

### 3.2. Установившиеся режимы в линейных цепях с источниками сигналов синусоидальной формы

3.2.А. **Цель работы:** исследование установившихся режимов в линейных цепях с источниками синусоидальных сигналов.

В работе студенты экспериментально определяют основные параметры синусоидальных сигналов и реакций (токов и напряжений) и соотношения между этими параметрами для установившегося режима линейной цепи.

Сопоставляют результаты аналитического расчета цепи методом комплексных амплитуд с данными эксперимента.

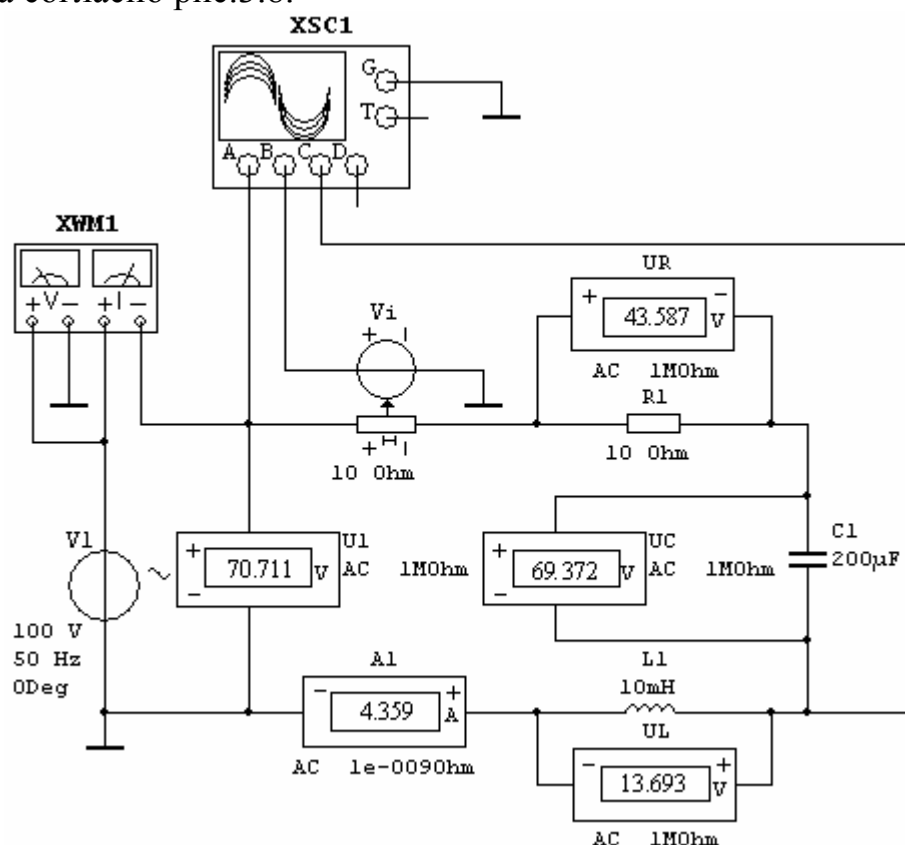
Создаются схемы для проведения виртуальных экспериментов. Анализируются результаты моделирования.

Виртуальные эксперименты проводятся на базе пакета *MultiSim 10.0.1*. Используются библиотечные модели контрольно-измерительных приборов и компонент.

#### **Рабочее задание**


#### **3.2.Б. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ В ЛИНЕЙНОЙ $RLC$ - ЦЕПИ С ИСТОЧНИКОМ СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА**

3.2.Б.1. Сформировать схему для проведения виртуального эксперимента согласно рис.3.8.





**Рис.3.8.** Схема виртуального эксперимента для исследования установившихся режимов в линейной цепи с источником синусоидального сигнала

3.2.Б.2. Нажатием кнопки  вызвать окно меню раздела источников сигналов *Signal Source Components*.

Выбрать источник синусоидального напряжения. Нажатием кнопки  активизировать модель источника, перевести ее на поле и зафиксировать положение модели.

3.2.Б.3. Модели заземлений, резистора  $RI$ , индуктивности  $LI$ , емкости  $CI$ , вольтметров  $UI$ ,  $UR$ ,  $UL$ ,  $UC$ , амперметра  $AI$  и источника напряжения  $VI$ , управляемого током (датчика тока), вызываются аналогично п.п. 1.2.Б.3, 1.2.Б.4, 1.2.Б.2, 1.2.Б.8, 1.2.Б.11.


