным лучом на экране осциллографа (рис. 7).

Из квадратного уравнения (19) можно выразить в явном виде  $y = y(x)$ :

$$y = \frac{B}{A} \left( x \cos \varphi + \sqrt{A^2 - x^2} \sin \varphi \right) \quad (20)$$

Найдем точки пересечения эллипса с осями координат. Приняв  $x=0$ , получим  $y_0 = B \sin \varphi$ . Аналогично при  $y=0$  получим  $x_0 = A \sin \varphi$ .

Тогда для нахождения сдвига фаз получим формулу:

$$\sin \varphi = \pm \frac{y_0}{B} = \pm \frac{x_0}{A} \quad (21)$$

$$\varphi = \pm \arcsin\left(\frac{y_0}{B}\right) = \pm \arcsin\left(\frac{x_0}{A}\right)$$

К недостаткам метода эллипса относится практическая невозможность установления знака угла сдвига фаз.

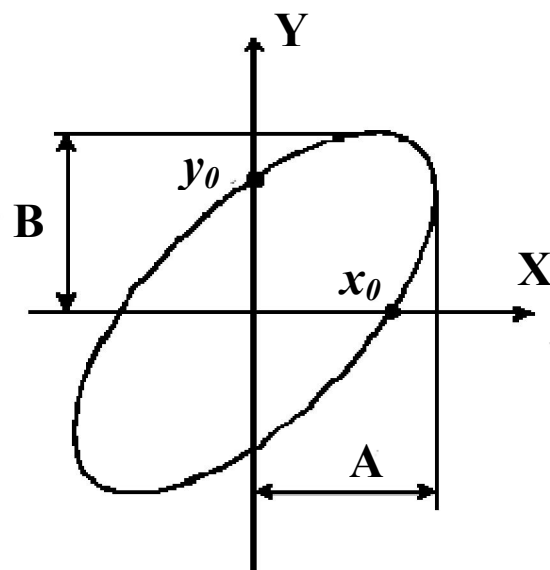


Рис.7. К определению сдвига фаз методом фигур Лиссажу.



### Приборы и оборудование.

Принципиальная электрическая схема учебной установки для изучения сдвига фаз в цепях переменного тока приведена на рис. 8.

