

**Поволжский Государственный университет  
телекоммуникаций и информатики**

**Кафедра ТОРС**

**Михайлов В.И.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ RLC-ЦЕПЕЙ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

**Методические указания**

**к лабораторным работам**

**по 1-й части курса «Теория электрических цепей»**

**Самара, 2014**

## Содержание

1. РАБОТА 1-2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ RL – ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ -----	3
2. РАБОТА 1-3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ RC-ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ -----	11
3. РАБОТА 1-4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ RLC – ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ -----	17
4. РАБОТА 1-5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ RC- И RL –ЦЕПЕЙ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ -----	24
5. РАБОТА 1-6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЦЕПИ С R, L, C – ЭЛЕМЕНТАМИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ -----	32

## 1. РАБОТА 1-2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ $RL$ – ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное исследование последовательной  $RL$  – цепи при изменении частоты источника питания. Проверка опытом расчётных значений напряжений на катушке индуктивности и резисторе и угла сдвига по фазе между входным напряжением и током в цепи. Наблюдение формы входного напряжения, напряжения на резисторе и угла сдвига по фазе между входным напряжением и током в цепи с помощью осциллографа.

#### 2. ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВКУ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Ознакомиться с описанием данной лабораторной работы.
2. Изучить теорию по одному из учебников и конспекту лекций.
3. Выполнить предварительный расчет.
4. Ответить на контрольные вопросы.
5. Ознакомиться с описанием универсального стенда ЛКТС, на котором выполняется лабораторная работа.

#### 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЁТ

1. Для изображенной на рис. 2.4 схемы рассчитать индуктивное сопротивление  $X_L$ , полное сопротивление катушки  $Z_K$ , полное сопротивление цепи  $Z_{\Sigma}$ , ток  $I$ , действующие значения напряжений  $U_R$  и  $U_K$  и угол сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением  $u(t)$  и током  $i(t)$ . Значения параметров цепи для каждой из бригад заданы в таблице 2.1.

Расчет производится на частотах 2, 6, 10, 14, 18 кГц. Входное напряжение для всех бригад  $U = 2В$ . Результаты расчета занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.1. Варианты заданий

<b>№ бригады</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b><math>L</math>, мГн</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>60</b>	<b>65</b>
<b><math>R_K</math>, Ом</b>	<b>119</b>	<b>127</b>	<b>70</b>	<b>116</b>	<b>104</b>	<b>71</b>	<b>116</b>	<b>114</b>
<b><math>R</math>, кОм</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
<b>№ бригады</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	
<b><math>L</math>, мГн</b>	<b>70</b>	<b>75</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>57</b>	<b>60</b>	<b>65</b>	
<b><math>R_K</math>, Ом</b>	<b>132</b>	<b>134</b>	<b>70</b>	<b>71</b>	<b>75</b>	<b>71</b>	<b>116</b>	
<b><math>R</math>, кОм</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	

2. По данным предварительного расчета построить на одном чертеже графики  $X_L$ ,  $Z_{\Sigma}$  и  $I$  в зависимости от  $f$ , а на другом чертеже графики  $U_R$ ,  $U_K$  и  $\varphi$  в зависимости от  $f$ . ПРИМЕЧАНИЕ: для построения нескольких графиков на одном чертеже рекомендуется по оси абсцисс отложить частоту  $f$  в кГц, а осей ординат выбрать столько, сколько графиков различных размерностей требуется построить (см. рис. 2.1 а, б).

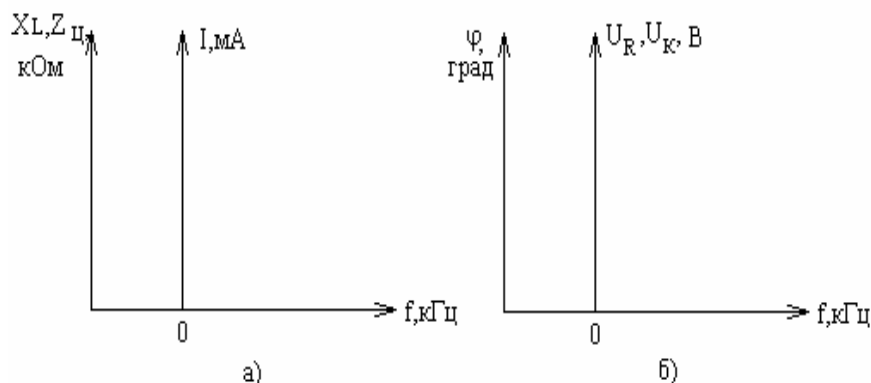


Рис. 2.1. Рекомендуемые виды осей для графиков

#### 4. ПОЯСНЕНИЯ К ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМУ РАСЧЕТУ

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 2.2.

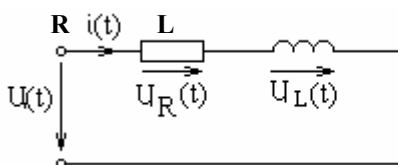


Рис.2.2. Схема последовательной RL-цепи

Предположим, что в цепи протекает косинусоидальный (гармонический) ток  $i(t) = I_m \cos \omega t$ , где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота гармонического тока в рад/с, а  $f$  – частота гармонического тока в Герцах.

По второму закону Кирхгофа для мгновенных значений можно записать  $u(t) = u_R(t) + u_L(t) = iR + L \frac{di}{dt}$

$$R I_m \cos \omega t - \omega L I_m \sin \omega t = R I_m \cos \omega t + \omega L I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Из полученного выражения видно, что составляющие входного напряжения  $u(t)$  косинусоидальны и являются функциями одной и той же частоты  $\omega$ , следовательно, входное напряжение будет также косинусоидальным. Падение напряжения на резисторе

$u_R(t) = R \cdot I_m \cos \omega t$  совпадает по фазе с током  $i(t)$ , а падение напряжения на идеальной индуктивности

$$u_L(t) = \omega L I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

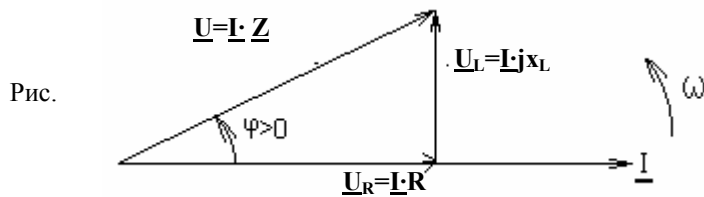
опережает ток на угол  $90^\circ$ . Величина  $\omega L = x_L$  называется реактивным сопротивлением индуктивности.

Основная сложность расчета цепей по мгновенным значениям заключается в том, что необходимо находить решения неоднородных дифференциальных уравнений. Расчет неразветвлённых цепей упрощается, если анализ вести на основе векторных диаграмм.

Векторной диаграммой называется совокупность векторов (имеющих одинаковую угловую частоту  $\omega$ ), построенных с соблюдением их взаимной ориентации по фазе. Векторные диаграммы строятся как для амплитудных, так и для действующих значений, которые в  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитудных:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad \text{- для косинусоидальных (или синусоидальных) величин.}$$

На рис. 2.3 изображена на вещественной плоскости векторная диаграмма рассматриваемой RL-цепи.



### 2.3. Векторная диаграмма последовательной RL-цепи

Как видно из диаграммы, вектор входного напряжения  $\underline{U}$  опережает ток на угол  $\varphi$ , равный разности начальных фаз входного напряжения и тока

$$\varphi = \arctg\left(\frac{U_L}{U_R}\right) = \arctg\left(\frac{x_L}{R}\right) > 0$$

(за положительное направление отсчета угла  $\varphi$  принято **направление**, противоположное вращению часовой стрелки).

Из векторной диаграммы следует, что

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{(I \cdot R)^2 + (I \cdot x_L)^2} = I \sqrt{R^2 + x_L^2}, \text{ где}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + x_L^2} \quad - \text{называется полным сопротивлением последовательной } \mathbf{RL} \text{ - цепи}$$

гармоническому току.

Для разветвлённых цепей гармонического тока расчет на основе векторных диаграмм сложен.

Широкое распространение для анализа таких цепей получил символический метод, или метод комплексных амплитуд, или как иногда его называют, просто комплексный метод (предполагается, что основные положения символического метода студентам известны). Применяя комплексный метод расчета к рассматриваемой цепи, т.е. заменяя мгновенное значение тока  $i(t)$  на комплексное действующее  $\underline{I}$  и мгновенное значение напряжения  $u(t)$  на комплексное действующее  $\underline{U}$ , получим в комплексной форме записи уравнение по второму закону Кирхгофа

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L = \mathbf{R} \cdot \underline{I} + j\omega \mathbf{L} \cdot \underline{I} = \underline{I} \cdot (\mathbf{R} + jx_L).$$

Это уравнение алгебраическое с комплексными величинами. Решать такое уравнение проще, чем дифференциальное. В этом заключается основное преимущество символического метода при расчете цепей гармонического тока в установившемся режиме работы.