3.2.Б.4. Нажатием кнопки  на линейке измерительных приборов активизировать модель четырехканального осциллографа  $XSC...$  (*Oscilloscope*), перевести ее на поле и зафиксировать.

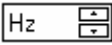
3.2.Б.5. Нажатием кнопки  на линейке измерительных приборов активизировать модель ваттметра  $XWM ...$  (*Wattmeter*), перевести ее на поле и зафиксировать.

3.2.Б.6. Разместить все элементы и соединить их между собой согласно схеме рис.3.8.

Для удобства визуального наблюдения временных зависимостей сигнала и реакций следует задать проводникам, соединяющим схему и входы каналов осциллографа  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , различные цвета (см. п.п. 1.2.Б.12, 1.2.Б.13).

3.2.Б.7. Задать параметры источника синусоидального напряжения  $VI$ , используя окно задания параметров *SIGNAL VOLTAGE SOURCES* на закладке *Value*.

- По заданию преподавателя установить в строке *Voltage [Pk]* амплитудное значение напряжения сигнала в пределах 100 ... 200 В и соответствующий масштаб в окне .

- В строке *Frequency [F]* установить значение циклической частоты сигнала  $f$  в пределах 50 ... 100 Гц и соответствующий масштаб в окне .

- В строке *Phase* установить значение начальной фазы сигнала  $\psi_V = 0^\circ$  (по умолчанию *0 Deg*).

- Остальные параметры источника оставить по умолчанию.

- На закладке *Label* в строке *Reference ID* при необходимости задать соответствующий идентификатор (маркировку) источника  $VI$ .

- Закрыть окно *SIGNAL VOLTAGE SOURCES* кнопкой .




3.2.Б.8. Задать параметры пассивных элементов:  $RI$  в диапазоне 10 ... 20 Ом;  $LI$ - в диапазоне 5 ... 10 мГн;  $CI$ - в диапазоне 200 ... 300 мкФ ( п.п. 1.2.Б.15, 1.2.Б.6, 1.2.Б.7).

3.2.Б.9. Задать параметры вольтметров  $UI$ ,  $UR$ ,  $UL$ ,  $UC$  и амперметра  $AI$  аналогично п.п. 1.2.Б.18, 1.2.Б.19. При этом для всех вольтметров и


амперметра в строке *Mode* установить вид режима работы по переменному току *AC*.

3.2.Б.10. Задать параметры датчика тока ( источника напряжения, управляемого током )  $V_i$  аналогично п.1.2.Б.21. На закладке *Value* в строке *Transresistance (H)* задать значение коэффициента передачи равное 10 Ом (по умолчанию 1 *Ohm*). При таком коэффициенте напряжение на выходе источника  $V_i$  в вольтах будет соответствовать десятикратному ( $10i$ ) значению тока в амперах, проходящему через входной резистор датчика.

При необходимости на закладке *Label* в строке *Reference ID* задать соответствующий идентификатор источника  $V_i$ .

3.2.Б.11. Настроить четырехканальный осциллограф *XSCI*. У данного осциллографа настройка едина для всех каналов. Поэтому длительность развертки (масштаб по оси "X") следует задавать в соответствии с периодом сигнала источника  $V_I$ . Масштаб по оси "Y" следует задавать в соответствии со значением амплитуды напряжения сигнала  $V_{I_m}$ , поскольку это наибольшая из амплитуд напряжений в исследуемой цепи. Режим по входу задать кнопкой . Режим развертки задать кнопкой . Установить нулевые уровни смещений по оси "X" (*X position*) и по оси "Y" (*Y position*). Уровень запуска *Level* установить нулевым. Установить автоматический режим запуска кнопкой .

3.2.Б.12. Провести виртуальный эксперимент измерения тока, напряжений на элементах цепи, активной мощности и получения временных зависимостей  $V_I(t)$ ,  $u_L(t)$ ,  $i(t)$ .