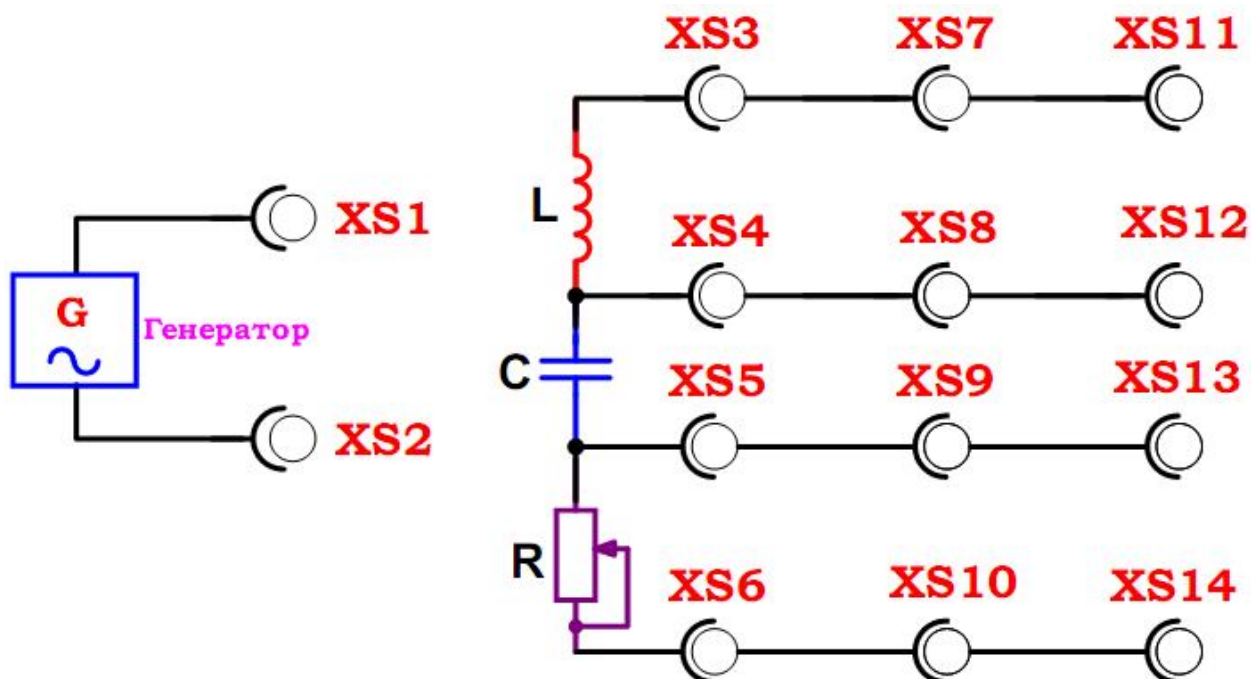


Рис.8. Упрощенная принципиальная электрическая схема для исследования сдвига фаз в цепи переменного тока.

Цифровой кварцованный генератор G выдает синусоидальное напряжение, поступающее на клеммы XS1 и XS2. Частота генератора задается с помощью кнопки «ЧАСТОТА» и переключается ступенчато по кругу нажатием этой кнопки в пределах 100 – 5000 Гц, амплитуда регулируется ручкой «АМПЛИТУДА». Генератор включается и отключается нажатием кнопки «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ», состояние генератора отображается на LCD индикаторе Gen=ON либо Gen=OFF. **Перед изменением частоты генератора, его необходимо выключить нажатием кнопки «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ».** Генератор соединяется с исследуемой схемой переключателями. При этом клеммы XS3 – XS7 – XS11; XS4 – XS8 – XS12; XS5 – XS9 – XS13; XS6 – XS10 – XS14 **соединены электрически между собой внутри установки.**

Переменный резистор «СОПРОТИВЕНИЕ, R» (рис. 8) используется в качестве магазина сопротивлений и позволяет плавно регулировать активное сопротивление в контуре в диапазоне от 0 до 1000 Ом. Для защиты от перегрузки в цепь введен балластный резистор с малым сопротивлением  $R_{\text{балласт}}=10$  Ом. Значение сопротивления измеряется цифровым омметром и выводится совместно с текущим значением частоты на ЖКД LCD дисплей **только при выключенном генераторе.** Установка снабжена микропроцессорной системой управления и контроля необходимых параметров.

**ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ:**

**Индуктивность цепи,  $L=100$  мГн, активное сопротивление катушки  
самоиндукции  $R_L=200$  Ом  
Емкость цепи  $C=220$  нФ**

**Порядок выполнения работы**

1. Перед началом работы ознакомится с принципиальной схемой рис. 8., разобраться в назначении переключателей и ручек регулировки. Проверить целостность соединительных проводов и сетевых шнуров учебной установки и электронного осциллографа. **Перед включением установки в сеть все переключки должны быть отсоединены от стенда!**
2. Включить учебную установку и электронный осциллограф в сеть  $\sim 220$  В. Поставить переключатели «СЕТЬ» на панели учебного модуля и электронного осциллографа в положение «ВКЛ», при этом должны загореться сигнальные индикаторы «СЕТЬ».
3. **Измерить сдвиг фаз между током и полным напряжением (напряжением генератора) в RC цепи с последовательно соединенным активным сопротивлением и конденсатором (без катушки самоиндукции).** Для этого переключками соединить клеммы XS1 с XS3 (либо с XS7, XS11 см. схему рис.8), XS2 с XS6 (либо с XS10, XS14 см. схему рис.8). Зашунтировать катушку самоиндукции (отключить от цепи), подключив переключку между клеммами XS7 – XS8.
4. Установить частоту  $\nu$  генератора от 100 Гц до 1 кГц с помощью кнопки «ЧАСТОТА». Определить круговую частоту  $\omega = 2\pi\nu$  [с<sup>-1</sup>].
5. Подключить измерительные щупы осциллографа к контрольным точкам. Специальные измерительные щупы (2 шт.) типа «BNC (осциллографический штекер) – два тюльпана» служат для подключения к разным участкам цепи рис.8. **При этом синий (либо черный) штекер-тюльпан является общим проводом  $\perp$ , белый (либо красный) штекер-тюльпан – сигнальным проводом.** Для измерения сдвига фаз между током в RC цепи и полным напряжением генератора следует подключить один из измерительных щупов общим черным проводом  $\perp$  к клемме XS10, сигнальным проводом подключиться к клемме XS9, осциллографический штекер BNC соединить со входом Y осциллографа. Второй измерительный щуп подключить общим черным (синим) проводом  $\perp$  к клемме XS14, сигнальным проводом подключиться к клемме XS11 осциллографический штекер BNC соединить со входом X осциллографа. Тем самым, на ось Y подается сигнал с переменного резистора R, а на ось X сигнал с выхода генератора (полное напряжение цепи см. схему рис. 8).
6. Подготовить осциллограф к режиму измерения фигур Лиссажу. Для этого поставить переключатель «+ - X-EXT» в положение «X-EXT» -