Комплексная форма записи закона Ома для последовательной  $\mathbf{RL}$ -цепи:  $\underline{I} = \underline{U} / \underline{Z}$ ,

где  $\underline{Z} = Ze^{j\varphi} = R + jx_L = \sqrt{R^2 + x_L^2} \cdot e^{j\arctg(x_L/R)}$  — комплексное сопротивление цепи,

$Z = \sqrt{R^2 + x_L^2}$  - модуль комплексного сопротивления цепи (полное сопротивление гармоническому току);  $\varphi = \arctg(x_L/R)$  - аргумент комплексного сопротивления (угол сдвига по фазе между  $\underline{U}$  и  $\underline{I}$ ).

Таким образом, на основании выше изложенного для цепи рис. 2.4 с реальной катушкой индуктивности основные формулы и соотношения следующие:



Рис. 2.4. Схема замещения последовательной  $\mathbf{RL}$ -цепи

$$\underline{Z}_c = \mathbf{R} + \mathbf{R}_k + jX_L, \text{ где } X_L = \omega \mathbf{L}, \underline{I} = \underline{U} / \underline{Z}_c, \underline{U}_R = \underline{I} \cdot \mathbf{R}; \underline{U}_k = \underline{I} \cdot \underline{Z}_k, \text{ где } \underline{Z}_k = \mathbf{R}_k + jX_L;$$

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_k.$$

Поскольку приборы, используемые в лабораторном стенде, измеряют действующие значения

напряжений, т.е. модули комплексных действующих значений,  $U = |\underline{U}| = |U \cdot e^{j\psi}|$ , то для предварительного расчета используются следующие формулы

$$Z_{ц} = \sqrt{(R + R_K)^2 + x_L^2}; I = \frac{U}{Z_{ц}}; Z_K = \sqrt{R_K^2 + x_L^2}; \varphi = \arctg\left(\frac{x_L}{R + R_K}\right); U_K = I \cdot Z_K; U_R = I \cdot R.$$

## 5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему для измерения  $U_R$  и угла сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в цепи согласно рис. 2.5 и 2.6.

2. Установить регуляторы на блоках Г1, Г2, Г3, "φ - V3" в положения, показанные на схеме рис. 2.6.

3. Включить на блоке питания БП тумблеры: "СЕТЬ", "ГЕНЕРАТОР", "φ - V3", "КОММУТАТОР-ОСЦИЛЛОГРАФ".

4. Установить по вольтметру V1 напряжение  $U=2В$  и поддерживать его постоянным при каждом изменении частоты генератора Г1.

5. Измерить  $U_R$  и  $\varphi$  на заданных частотах и результаты занести в таблицу 2.2. Обратить внимание на положение тумблера "φ-V3". При измерении  $U_R$  он должен находиться в положении "V3", а при измерении  $\varphi$  - в положении "φ" (можно использовать и V2, подключив его вход к точке соединения  $R$  и  $L_A$  и включив соответствующий тумблер на БП).

6. Отключить от исследуемой цепи блок "φ-V3" и подключить осциллограф (блок ЭК) (см. рис. 2.5, 2.6). Регуляторы на блоке ЭК установить в положения, показанные на схеме рис.2.6. Переключатель числа каналов установить в среднее положение, при этом на экране осциллографа (блок БО) одновременно появятся изображения мгновенных напряжений на входе цепи  $u(t)$  и на резисторе  $u_R(t)$ . Напряжение  $u_R(t)$  пропорционально току  $i(t)$ , совпадает с ним по фазе и имеет ту же форму. Регулятор "РАЗВЁРТКА" на блоке ЭК установить в такое положение, при котором на экране осциллографа будут наблюдаться  $1,5 \div 2$  периода исследуемых напряжений.

ПРИМЕЧАНИЕ: Если переключатель числа каналов установить в положение 1 – на экране осциллографа будем наблюдать только напряжение на входе цепи, при положении 2 – напряжение на резисторе.

7. Зарисовать попарно осциллограммы  $u(t)$  и  $u_R(t)$  на частотах 2 кГц и 18 кГц. Обратить внимание на то, что угол сдвига по фазе между  $u(t)$  и  $u_R(t)$  является измеряемым в п. 5 углом сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в цепи. Сделать вывод об изменении угла  $\varphi$  на осциллограммах при изменении частоты.

Таблица 2.2. Данные расчетов и измерений

U=2 В	Величины									
	Измеренные			Расчетные						
Частота генератора $f$ , кГц	$U_R$	$\varphi$	$U_K$	$X_L$	$Z_K$	$Z_{ц}$	I	$U_R$	$U_K$	$\varphi$
	В	град	В	кОм	кОм	кОм	мА	В	В	град
2										
6										
10										
14										
18										

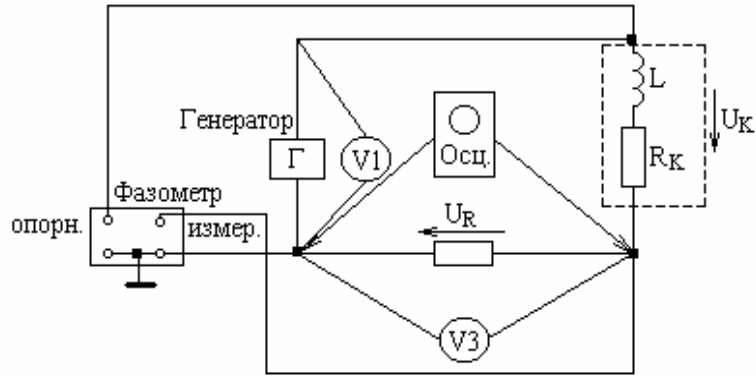


Рис. 2.5. Принципиальная схема измерения  $U_R$  и  $\varphi$

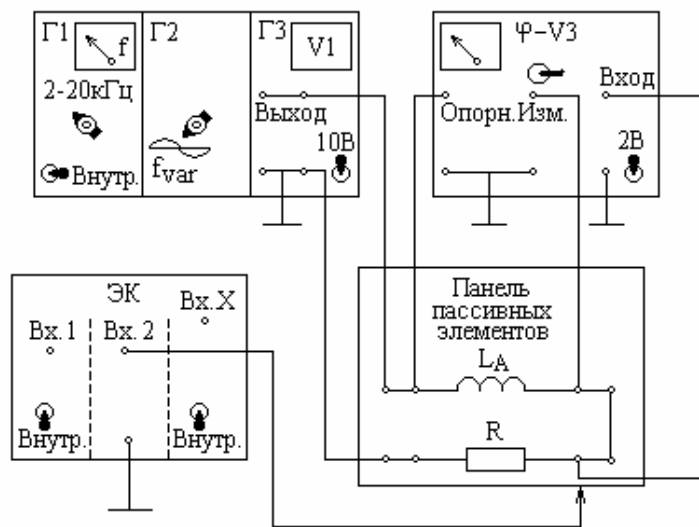


Рис. 2.6. Монтажная схема измерения  $U_R$  и  $\varphi$

8. Измерить напряжение на катушке индуктивности  $U_K$  на заданных частотах и результаты занести в таблицу 2.2. Для этого:

- отключить от измеряемой цепи блок ЭК,
- поменять местами в исследуемой цепи катушку индуктивности  $L_A$  и резистор  $R$ ,
- подключить вольтметр  $V3$  блока "φ - V3" к катушке индуктивности (см. рис. 2.7).

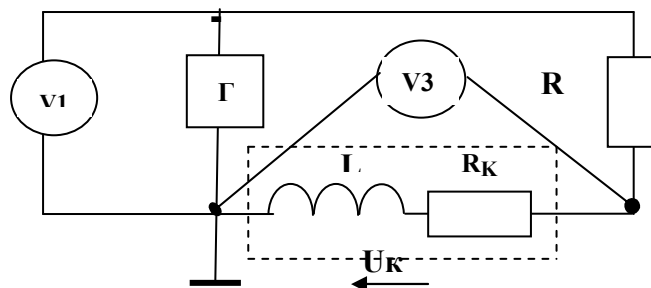


Рис. 2.7. Принципиальная схема измерения  $U_K$

### Описание выполнения работы в Electronic Workbench 5.12

1. Собирается схема для измерения  $U_R$  и угла сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в цепи согласно рис 2.8.

Для этого следует выбрать нужный элемент на панели и буксировать его, не отпуская левой кнопки мыши, на рабочий стол (технология **Drag and Drop**). Генератор переменного напряжения и заземление находятся на панели источников, пассивные элементы и точки соединений  $\square$  на панели резисторов, вольтметр – на панели индикаторов, а осциллограф и измеритель фазы – на панели инструментов. Чтобы соединить два элемента между собой, необходимо подвести курсор к внешнему выводу первого элемента и при появлении точки нажать левую кнопку мыши. Далее, не отпуская кнопки, надлежит подвести курсор к внешнему выводу второго элемента и при появлении точки отпустить левую кнопку мыши. Проводник можно подсоединять не только к внешнему выводу элемента, но и к середине другого проводника. Если нужно убрать лишний проводник, то курсор подводят к радиоэлементу и при появлении точки отводят проводник в сторону (как бы отрывая его). При необходимости элемент можно повернуть на 90 градусов. Для этого его надо активизировать (навести на него курсор, “щелкнуть” левой кнопкой мыши и его цвет должен стать красным). Затем в главном меню выбрать пункт Circuit, а там - подпункт Rotate. Аналогичный эффект будет достигнут, если после активизации радиоэлемента нажать комбинацию клавиш **Ctrl+R**. При составлении схем один узел должен быть обязательно “заземлен”: Зажимы осциллографа и измерителя фазы уже заземлены автоматически и с заземлением (корпусом) их можно не соединять.