- Запустить модель переключателем .
- Зафиксировать показания вольтметров  $U_I$ ,  $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$ , амперметра  $A_I$  и ваттметра  $XWMI$ . Данные занести в табл.3.3, в строку "эксперимент".
- Значение фактора мощности (показание ваттметра *Power Factor*) занести в графу "cos φ" табл.3.3, в строку "эксперимент".

**Замечание.** Показания всех приборов следует фиксировать по завершении переходных процессов измерения в вычислительном эксперименте.

- Получить изображения временных зависимостей  $V_I(t)$ ,  $u_L(t)$ ,  $i(t)$  в процессе двух-трехкратного заполнения экрана осциллографа.

- Отключить модель переключателем .

3.2.Б.13. Используя визиры определить:

- амплитудные значения напряжения сигнала  $V_{I_m}$ , напряжения на индуктивности  $U_{Lm}$ , тока  $I_m$ ;
- начальные фазы  $\psi_L$  напряжения  $u_L(t)$  и  $\psi_i$  тока, условно приняв начальную фазу  $\psi_V$  напряжения сигнала  $V_I(t)$  равной нулю ( $\psi_V = 0^\circ$ ).
- Данные измерений занести в табл.3.3, в строку "эксперимент".

- Используя показания амперметра  $AI$  и вольтметра  $UI$  вычислить значение модуля комплексного входного сопротивления цепи  $|Z| = (VI)/I$  Ом. Занести это значение в табл.3.3, в строку "эксперимент".

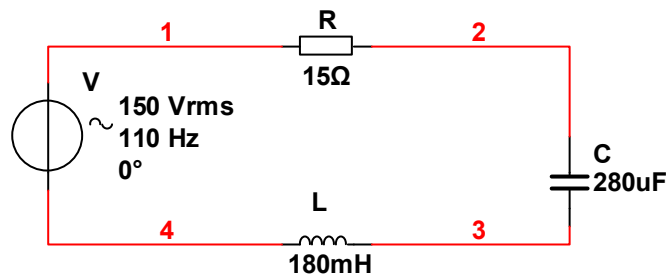
- Значение угла сдвига между начальными фазами напряжения сигнала и тока  $\varphi = \psi_V - \psi_i = \psi_i$  занести в табл. 3.3, в строку "Эксперимент".

3.2.Б.14. Используя метод комплексных амплитуд определить реакции в исследуемой цепи и комплексную мощность. Полученные при расчете результаты занести в соответствующие графы табл.3.3, в строку "Расчет".

### Пример расчета (вариант 2 самостоятельной работы по теме 3-го семинара)

Может быть использован при наличии у преподавателя нескольких групп. Задаётся один вариант цепи и различные комбинации числовых данных. В результате у каждого студента имеется свой набор исходных данных для расчёта, а преподавателю относительно проще обнаружить ошибки в расчёте.

Дана цепь.



Цепь представляет собой последовательное соединение R, L и C элементов. Параметры цепи могут быть заданы путём расчёта по следующим формулам:

$V=U=60+N_{\text{сп гр}} \cdot 10 = 150\text{В}$  то есть напряжение источника  $V$  задаётся равным действующему значению напряжения на участке цепи, которое вычисляется через номер в списке группы  $N_{\text{сп гр}}$ . Примем в рассматриваемом примере величину номера студента, равной 9.

$$R = 6 + N_{\text{сп гр}} = 6 + 9 = 15[\text{Ом}]$$

$$L = 0.02 \cdot N_{\text{сп гр}} = 0.02 \cdot 9 = 0.18[\text{Гн}]$$

$$C = (20 \cdot N_{\text{сп гр}} + 100) \cdot 10^{-6} [\text{Ф}] = (20 \cdot 9 + 100) \cdot 10^{-6} [\text{Ф}] = 280\text{мкФ}$$

$$f = 20 + 10 \cdot N_{\text{сп гр}} = 20 + 10 \cdot 9 = 110 [\text{Гц}]$$

В разных группах изменяются только константы в приведённых формулах.

Расчёт проводится сначала в действующих значениях, а затем определяются амплитудные величины токов и напряжений.