режим фигур Лиссажу XY. В этом режиме внутренний генератор развертки осциллографа выключается. Переключатель VOLTS/DIV (Вольт/дел) рекомендуется установить в положение **.5 V**.

7. **Длительное свечение точки в режиме XY недопустимо, так как это со временем приводит к выгоранию люминофора в данной области электронно-лучевой трубки осциллографа.**
8. Вращая ручку «СОПРОТИВЛЕНИЕ», установить в цепи небольшое активное сопротивление  $\sim 200 - 400$  Ом (по показаниям цифрового омметра).
9. Включить генератор учебной установки нажатием кнопки «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ».
10. Получить эллипс на экране осциллографа. Вращая ручку «АМПЛИТУДА» учебной установки и ручку VOLT VAR осциллографа (плавная регулировка амплитуды, подаваемой на ось Y) установить такое значение амплитуды с выхода генератора, чтобы эллипс занимал  $\frac{3}{4}$  экрана. Вращением ручек «POSITION» оси Y и X установить эллипс **СТРОГО в центр экрана**. Изображение эллипса вследствие наличия наводок от катушки самоиндукции может быть несколько размыто, особенно на больших частотах и при большом усилении генератора.
11. Определить точки пересечения эллипса с осями координат  $x_0$ ,  $y_0$  и максимальные отклонения луча A и B (см. рис.7). По формуле (21) определить экспериментально сдвиг фаз между током в RC цепи и напряжением генератора, а по формуле (8) рассчитать  $\varphi$  теоретически. Все измеренные и рассчитанные данные занести в таблицу:

R, Ом	C, Ф	$\omega = 2\pi\nu$ , $c^{-1}$	$\frac{x_0}{A}$	$\frac{y_0}{B}$	$\varphi_{эксп1} = \arcsin\left(\frac{y_0}{B}\right)$	$\varphi_{эксп2} = \arcsin\left(\frac{x_0}{A}\right)$	$\langle \varphi_{эксп} \rangle = \frac{\varphi_{эксп1} + \varphi_{эксп2}}{2}$	$\varphi_{теор}$

12. Вращая ручку «СОПРОТИВЛЕНИЕ» наблюдать эволюцию эллипса при увеличении активной нагрузки в цепи. Провести измерения аналогичные пп. 10 – 11 для 3-5 других значений сопротивления R и частот  $\omega \sim 100 - 1000$  Гц. Для измерения сопротивления генератор необходимо выключать нажатием кнопки «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ». (см. примечание п. 7).
13. **Приступить к изучению последовательной LCR цепочки.** Для этого, отключив генератор и установив активное сопротивление порядка 8 кОм и частоту  $\sim 1$  кГц, подключить к цепи катушку самоиндукции, отключив шунтирующую её перемычку от клемм XS7 – XS8. Подключая – отключая перемычку, наблюдать, как включение в цепь индуктивности влияет на форму эллипса и сдвиг фаз. Измерить этот сдвиг фаз по методу аналогичному пп. 10 – 11 и сравнить получившиеся значения с теоретическим расчетом по формуле (18).

При расчетах учитывайте активное сопротивление катушки самоиндукции  $R_L=85$  Ом, которое складывается с активным сопротивлением цепи  $R$ . Опыт рекомендуется проводить на высоких частотах  $\sim 800 - 1500$  Гц.

14. Повторить измерения п. 13 для других значений активного сопротивления  $R$  и частот  $\omega$ .