2. Устанавливается напряжение генератора  $U=2\text{В}$  и поддерживается постоянным при каждом изменении частоты.

3. Измеряются  $U_R$  и  $\varphi$  на заданных частотах.

Ниже приведены осциллограммы  $u(t)$  и  $u_R(t)$  на частотах 2 кГц и 18 кГц. Угол сдвига по фазе между  $u(t)$  и  $u_R(t)$  является углом сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в цепи.

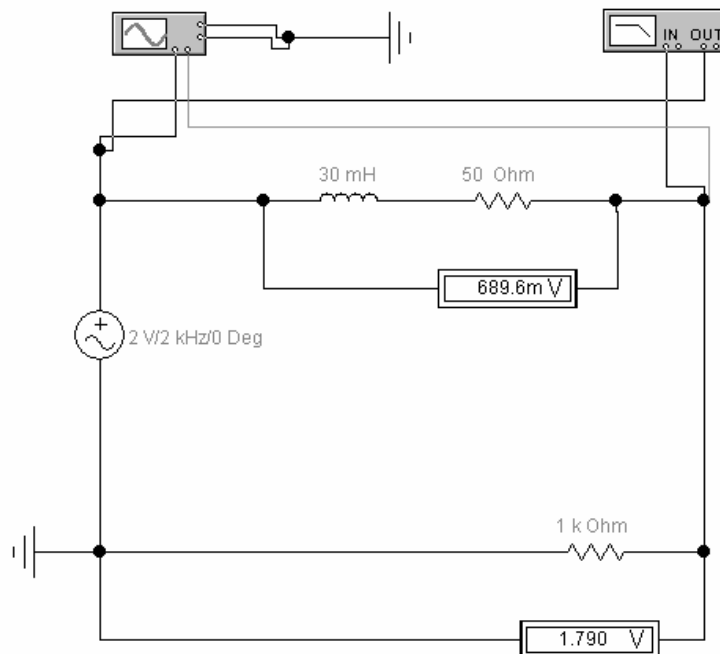


Рис.2.8. Принципиальная схема измерения  $U_R$  и  $\varphi$

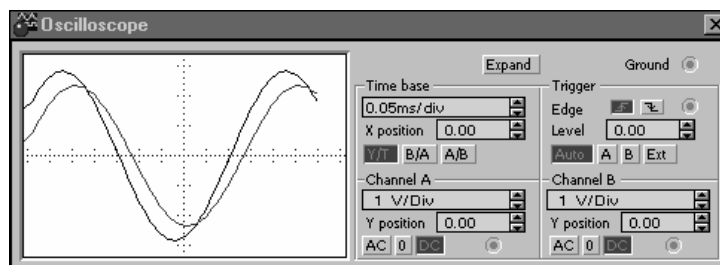


Рис.2.9. Осциллограмма  $u(t)$  и  $u_R(t)$  на частоте 2 кГц



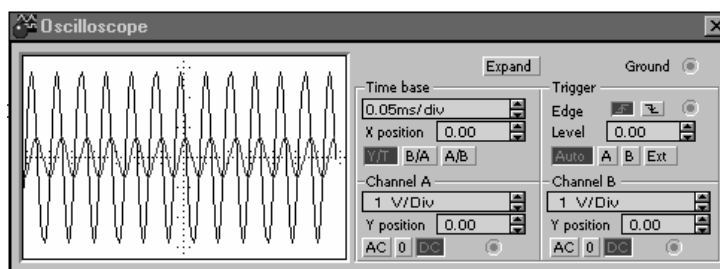


Рис.2.10. Осциллограмма  $u(t)$  и  $u_R(t)$  на частоте 18 кГц

График изменения угла сдвига по фазе между входным напряжением и током в цепи отображается на экране фазометра (Bode Ploter) и показан на рис.2.11.

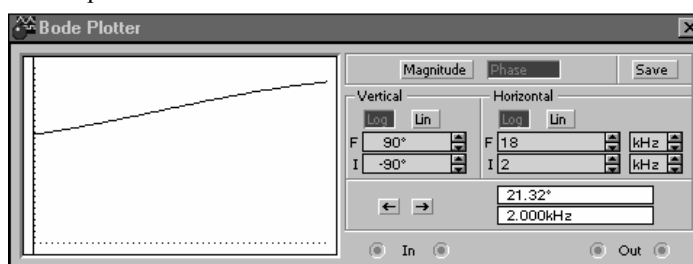


Рис.2.11. Измерение угла  $\varphi$

4. Измеряется напряжение на катушке индуктивности  $U_k$  на заданных частотах. Для этого собирается схема согласно рис.2.12. Можно все измерять в одной схеме по рис. 2.8.

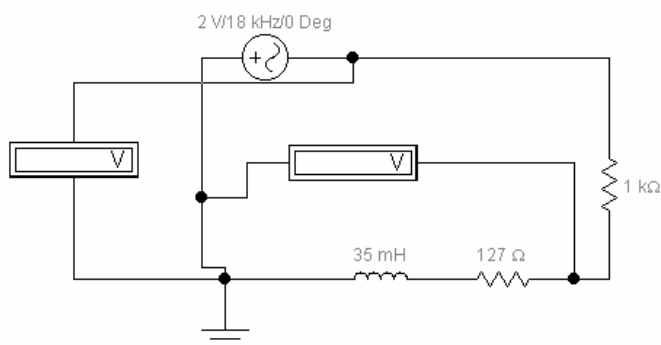


Рис.2.12. Принципиальная схема измерения  $U_k$

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Исходные данные для бригады.
2. Схемы для расчета рис. 2.4 и измерений рис. 2.5 и 2.7.
3. Расчетные формулы.
4. Пример предварительного расчета для одной частоты.
5. Результаты расчетов и измерений, оформленные в табл. 2.2.
6. Чертеж с графиками  $X_L$ ,  $Z_u$ ,  $I(f)$ , построенными по результатам предварительного расчета и чертеж с графиками  $U_R$ ,  $U_k$ ,  $\varphi(f)$ , построенными по результатам предварительного расчета и эксперимента.
7. Осциллограммы, полученные в п.7 и выводы об изменении угла в зависимости от частоты.
8. Две векторные диаграммы, построенные в масштабе по результатам эксперимента для частот 2 кГц и 18 кГц. На диаграмме изобразить вектора  $I$ ,  $U_R$ ,  $U_k$ ,  $U$ , а также показать угол  $\varphi$ .
9. Выводы о характере частотных зависимостей измеренных величин и совпадении расчетных и опытных данных.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как измерить напряжения на резисторе  $U_R$  и на катушке индуктивности  $U_K$  в последовательной  $R L$  – цепи при гармоническом воздействии?
2. Как измерить угол сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в цепи?
3. По каким формулам можно рассчитать комплексное  $\underline{Z}$  и полное  $Z$  сопротивление:
  - а) последовательной  $R L$  – цепи,
  - б) последовательной  $R L$  – цепи, если в неё ввести ещё одну катушку индуктивности (или ещё один резистор)?
4. Как записать второй закон Кирхгофа и закон Ома в последовательной  $R, L$  – цепи для комплексных и действующих значений?
5. По какой формуле рассчитывается угол сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в цепи?
6. По каким формулам можно рассчитать комплексные и действующие значения напряжений  $\underline{U}_R (U_R)$ ,  $\underline{U}_L (U_L)$ ,  $\underline{U}_K (U_K)$ ?
7. В чём отличие понятий "индуктивность" и "катушка индуктивности"?
8. Как построить векторную диаграмму для последовательной  $R L$  – цепи?
9. Как изменится векторная диаграмма при увеличении (уменьшении) частоты источника питания?
10. Каковы частотные зависимости индуктивного сопротивления  $X_L$ , полного сопротивления  $Z$ , тока  $I$ , напряжений на элементах  $U_R, U_L$  и угла сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в последовательной  $R L$  – цепи?

### Литература

1. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2009, с. 72-69.
2. Бакалов В.П., Игнатов А. Н., Крук Б. И. Основы теории электрических цепей и электроники. -М.: Радио и связь, 1989, с. 1-66.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Гардарики, 1999, с. 81-133.
4. Зевеке Г. В. и др., Основы теории цепей. -М.: Энергоатомиздат. 1989, с. 1- 114.
5. Методические указания к лабораторным работам по 1-й части курса “Основы теории цепей”. ПГАТИ, каф. ТЭЦ, Самара, 2002.
6. Попов В. П. Основы теории цепей. -М.: Высшая школа, 2007, с. 1-143.
7. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. -М.: Высшая школа, 1990, с. 1- 163.