Модуль реактивного индуктивного сопротивления

$$x_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3.14 \cdot 110 \cdot 0.18 = 124.3[\text{Ом}]$$

Модуль реактивного ёмкостного сопротивления

$$x_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 * 3.14 * 110 * 0.00028} = 5.17 [Ом]$$

Комплексное сопротивление индуктивного элемента цепи:

$$z_L = jx_L = j124.3 [Ом]$$

Комплексное сопротивление ёмкостного элемента цепи:  $z_C = -jx_C = -j5.17 [Ом]$

Полное комплексное сопротивление цепи:

$z = R + jx_L - jx_C = 15 + j124.3 - j5.17 = 15 + j119.13 [Ом] = 120.1e^{82.8^\circ} [Ом]$ , где модуль  $z$  равен  $|z| = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{15^2 + 119.13^2} = 120.1 [Ом]$  и фаза  $\phi$  равна

$$\phi = \arctg \frac{x_L - x_C}{R} = \arctg \frac{119.13}{15} = 82.8^\circ$$

Действующее значение тока в цепи равно:  $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{z} = \frac{150 * e^{j0}}{120.1 * e^{j82.8^\circ}} = 1.25 * e^{-j82.8^\circ} [A]$

Напряжение на резистивном элементе

$$\dot{U}_R = R * \dot{I} = 15 * 1.25 * e^{-j82.8^\circ} = 18.73 * e^{-j82.8^\circ} [B]$$

Напряжение на индуктивном элементе

$$\dot{U}_L = z_L * \dot{I} = 124.3 * e^{j90^\circ} * 1.25 * e^{-j82.8^\circ} = 155.28 * e^{j7.2^\circ} [B]$$

Напряжение на ёмкостном элементе

$$\dot{U}_C = z_C * \dot{I} = 5.17 * e^{-j90^\circ} * 1.25 * e^{-j82.8^\circ} = 6.46 * e^{-j172.8^\circ} [B]$$

Амплитудные значения тока, напряжения источника и напряжений на элементах цепи:

$$\dot{I}_m = \dot{I} * \sqrt{2} = 1.25 * e^{-j82.8^\circ} * 1.41 = 1.77 * e^{-j82.8^\circ} [A]$$

$$\dot{U}_m = \dot{U} * \sqrt{2} = 150 * 1.414 = 212 [B]$$

$$\dot{U}_{Rm} = \dot{U}_R * \sqrt{2} = 18.73 * e^{-j82.8^\circ} * 1.414 = 26.49 * e^{-j82.8^\circ} [B]$$

$$\dot{U}_{Lm} = \dot{U}_L * \sqrt{2} = 155.28 * e^{j7.2^\circ} * \sqrt{2} = 219.60 * e^{j7.2^\circ} [B]$$

$$\dot{U}_{Cm} = \dot{U}_C * \sqrt{2} = 6.46 * e^{-j172.8^\circ} * \sqrt{2} = 9.13 * e^{-j172.8^\circ} [B]$$

Расчёт мощностей в цепи переменного тока и баланс мощностей:

$$\text{Активная мощность цепи } P = R * I^2 = 15 * 1.25^2 = 23.44 [Вт]$$

$$\text{Реактивная индуктивная мощность цепи } Q_L = x_L * I^2 = 124.34 * 1.25^2 = 194.28 [ВАр]$$

$$\text{Реактивная ёмкостная мощность цепи } Q_C = x_C * I^2 = 5.17 * 1.25^2 = 8.08 [ВАр]$$