15. **Измерить сдвиг фаз между током в цепи  $I$  и напряжением  $U_C$  на конденсаторе.** Для этого следует отключить катушку самоиндукции, зашунтировав её, подключив перемычку между клеммами XS7 – XS8 и установить низкую (100 – 200 Гц) частоту генератора кнопкой «ЧАСТОТА», предварительно отключив его. Один из измерительных щупов подключить общим черным проводом  $\perp$  к клемме XS9, сигнальным проводом подключиться к клемме XS10, осциллографический штекер BNC соединить со входом Y осциллографа. Второй измерительный щуп подключить общим черным проводом  $\perp$  к клемме XS13, сигнальным проводом подключиться к клемме XS12, осциллографический штекер BNC соединить со входом X осциллографа. Тем самым на одну из осей осциллографа (ось X) подается сигнал  $U_C$  с конденсатора, а на другую (ось Y) сигнал с резистора  $U_R$ , который пропорционален току и совпадает по фазе с током в цепи. Теоретически, сдвиг фаз между током и напряжением на конденсаторе равен  $\frac{\pi}{2}$  и на экране осциллографа будет наблюдаться

круг (только в случае равенства амплитуд сигналов, поступающих на вход X и Y осциллографа). В режиме фигур Лиссажу коэффициент чувствительности оси X электронного осциллографа, если не применяются дополнительные делители, фиксирован и равен 0,5 Вольт/дел. Устанавливая коэффициент чувствительности оси Y таким же  $K_y=0,5$  Вольт/дел и, **повернув ручку плавной регулировки VOLT VAR до упора по часовой стрелке (только в этом положении ручки подписи у переключателя VOLTS/DIV соответствуют реальным значениям, и ось Y откалибрована правильно)**, при некотором положении переменного резистора «СОПРОТИВЛЕНИЕ, R» получаем на экране осциллографа круг. В этом случае амплитуды напряжений, подаваемые на вертикально и горизонтально отклоняющие пластины осциллографа равны, т. е.  $U_R = U_C$ , что позволяет оценить емкостное сопротивление конденсатора  $X_C$ , которое в данном случае равно активному сопротивлению резистора  $R$  (по показаниям омметра). **Для измерения сопротивления  $R$  генератор необходимо выключать нажатием кнопки «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ».** (см. примечание п. 7). Опыт рекомендуется проводить на частотах  $\sim 100 - 200$  Гц. Круг расположить в центре экрана осциллографа.

16. Провести оценку емкостного сопротивления конденсатора  $X_C$  согласно п. 15 для 2-3 частот и сравнить полученные значения с теоретическим расчетом по формуле  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ .

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что называется переменным электрическим током?
2. Перечислите основные характеристики переменного тока.
3. Чему равен сдвиг фаз в последовательной RC цепочке между током и напряжением с выхода генератора? Между током и напряжением на обкладках конденсатора? Свой ответ аргументируйте соответствующими векторными диаграммами.
4. Нарисуйте векторную диаграмму для цепи переменного тока с последовательно соединенными R, L, C. Получите выражение для реактивного сопротивления такого LCR контура и выражения для импеданса цепи.
5. Проанализируйте векторную диаграмму данной цепи. Как зависит угол сдвига фаз между напряжением на клеммах генератора и током в цепи от частоты, индуктивности и емкости контура. Отдельно рассмотрите случай равенства индуктивного и емкостного сопротивления.
6. Объясните используемый вами в этой работе метод фигур Лиссажу для измерения сдвига фаз. В чем его недостатки?
7. Выведите формулы для нахождения угла сдвига фаз этим методом.
8. Объясните принцип работы учебной установки исходя из принципиальной схемы рис. 8.
9. Предложите другие способы определения угла сдвига фаз в цепях переменного тока.

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Атамаян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. - М. Высшая школа, 1982.
2. Колтик Е.Д. Фазосдвигающие устройства. –М. Изд-во стандартов, 1981.
3. Измерения в электронике. Справочник./Под ред. В. А. Кузнецова. - М. Энергоатомиздат,1987.
4. Практикум по физике. Электричество и магнетизм: уч. пособ. для вузов / под ред. Ф. А. Николаева – М.: Высш. шк., 1991. – 151 с.
5. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2 / И. В. Савельев – М.: Наука, 1988. – 496 с.
6. Детлаф А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский – М.: Высш. шк., 1989. – 608 с.
7. Бордовский Г.А. Общая физика: курс лекций с компьютерной поддержкой. Т. 1. / Г.А. Бордовский, Э. В. Бурсиан – М.: Изд-во Владос-Пресс, 2001. – 240 с.
8. Кошкин Н. И. Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич – М.: Наука, 1988. – 284 с.
9. Калашников С.Г. Электричество. - М.: Физматгиз. 1985-1986

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ,  
НПО Учебной Техники «ТулаНаучПрибор», Россия, г. Тула**