## 2. РАБОТА 1-3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ RC-ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное исследование последовательной  $RC$ -цепи при изменении частоты источника питания. Проверка опытом расчетных значений напряжений на конденсаторе и резисторе и угла сдвига по фазе между входным напряжением и током в цепи.

Наблюдение формы входного напряжения, напряжения на резисторе и угла сдвига по фазе между входным напряжением и током в цепи с помощью осциллографа.

#### 2. ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВКУ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Ознакомиться с описанием данной лабораторной работы.
2. Изучить теорию по одному из учебников и конспекту лекций.
3. Выполнить предварительный расчет.
4. Ответить на контрольные вопросы.
5. Ознакомиться с описанием универсального стенда ЛКТЦ, на котором выполняется лабораторная работа.

#### 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Для изображенной на рис. 3.2 схемы рассчитать емкостное сопротивление  $X_C$ , полное сопротивление цепи  $Z$ , ток  $I$ , действующие значения напряжений  $U_R$  и  $U_C$  и угол сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением  $U$  и током  $I$ .

Значения параметров для каждой из бригад заданы в табл. 3.1. Расчет производится на частотах 2, 6, 10, 14, 18 кГц. Входное напряжение для всех бригад  $U = 2$  В. Результаты расчета занести в табл. 3.2.

2. По данным предварительного расчета построить на одном чертеже графики  $X_C$ ,  $Z$  и  $I$  в зависимости от  $f$ , а на другом чертеже графики  $U_R$ ,  $U_C$  и  $\varphi$  в зависимости от  $f$ .

**ПРИМЕЧАНИЕ** : для построения нескольких графиков на одном чертеже рекомендуется по оси абсцисс отложить частоту  $f$  в кГц, а осей ординат выбрать столько, сколько графиков различных размерностей требуется построить (см. рис. 3.1 а,б).

Таблица 3.1. Данные расчетов и измерений

<b>№ бригады</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
$C$ , нФ	23,4	17,2	12,92	10	7,92	6,37	5,21	4,32
$R$ , кОм	1	1	1	1	1	3	3	3
<b>№ бригады</b>	9	10	11	12	13	14	15	
$C$ , нФ	3,62	3,06	4,18	3,48	3,08	2,7	2,3	
$R$ , кОм	3	3	10	10	10	10	10	

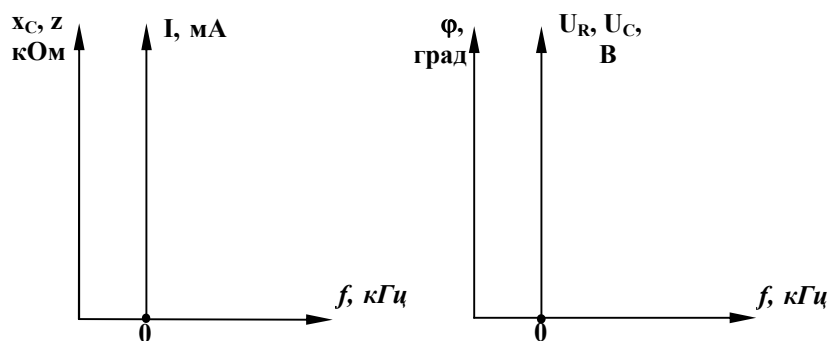


Рис.3.1. Рекомендуемые виды осей для графиков

#### 4. ПОЯСНЕНИЯ К ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМУ РАСЧЕТУ

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 3.2.

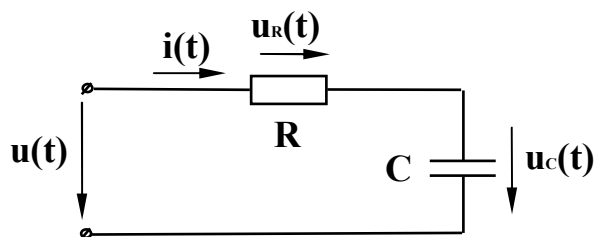


Рис. 3.2 Схема исследуемой цепи

Предположим, что в цепи протекает ток  $i(t) = I_m \cdot \cos(\omega t)$ , где  $\omega = 2\pi f$  - угловая частота гармонического косинусоидального тока в радианах, а  $f$  - частота в Герцах.

На основании второго закона Кирхгофа для мгновенных значений можно записать

$$u(t) = u_R(t) + u_C(t) = R \cdot i(t) + (1/C) \cdot \int i(t) dt,$$

$$\text{или, подставив } i(t), u(t) = R \cdot I_m \cdot \cos \omega t + (1/\omega C) \cdot I_m \sin \omega t = R \cdot I_m \cdot \cos(\omega t) + (1/\omega C) \cdot I_m \cdot \cos(\omega t - \pi/2),$$

где  $1/\omega C = X_C$  (1) называется реактивным сопротивлением емкости.

Из полученного выражения видно, что составляющие входного напряжения  $u(t)$  косинусоидальны и являются функциями одной и той же частоты  $\omega$ , следовательно, входное напряжение будет также косинусоидальным.

Напряжение на резисторе  $u_R(t) = R \cdot I_m \cdot \cos(\omega t)$  совпадает по фазе с током  $i(t) = I_m \cdot \cos(\omega t)$ , а напряжение на идеальной емкости  $C$

$$u_C(t) = (1/\omega C) \cdot I_m \cdot \cos(\omega t - \pi/2) \text{ отстает от тока на } 90^\circ.$$

Векторная диаграмма для последовательной RC-цепи изображена на рис. 3.3.

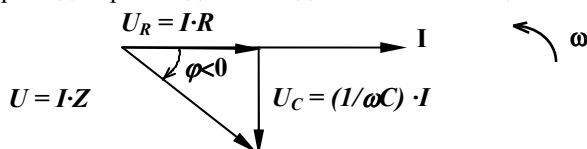


Рис. 3.3. Векторная диаграмма RC-цепи

Из векторной диаграммы видно, что вектор входного напряжения  $U$  отстает от тока на угол  $\varphi$ , равный разности начальных фаз входного напряжения и тока.  $\varphi = -\arctg(U_C/U_R) = -\arctg(x_C/R)$ .

Как следует из векторной диаграммы,

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = I \cdot \sqrt{R^2 + x_C^2},$$

где  $\sqrt{R^2 + x_C^2} = Z$  (2) - полное сопротивление последовательной RC-цепи гармоническому току.

$$\text{Действующее значение тока в цепи } I = U/R = U/Z, \quad (3)$$

действующие значения напряжений на элементах  $R$  и  $C$  соответственно равны

$$U_R = I \cdot R \quad (4), \quad U_C = I \cdot x_C \quad (5).$$

В комплексной форме уравнение по второму закону Кирхгофа для последовательной  $R, C$ -цепи запишется так:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C = R \cdot \underline{I} + (1/j\omega C) \cdot \underline{I} = R \cdot \underline{I} - j(1/\omega C) \cdot \underline{I} = \underline{I} \cdot (R - jx_C),$$

где  $\underline{Z} = R - jx_C = \sqrt{R^2 + x_C^2} \cdot e^{-j\arctg(x_C/R)} = Z \cdot e^{j\varphi}$  - комплексное сопротивление цепи;

$Z = \sqrt{R^2 + x_C^2}$  - модуль комплексного сопротивления цепи, или полное сопротивление;

$\varphi = -j \arctg(x_C/R)$  (6) - аргумент комплексного сопротивления (угол сдвига по фазе между  $\underline{U}$  и  $\underline{I}$ ).

В данной работе для предварительного расчета используются формулы (1)-(6).

## 5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему для измерения  $U_R$  и угла сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в цепи согласно рис. 3.4. Монтажная схема измерений приведена на рис. 3.5.

2. Установить регуляторы на блоках Г1, Г2, Г3, “ $\varphi$ -V3” в положения, показанные на схеме рис.3.5.

3. Включить на блоке питания БП тумблеры: “СЕТЬ”, “ГЕНЕРАТОР”, “ $\varphi$ -V3”, “КОММУТАТОР-ОСЦИЛЛОГРАФ”.

4. Установить по вольтметру V1 напряжение  $U = 2\text{В}$  и поддерживать его постоянным при каждом изменении частоты генератора Г1.

5. Измерить  $U_R$  и  $\varphi$  на заданных частотах и результаты занести в табл.3.2. Обратить внимание на положение тумблера “ $\varphi$ -V3”. При измерении  $U_R$  он должен находиться в положении “V3”, а при измерении  $\varphi$  - в положении “ $\varphi$ ”.