Полная мощность цепи  $\dot{S} = P + jQ_L - jQ_C = 23.44 + j186.2[ВА]$

Таблица 3.3

**Экспериментальные и расчетные данные**

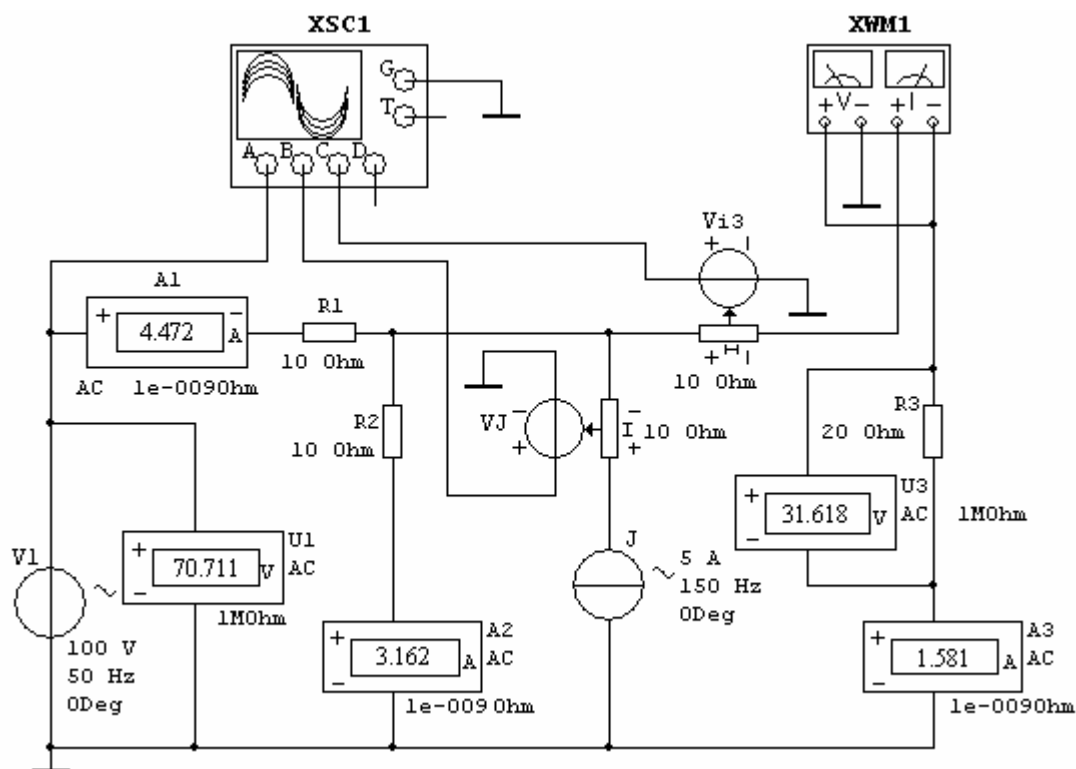
	$VI$	$U_R$	$U_C$	$U_L$	$I$	$VI_m$	$U_{Lm}$	$\Psi_L$	$I_m$	$\Psi_i$	$\varphi$	$P$	$\cos \varphi$	$ Z $
	В	В	В	В	А	В	В	град.	А	град.	град.	Вт	-	Ом
Экспе- римент														
Расчет														

3.2.Б.15. Сравнить экспериментальные и расчетные значения параметров сигнала, реакций, мощности, входного сопротивления. Сделать выводы.

3.2.Б.16. По данным табл.3.3 построить на комплексной плоскости векторную диаграмму сигнала и реакций, треугольник сопротивлений и треугольник мощностей.


**3.2.В. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ В  
ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ С ИСТОЧНИКАМИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ  
СИГНАЛОВ РАЗНОЙ ЧАСТОТЫ**

3.2.В.1. Сформировать схему для проведения виртуальных экспериментов согласно рис.3.9.



**Рис.3.9.** Схема виртуального эксперимента для исследования установившихся режимов в линейной цепи с источниками синусоидальных сигналов разной частоты

3.2.В.2. Нажатием кнопки  вызвать окно меню раздела источников сигналов *Signal Source Components*.

Выбрать источник синусоидального тока. Нажатием кнопки  активизировать модель источника, перевести ее на поле и зафиксировать.

3.2.В.3. Модели заземлений, резисторов  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ , источника синусоидального напряжения  $V1$ , датчиков тока (источников напряжений, управляемых токами)  $VJ$ ,  $Viz$ , вольтметров  $U1$ ,  $U3$ , амперметров  $A1$ ,  $A2$ ,  $A3$ , четырехканального осциллографа  $XSC1$  и ваттметра  $XWM1$  вызываются аналогично п.п. 1.2.Б.3, 1.2.Б.4, 3.2.Б.2, 1.2.Б.11, 1.2.Б.8, 3.2.Б.4 и 3.2.Б.5 соответственно.

3.2.В.4. Соединить все элементы согласно схеме рис.3.9.

Для удобства визуального наблюдения временных зависимостей сигналов и реакций задать проводникам, соединяющим входы каналов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  осциллографа с цепью, различные цвета (см. п.п.1.2.Б.12, 1.2.Б.13).

3.2.В.5. Задать параметры источника синусоидального напряжения  $V1$  аналогично п.3.2.Б.7.