Таблица 3.2. Данные расчетов и измерений

Частота генерат. $f$ в кГц	Величины								
	Измеренные			Расчетные					
	$U_R$ В	$\varphi$ град	$U_C$ В	$X_C$ кОм	$Z$ кОм	$I$ мА	$U_R$ В	$U_C$ В	$\varphi$ град
2									
6									
10									
14									
18									

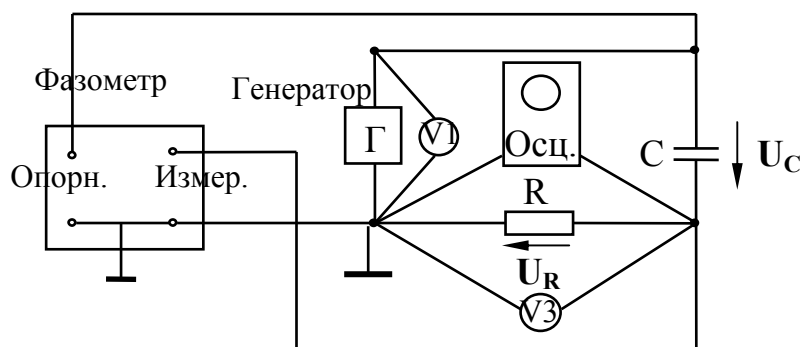


Рис. 3.4. Принципиальная схема измерения  $U_R$  и  $\varphi$

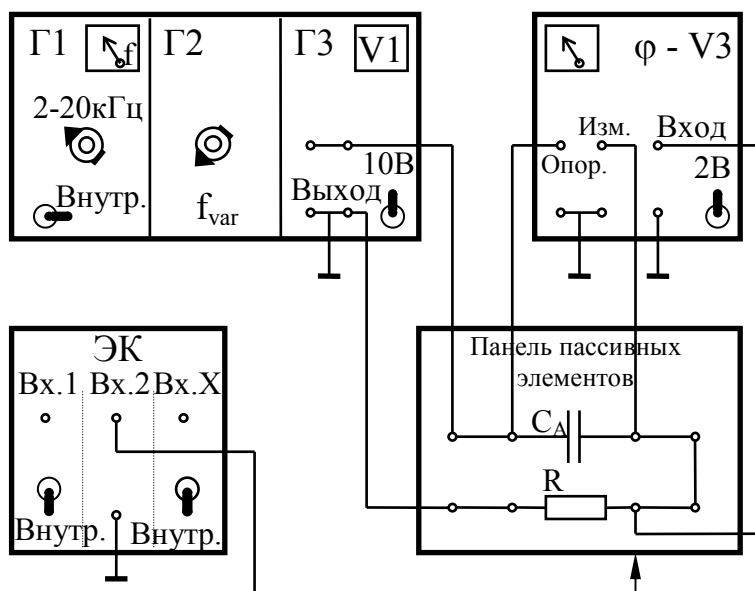


Рис.3.5. Монтажная схема измерения  $U_R$  и  $\varphi$

6. Отключить от исследуемой цепи блок “ $\varphi$ -V3” и подключить осциллограф (блок ЭК) (см. рис.3.4 и 3.5).

Регуляторы на блоке ЭК установить в положения, показанные на схеме рис.3.5. Переключатель числа каналов установить в среднее положение, при этом на экране осциллографа (блок БО) одновременно

появятся изображения мгновенных напряжений на входе цепи  $u(t)$  и на резисторе  $u_R(t)$ . Напряжение  $u_R(t)$  пропорционально току  $i(t)$ , совпадает с ним по фазе и имеет ту же форму.

Регулятор “РАЗВЕРТКА” на блоке ЭК установить в такое положение, при котором на экране осциллографа будут наблюдаться 1,5-2 периода исследуемых напряжений.

ПРИМЕЧАНИЕ: Если переключатель числа каналов установить в положение 1, на экране осциллографа будем наблюдать только изображение входного напряжения, при положении 2 - изображение напряжения на резисторе.

7. Зарисовать попарно осциллограммы  $u(t)$  и  $u_R(t)$  на частотах 2кГц и 18 кГц. Обратит внимание на то, что угол сдвига по фазе между  $u(t)$  и  $u_R(t)$  является измеряемым в п.5 углом сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в цепи. Сделать вывод об изменении угла  $\varphi$  на осциллограммах при изменении частоты.

8. Измерить напряжение на конденсаторе  $U_C$  на заданных частотах и результаты занести в табл.3.2.

Для этого: а) отключить от измеряемой цепи блок ЭК,

б) поменять местами в исследуемой цепи конденсатор  $C_A$  и резистор  $R$ ,

в) подключить вольтметр  $V3$  блока “ $\varphi$ - $V3$ ” к конденсатору  $C_A$  (см. рис.3.6).

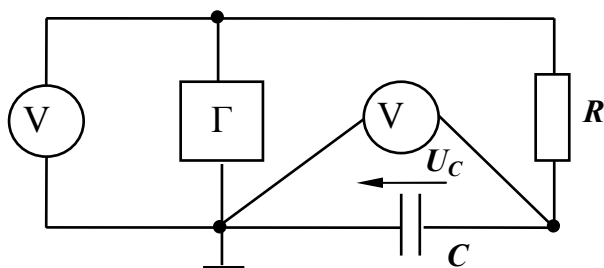


Рис.3.6. Принципиальная схема измерения  $U_C$

### Выполнение работы в программе Electronics Workbench:

1. Запустить программу **Electronics Workbench (EWB)**, используя ярлык или окна интерфейса: “пуск” и “программы”.

2. Собрать схему измерения по рисунку 3.7.

Для этого следует выбрать нужный элемент на панели и буксировать его, не отпуская левой кнопки мыши, на рабочий стол (технология **Drag and Drop**). Генератор переменного напряжения и заземление находятся на панели источников, пассивные элементы и точки соединений □ на панели резисторов, вольтметр – на панели индикаторов, а осциллограф и измеритель фазы — на панели инструментов. Чтобы соединить два элемента между собой, необходимо подвести курсор к внешнему выводу первого элемента и при появлении точки нажать левую кнопку мыши. Далее, не отпуская кнопки, надлежит подвести курсор к внешнему выводу второго элемента и при появлении точки отпустить левую кнопку мыши. Проводник можно подсоединять не только к внешнему выводу элемента, но и к середине другого проводника. Если нужно убрать лишний проводник, то курсор подводят к радиоэлементу и при появлении точки отводят проводник в сторону (как бы отрывая его). При необходимости элемент можно повернуть на 90 градусов. Для этого его надо активизировать (навести на него курсор, “щелкнуть” левой кнопкой мыши и его цвет должен стать красным). Затем в главном меню выбрать пункт Circuit, а там - подпункт Rotate. Аналогичный эффект будет достигнут, если после активизации радиоэлемента нажать комбинацию клавиш **Ctrl+R**. При составлении схем один узел должен быть обязательно “заземлен”: Зажимы осциллографа и измерителя фазы уже заземлены автоматически и с заземлением (корпусом) их можно не соединять.

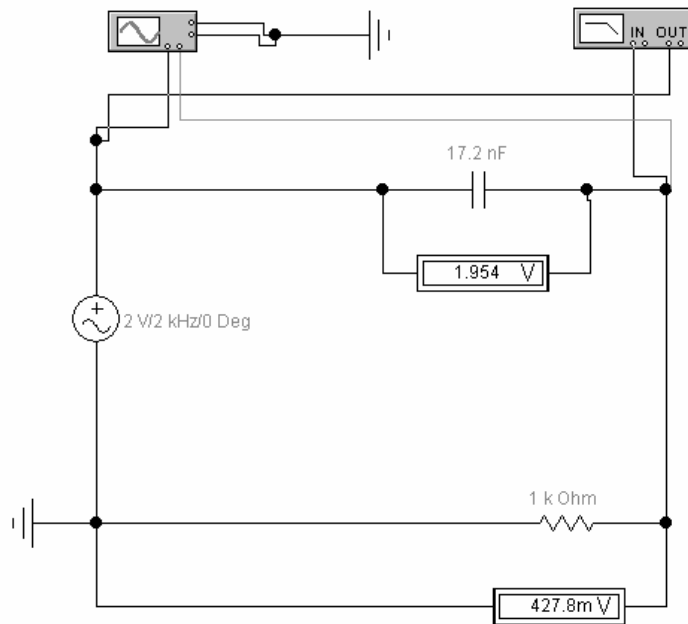


Рис.3.7 Схема исследования на ЭВМ в EWB

3. Установить напряжение генератора **2В**, величины **C = 17.2 нФ**, **R = 1 кОм**. Установка номиналов элементов производится с помощью диалоговых окон, которые вызываются двойным щелчком по соответствующему элементу по позиции Value, а установка обозначений по позиции Label. Аналогично устанавливаются параметры генератора (напряжение, частота). Для получения наглядных осциллограмм целесообразно раскрашивать проводники, подходящие к осциллографу, в разные цвета, дважды щелкнув по выбранному проводнику и выбрав соответствующий цвет.
4. Изменяя частоты в соответствии с заданием  $f = 2, 6, 10, 14, 18$  кГц измерить  $U_R, U_C$  и  $\varphi$ .
5. Для просмотра осциллограмм необходимо развернуть двойным щелчком осциллограф и установить удобные для наблюдений масштабы по вертикали (напряжению) и горизонтали (времени -Time base). На рисунках 3.7, 8 и 9 показаны осциллограммы, полученные на крайних частотах, и график изменения  $\varphi$ .