- Амплитудное значение установить в пределах 100 ... 200 В.
- Частоту сигнала  $f_V$  установить в пределах 50 ... 100 Гц.
- Установить начальную фазу сигнала  $\psi_V$  равной нулю ( $\psi_V = 0^\circ$ ).
- Остальные параметры источника оставить по умолчанию.

3.2.В.6. Задать параметры источника тока  $J$ , используя окно задания параметров *SIGNAL CURRENT SOURCES* на закладке *Value*.

- По заданию преподавателя установить в строке *Current* [ $Pk$ ] амплитудное значение тока сигнала в пределах 5 ... 10 А и соответствующий масштаб в окне

- Установить в строке *Frequency* [ $F$ ] значение циклической частоты сигнала  $f_J = 3f_V$  Гц и соответствующий масштаб в окне

- Установить в строке *Phase* значение начальной фазы сигнала  $\psi_J = 0^\circ$ .

- Остальные параметры источника  $J$  оставить по умолчанию.

- На закладке *Label* в строке *Reference ID* при необходимости задать соответствующий идентификатор источника  $J$ .

- Закрывать окно *SIGNAL CURRENT SOURCES* кнопкой

3.2.В.7. Задать параметры резисторов  $R1, R2, R3$  в диапазоне 10 ... 20 Ом ( см. п.1.2.Б.15 ).

3.2.В.8. Задать параметры вольтметров  $U1, U3$  и амперметров  $A1, A2, A3$  аналогично п.3.2.Б.9.

3.2.В.9. Задать параметры датчиков тока  $V_J, V_{i3}$  аналогично п.3.2.Б.10.

3.2.В.10. Настройку четырехканального осциллографа *XSCI* провести аналогично п.3.2.Б.11.

3.2.В.11. Провести виртуальный эксперимент измерения токов, напряжений, активной мощности и получения временных зависимостей  $Vl(t), J(t), i_3(t)$ .

- Запустить модель переключателем

- Учитывая замечание п.3.2.Б.12, зафиксировать показания вольтметров  $U1, U3$  амперметров  $A1, A2, A3$ , ваттметра *XWMI* и изображения временных зависимостей  $Vl(t), J(t), i_3(t)$ .

- Отключить модель переключателем

- Показания вольтметров, амперметров и ваттметра занести в соответствующие графы табл.3.4, в строку "Результат".

Таблица 3.4

Значения сигналов и реакций цепи

	Сигналы				Реакции					
	$Vl_m$	$f_V$	$J_m$	$f_J$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$U_3$	$f$	$P_3$
	В	Гц	А	Гц	А	А	А	В	Гц	Вт
Составляющие										
Суперпозиция										
Результат										

3.2.В.12. Используя визиры определить координаты пяти характерных точек кривой  $i_3(t)$  в пределах ее полупериода. Характерные точки



соответствуют нулевым, максимальным и минимальным значениям кривой  $i_3(t)$  на ее полупериоде. При этом необходимо следующее:

- принять за начало координат точку, в которой начальная фаза  $\psi_V$  сигнала  $Vl(t)$ , равна нулю ( $\psi_V = 2\pi k$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$ );
- значения координат по оси "Y" кривой  $i_3(t)$  разделить на коэффициент передачи датчика тока  $V_{i3}$  и занести в соответствующие графы табл.3.5, в строку "Результат".

Таблица

3.5

Временные зависимости тока  $i_3(t)$

$i_3, A$ \ $t, c$	0				
Составляющие					
Суперпозиция					
Результат					

3.2.В.13. Построить на одной координатной сетке графики временных зависимостей  $Vl(t)$ ,  $J(t)$  и  $i_3(t)$  в пределах одного периода сигнала  $Vl(t)$ . При построении кривой  $i_3(t)$  можно использовать данные строки "результат" табл.3.5. Каждая кривая может иметь свой масштаб по оси "Y".

3.2.В.14. Задать амплитудное значение сигнала  $J_m$  источника тока  $J$  равным нулю (см.п. 3.2.В.6).

3.2.В.15. Повторить операции п.п. 3.2.В.11, 3.2.В.12. Измерения п.3.2.В.12 повторяются для тех же значений времени  $t$ . Полученные данные занести в табл. 3.4 и 3.5 в строку "Составляющие".