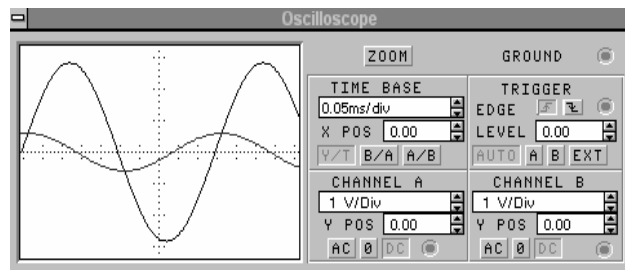


Рис.3.8. Осциллограмма при  $f=2$ кГц

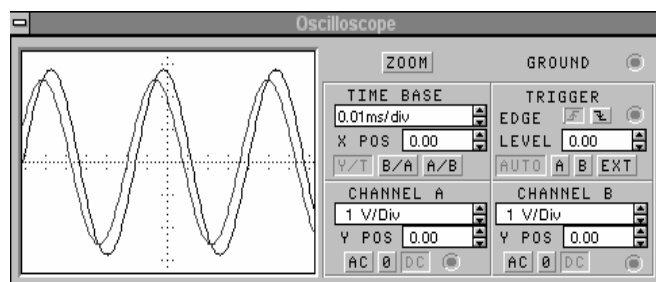


Рис. 3.9. Осциллограмма при  $f=18$ кГц

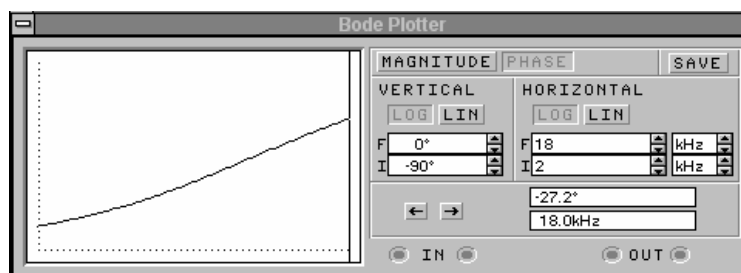


Рис. 3.9. График изменения  $\varphi$

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Исходные данные для бригады.
2. Схемы для расчета рис.3.2 и измерений рис.3.4 и 3.5.
3. Расчетные формулы.
4. Пример предварительного расчета для одной частоты.
5. Результаты расчетов и измерений, оформленные в табл.3.2.
6. Чертеж с графиками  $X_C$ ,  $Z$ ,  $I(f)$ , построенными по результатам предварительного расчета и чертеж с графиками  $U_R$ ,  $U_C$ ,  $\varphi(f)$ , построенными по результатам предварительного расчета и эксперимента.
7. Осциллограммы, полученные в П.7, и выводы об изменении угла  $\varphi$  в зависимости от частоты.
8. Две векторные диаграммы, построенные в масштабе по результатам эксперимента для частот 2кГц и 18кГц. На диаграммах изобразить векторы  $\underline{I}$ ,  $\underline{U}_R$ ,  $\underline{U}_C$ ,  $\underline{U}$ , а также показать угол  $\varphi$ .
9. Сделать выводы о совпадении расчетных и опытных данных.

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как измерить напряжения на резисторе  $U_R$  и на конденсаторе  $U_C$  в последовательной  $R,C$  - цепи при гармоническом воздействии?
2. Как измерить угол сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в цепи?
3. По каким формулам можно рассчитать комплексное  $\underline{Z}$  и полное  $Z$  сопротивления последовательной  $R,C$ -цепи?
4. Как записать второй закон Кирхгофа и закон Ома в последовательной  $R,C$ -цепи для комплексных и действующих значений?
5. По какой формуле рассчитывается угол сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в цепи?
6. По каким формулам можно рассчитать комплексные и действующие значения напряжений  $\underline{U}_R(U_R)$ ,  $\underline{U}_C(U_C)$ ?
7. В чем отличие понятий “емкость” и “конденсатор”?
8. Как построить векторную диаграмму для последовательной  $R,C$ - цепи?
9. Как изменится векторная диаграмма при увеличении (уменьшении) частоты источника питания?
10. Каковы частотные зависимости емкостного сопротивления  $X_C$ , полного сопротивления  $Z$ , тока  $I$ , напряжений на элементах  $U_R$ ,  $U_C$  и угла сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в последовательной  $R,C$ -цепи?

## Литература

1. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2009, с. 72-69.
2. Бакалов В.П, Игнатов А. Н., Крук Б. И. Основы теории электрических цепей и электроники. -М.: Радио и связь, 1989, с. 1-66.
3. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей. - М.: Радио и связь. 1986, с. 1- 185.
4. Зевеке Г. В. и др., Основы теории цепей. -М.: Энергоатомиздат. 1989, с. 1- 114.
5. Карлашук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: Солон Р. 2001, - 512с.
6. Методические указания к лабораторным работам по 1-й части курса “Основы теории цепей”. ПГАТИ, каф. ТЭЦ, Самара, 2002.
7. Попов В. П. Основы теории цепей. -М.: Высшая школа, 2007, с. 1-143.
8. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. -М.: Высшая школа, 1990, с. 1- 163.



### 3. РАБОТА 1-4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ RLC – ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное исследование последовательной **RLC** –цепи при изменении частоты источника питания. Экспериментальная проверка расчетных значений напряжений на катушке индуктивности, на конденсаторе, резисторе и угла сдвига по фазе между входным напряжением и током в цепи.

Наблюдение формы входного напряжения, напряжения на резисторе и угла сдвига по фазе между ними с помощью осциллографа.

### 2. ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВКУ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Ознакомиться с описанием данной лабораторной работы.
2. Изучить теорию по одному из учебников и конспекту лекций.
3. Выполнить предварительный расчет.
4. Ответить на контрольные вопросы.
5. Ознакомиться с описанием универсального стенда ЛКТИЦ, на котором выполняется лабораторная работа.

### 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Для схемы рис. 4.1а рассчитать резонансную частоту  $f_0$ , реактивные сопротивления  $X_L$ ,  $X_C$ ,  $X$ , полное сопротивление цепи  $Z$ , ток  $I$ , напряжения на элементах  $U_R$ ,  $U_K$ ,  $U_C$ , угол сдвига по фазе  $\Phi$  между током и входным напряжением для трех значений частоты источника питания:

$$f = f_0 - 2 \text{ кГц}, f = f_0 \text{ кГц}, f = f_0 + 2 \text{ кГц}.$$

Значения параметров для каждой бригады заданы в таблице 4.1. При выполнении работы на ЭВМ по программе ВООК 3 надо взять  $R_K = 0$ , тогда  $U_K = U_L$ . Входное напряжение для всех бригад  $U = 2 \text{ В}$ , сопротивление  $R = 1 \text{ кОм}$ .

Результаты расчета занесите в таблицу 4.2.

2. По данным предварительного расчета построить на одном чертеже графики  $X_L$ ,  $X_C$ ,  $X$ ,  $Z$ ,  $I$  в зависимости от  $f$ , а на другом чертеже – графики  $U_R$ ,  $U_K$ ,  $U_C$ ,  $\Phi$  в зависимости от  $f$ .

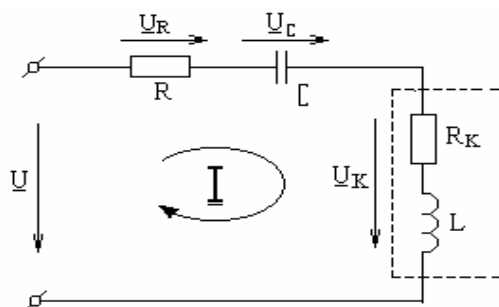


Рис. 4.1а. Схема последовательной RLC-цепи

Таблица 4.1. Исходные данные для предварительного расчета

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
$L$ , мГн	30	35	40	45	50	55	60	65
$C$ , нФ	23,4	17,2	12,9	10	7,92	6,37	5,21	4,32
$R_K$ , Ом	119	127	70	116	104	71	116	114

№ бригады	9	10	11	12	13	14	15
$L$ , мГн	70	75	50	55	57	60	65
$C$ , нФ	3,62	3,06	4,18	3,48	3,08	2,7	2,3
$R_K$ , Ом	132	134	70	71	75	71	116

#### 4. ПОЯСНЕНИЯ К ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМУ РАСЧЕТУ

В последовательной  $R L C$  - цепи рис. 4.1а через все элементы цепи протекает одинаковый ток. Комплексное значение входного напряжения на основании второго закона Кирхгофа в этой цепи равно

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C + \underline{U}_K$$

Комплексные действующие значения напряжений на элементах определяются по закону Ома  $\underline{U}_R = \underline{I} \cdot R$ ,  $\underline{U}_C = \underline{I} \cdot \underline{Z}_C$ ,  $\underline{U}_K = \underline{I} \cdot \underline{Z}_K$ ,

$$\text{где } \underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C} = -j x_C, \quad \underline{Z}_K = R_K + j\omega L = R_K + j x_L.$$

Таким образом, рассматриваемая цепь описывается уравнением

$$\underline{U} = \underline{I} \cdot (R + \underline{Z}_K + \underline{Z}_C) = \underline{I} \cdot \underline{Z}.$$

Здесь  $\underline{Z}$  - комплексное сопротивление последовательной  $R L C$  - цепи:

$$\underline{Z} = R + \underline{Z}_C + \underline{Z}_K = R + R_K + j(x_L - x_C) = R + R_K + jX$$

Величина  $X = x_L - x_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$  называется реактивным сопротивлением цепи. Комплексное

сопротивление цепи можно записать в показательной форме:

$$\underline{Z} = Z e^{j\varphi},$$

где  $Z = \sqrt{(R + R_K)^2 + X^2}$  - полное сопротивление цепи (модуль комплексного сопротивления) При расчете для выполнения на ЭВМ по программе ВООК 3 принять  $R_K = 0$ .

$\varphi = \arctg \frac{X}{R + R_K}$  - угол сдвига по фазе между током и входным напряжением (аргумент комплексного сопротивления).

Индуктивное сопротивление  $x_L = \omega L$  изменяется прямо пропорционально частоте, емкостное сопротивление  $x_C = \frac{1}{\omega C}$  - обратно пропорционально частоте. Поэтому при изменении частоты меняется и реактивное сопротивление всей цепи  $X$ . Частота, при которой реактивное сопротивление  $X = 0$ , называется резонансной и определяется из соотношения

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0, \quad \omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_A C_A}}.$$

Резонанс в последовательной  $R L C$  - цепи называется резонансом напряжений, т.к. напряжения на реактивных элементах могут быть больше входного напряжения. Вид векторной диаграммы такой цепи зависит от соотношения частоты воздействия и резонансной частоты. На рис.4.1б приведено качественное изображение векторной диаграммы для  $R_K = 0$  и  $\omega < \omega_0$  с комплексными действующими напряжениями и током. Просто действующие значения напряжений на элементах цепи определяются по формулам:  $U_R = I \cdot R$ ,  $U_C = I \cdot x_C$ ,  $U_K = I \cdot Z_K$ .

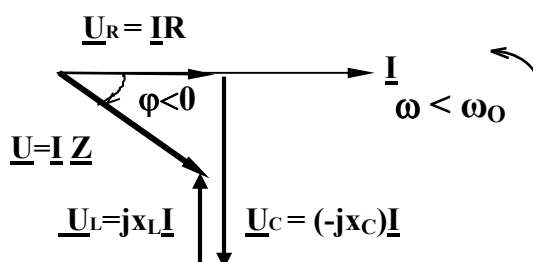


Рис. 4.1б. Векторная диаграмма RLC -цепи

Из диаграммы видно, что  $U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$   
 С учетом  $R_K$  вектор  $\underline{U}_K$  будет опережать вектор тока  $\underline{I}$  на угол меньше  $90^\circ$ .  
 Качественные частотные характеристики реактивных сопротивлений изображены на рис. 1.2.

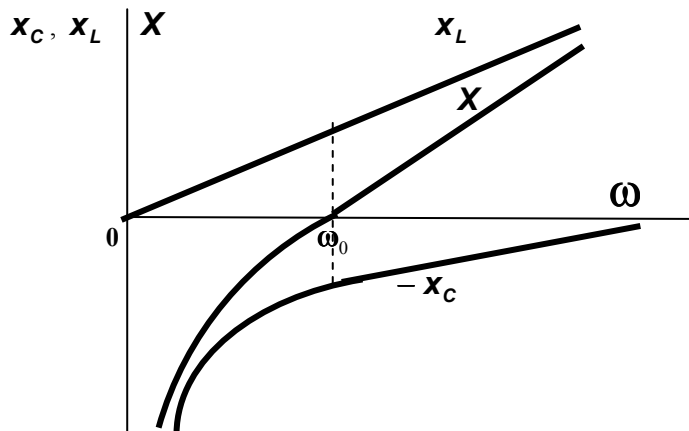


Рис. 4.2. Графики реактивных сопротивлений последовательной RLC-цепи

Поскольку реактивное сопротивление  $X$  зависит от частоты, то полное сопротивление цепи  $Z$ , действующее значение тока  $I = \frac{U}{\sqrt{(R + R_K)^2 + X^2}}$  и угол  $\phi$  тоже зависят от частоты как это показано на

рис. 4.3, 4.4 и 4.5.

где  $Z_K = \sqrt{R_K^2 + x_L^2}$ .

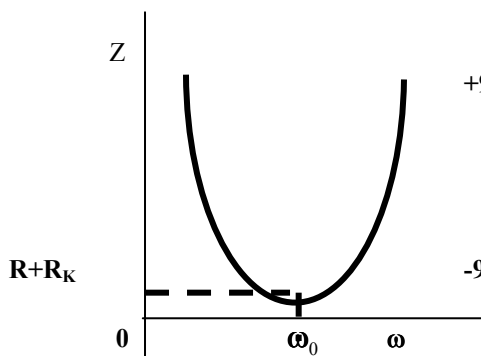


Рис. 4.3. График полного сопротивления последовательной RLC-цепи

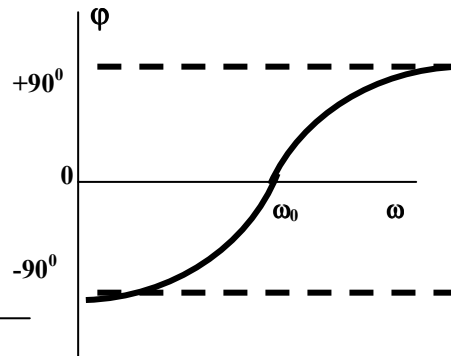


Рис. 4.4. График угла сдвига фаз последовательной RLC-цепи

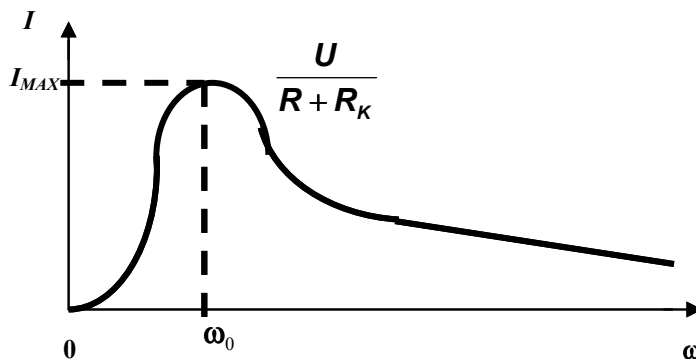


Рис. 4.5. График тока последовательной RLC-цепи

Предварительный расчет целесообразно выполнять при помощи программы Mathcad.[7] Для этого следует запустить программу и записать исходные данные, используя команду присвоения и не забывая перевести все величины в стандартные единицы :омы, генри, фарады. Далее рассчитать резонансную частоту по ее формуле, учитывая, что формула пишется после данных (правее или ниже). Для

дистанционного обучения выполнение данной работы проводится по программе BOOK-3, поэтому следует принять  $R_k=0$ . Для построения графиков непосредственно в программе Mathcad формулы рекомендуется записать как функции частоты  $f$  и построить графики, используя интерфейс графических команд. При этом можно на одном рисунке построить несколько графиков, вводя функции через запятые, если масштаб по вертикали у них близкий. Это можно выполнить для сопротивлений или напряжений. Следует отметить, что углы Mathcad вычисляет в радианах, поэтому для перевода в градусы надо применить множитель  $57,3$  и функцию  $\text{atan}()$ .

Пример расчета в Mathcad 2000 приведен ниже, а построенные графики показаны на рис.4.5а.

Масштаб по горизонтали следует установить по минимальным и максимальным расчетным частотам. Здесь  $R_k=0$ , при выполнении с EWB  $R_k$  выбрать по варианту.

$$L_a := 0.035 \quad C_a := 17.2 \cdot 10^{-9} \quad R := 1000 \quad R_k := 0 \quad U := 2$$

$$f_0 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_a \cdot C_a}} \quad f_0 = 6.487 \times 10^3$$

$$x(f) := 2\pi \cdot f \cdot L_a \quad x_c(f) := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_a} \quad x(f) := x(f) - x_c(f)$$

$$\Psi(f) := 57.3 \cdot \text{atan}\left(\frac{x(f)}{R + R_k}\right) \quad z(f) := \sqrt{(R + R_k)^2 + x(f)^2} \quad I(f) := \frac{U}{z(f)}$$

$$U_r(f) := I(f) \cdot R \quad U_k(f) := I(f) \cdot \sqrt{R_k^2 + x(f)^2} \quad U_c(f) := I(f) \cdot x_c(f)$$

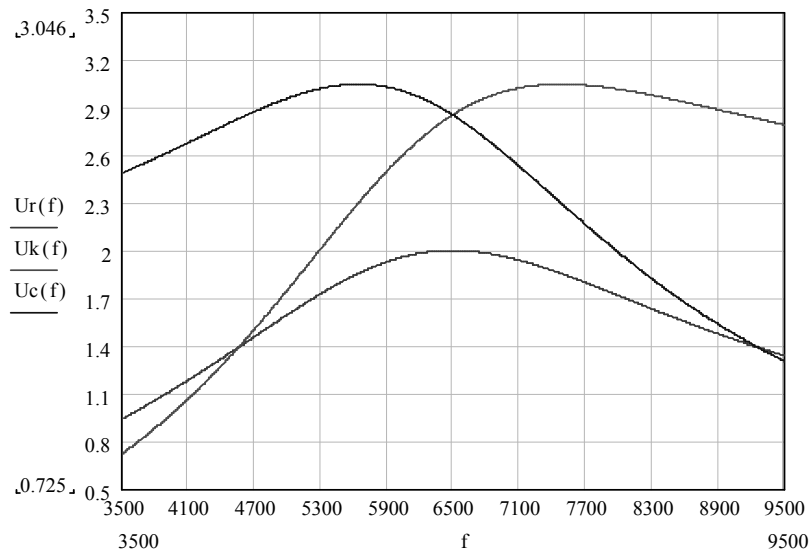


Рис. 4.5а. Графики частотных зависимостей  $U_r, U_k, U_c$

По полученным графикам необходимо определить точки максимумов напряжений  $U_r, U_k, U_c$ .