3.2.В.16. Восстановить амплитудное значение сигнала источника тока согласно п. 3.2.В.6 и установить амплитудное значение сигнала  $Vl_m$  источника напряжения  $Vl$  равным нулю ( см. п.3.2.В.5 ).

3.2.В.17. Повторить операции п.п. 3.2.В.11, 3.2.В.12. Измерения п.3.2.В.12 повторяются для тех же значений времени  $t$ . Полученные данные занести в табл.3.4 и 3.5 в соответствующую строку "Составляющие".

3.2.В.18. Провести операции наложения составляющих для данных табл.3.4 и 3.5. Результаты наложения занести в строку "Суперпозиция" соответствующих таблиц.

3.2.В.19. Сравнить данные строки "Результат" с данными суперпозиции для каждой таблицы. Сделать выводы об особенностях применения принципа наложения в случае сигналов разной частоты.

### 3.2.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ В ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ С ИСТОЧНИКАМИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ОДИНАКОВОЙ ЧАСТОТЫ

3.2.Г.1. В данной работе использовать схему виртуального эксперимента раздела 3.2.В, рис.3.9.

3.2.Г.2. Установить значение частоты сигнала в диапазоне 50 ... 100 Гц одинаковое для источников  $Vl$  и  $J(f_V = f_J)$ .

Остальные параметры источников установить такими же, как в п.п. 3.2.В.5 и 3.2.В.6.

3.2.Г.3. Настройки приборов аналогичны настройкам в разделе 3.2.В.

3.2.Г.4. Провести виртуальные эксперименты в соответствии с п.п. 3.2.В.11, ..., 3.2.В.19.

Результаты измерений занести в соответствующие таблицы 3.6 и 3.7.

3.2.Г.5. Сравнить результаты экспериментов раздела 3.2.Г с результатами аналогичных экспериментов раздела 3.2.В. Сделать выводы об особенностях применения принципа наложения для цепей с источниками синусоидальных сигналов одинаковой частоты и разной частоты.

3.2.Г.6. Сделать выводы о применимости метода комплексных амплитуд в этих двух случаях.

Таблица 3.6

**Параметры сигналов и значения реакций цепи**

	Сигналы			Реакции					
	$Vl_m$	$J_m$	$f$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$U_3$	$f$	$P_3$
	В	А	Гц	А	А	А	В	Гц	Вт
Составляющие									
Суперпозиция									
Результат									

Таблица 3.7

**Временные зависимости тока  $i_3(t)$  в цепи с источниками одинаковой частоты**

$t, c$	0				
$i_3, A$					
Составляющие					
Суперпозиция					
Результат					

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими основными параметрами характеризуются синусоидальные напряжения, токи?

2. В каком соотношении находятся амплитудные и действующие значения синусоидальных сигналов?

3. Как соотносятся между собой начальные фазы синусоидальных напряжения и тока на резисторе, на индуктивности, на емкости?

4. В чем основной смысл анализа линейной цепи с источниками синусоидальных сигналов одинаковой частоты?
5. Что такое комплексная амплитуда, комплексное действующее значение синусоидального напряжения (тока)?
6. Что такое оператор вращения и в чем его смысл?
7. Как восстановить синусоидальную функцию напряжения (тока) в области реального времени по ее известной комплексной амплитуде?
8. Как отображаются в комплексной области резистивный, индуктивный, емкостный элементы и их уравнения?
9. В чем основной смысл метода комплексных амплитуд?
10. Что такое обобщенное комплексное сопротивление (проводимость)?
11. В каких формах могут представляться комплексная амплитуда, комплексное сопротивление (проводимость)?
12. Что представляет собой мгновенная мощность, передаваемая источником синусоидального сигнала потребителю?
13. Что такое комплексная мощность?
14. В каких формах может представляться комплексная мощность?
15. Что такое активная и реактивная составляющие комплексной мощности?
16. Что такое полная мощность?
17. Как отобразить на комплексной плоскости комплексные амплитуды, комплексные сопротивления (проводимости), комплексную мощность?
18. Каким образом можно использовать метод комплексных амплитуд при анализе установившихся режимов в линейных цепях с источниками синусоидальных сигналов разной частоты?
19. В чем заключается основное отличие процедуры наложения в цепях с источниками синусоидальных сигналов одинаковой частоты и разной частоты?