Для вычисления на разных частотах можно ввести индексную переменную, например  $n$  и организовать их, как показано ниже с использованием специальной команды, которая находится в этой версии в интерфейсе матриц.

$$n := 0..6$$

$$f_n := f_0 - 3000 + 1000n$$

$$x(f) = \begin{pmatrix} 2.136 \times 10^3 \\ 1.469 \times 10^3 \\ 1.109 \times 10^3 \\ 1 \times 10^3 \\ 1.081 \times 10^3 \\ 1.266 \times 10^3 \\ 1.495 \times 10^3 \end{pmatrix} \quad I(f) = \begin{pmatrix} 9.365 \times 10^{-4} \\ 1.362 \times 10^{-3} \\ 1.803 \times 10^{-3} \\ 2 \times 10^{-3} \\ 1.85 \times 10^{-3} \\ 1.58 \times 10^{-3} \\ 1.338 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

## 5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему для измерения  $U_R$  и угла сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в цепи согласно рис. 4.6, учитывая то, что исследуемая цепь состоит из последовательно соединенных элементов  $L_A$ ,  $C_A$  и  $R = 1$  кОм.

2. Установить регуляторы на блоках Г1, Г2, Г3, “ $\varphi$ -V3” в рабочие положения.

3. Включить на блоке питания БП тумблеры: “СЕТЬ”, “ГЕНЕРАТОР”, “ $\varphi$ - V3”, “КОММУТАТОР-ОСЦИЛОГРАФ”. В место вольтметра V3 для измерения напряжений можно использовать V2, включив соответствующий тумблер на БП.

4. Установить по вольтметру V1 напряжение  $U = 2$  В и поддерживать его постоянным при каждом изменении частоты генератора Г1.

5. Определить экспериментально резонансную частоту  $f_{0Э}$ . Для этого, плавно увеличивая частоту генератора от  $f = 2$  КГц, добиться нулевого показания фазометра. Значение  $f_{0Э}$  сравнить с расчетным  $f_0$  и записать в таблицу 1.2. Рассчитать частоты  $f_{0Э} - 1$  кГц,  $f_{0Э} - 2$  кГц,  $f_{0Э} - 3$  кГц,  $f_{0Э} + 1$  кГц,  $f_{0Э} + 2$  кГц,  $f_{0Э} + 3$  кГц и занести в ту же таблицу.

6. На частотах, определенных в п.5, провести измерения  $U_R$  и  $\varphi$ , результаты занести в таблицу 4.2.

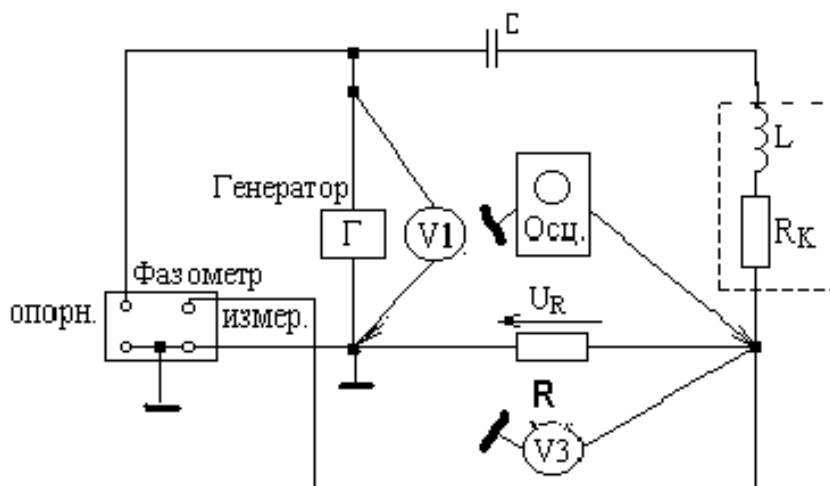


Рис. 4.6. Принципиальная схема измерения  $U_R$  и  $\varphi$

7. Отключить от исследуемой цепи блок “ $\varphi$ -V3” и подключить осциллограф (блок ЭК) (см. рис. 4.6). Переключатель числа каналов установить в среднее положение, при этом на экране осциллографа (блок БО) одновременно появятся изображения мгновенных напряжений на входе цепи  $u(t)$  и на резисторе  $u_R(t)$ . Напряжение  $u_R(t)$  пропорционально току  $i(t)$ , совпадает с ним по фазе и имеет ту же форму. Регулятор “РАЗВЕРТКА” на блоке ЭК рекомендуется установить в такое положение, при котором на экране осциллографа будут наблюдаться 1.5 – 2 периода исследуемых напряжений.

8. Зарисовать попарно осциллограммы  $u(t)$  и  $u_R(t)$  на частотах  $f_{0Э} - 2$  кГц,  $f_{0Э}$ ,  $f_{0Э} + 2$  кГц. Сделать вывод об изменении величины и знака угла  $\varphi$ .

9. Собрать схему рис. 4.7 для измерения  $U_C$  (можно с V2). Результаты измерений занесите в таблицу 4.2.

10. Для измерения  $U_K$  собрать схему аналогичную рис 4.7, но поменять местами катушку индуктивности  $L_A$  и конденсатор  $C_A$ . Результаты измерений занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2. Данные расчетов и измерений

Измеренные величины	$f, \text{кГц}$	$f_{0Э} - 3$	$f_{0Э} - 2$	$f_{0Э} - 1$	$f_{0Э} =$	$f_{0Э} + 1$	$f_{0Э} + 2$	$f_{0Э} + 3$
	$U_R, \text{В}$							
$U_C, \text{В}$								
$U_K, \text{В}$								
$\varphi, \text{град}$								

Расчетные величины	$f, \text{кГц}$	$f_0 - 3$	$f_0 - 2$	$f_0 - 1$	$f_0 =$	$f_0 + 1$	$f_0 + 2$	$f_0 + 3$
	$X_L, \text{Ом}$							
	$X_C, \text{Ом}$							
	$X, \text{Ом}$							
	$\varphi, \text{град}$							
	$Z, \text{Ом}$							
	$I, \text{мА}$							
	$U_R, \text{В}$							
	$U_C, \text{В}$							
	$U_K, \text{В}$							

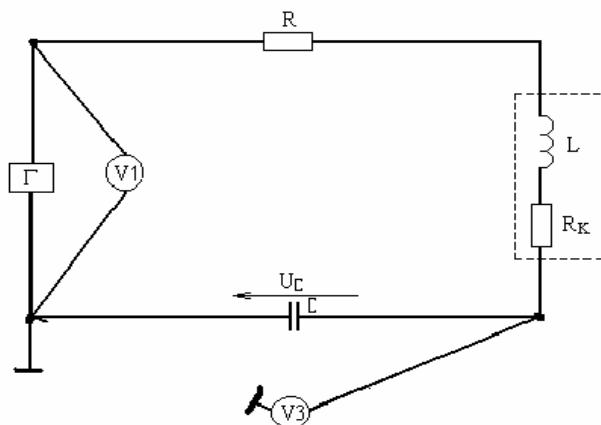


Рис. 4.7. Принципиальная схема измерения  $U_C$

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Исходные данные для бригады.
2. Схемы для расчета рис. 4.1 и измерений рис. 4.6 и 4.7.
3. Расчетные формулы.
4. Пример предварительного расчета для одной частоты.
5. Результаты расчетов и измерений, оформленные в таблице 4.2.
6. Чертеж с графиками  $x_C, x_L, Z, X, I(f)$ , построенными по результатам предварительного расчета и чертеж с графиками  $U_R, U_C, U_K, \varphi(f)$ , построенными по результатам предварительного расчета и эксперимента.
7. Осциллограммы, векторные диаграммы для частот п.8 и выводы об изменении угла в зависимости от частоты.
8. Выводы о совпадении расчетных и опытных данных, об изменении  $U_R, U_C, U_K, \varphi(f)$  в исследованной  $RLC$ -цепи.

## 7. Выполнение работы НА ЭВМ

Данную работу можно выполнять и по программе Electronics Workbench [8], аналогично как описано в работе 1-3. Вид экрана компьютера с собранной схемой измерения показан ниже на рис. 4.8.

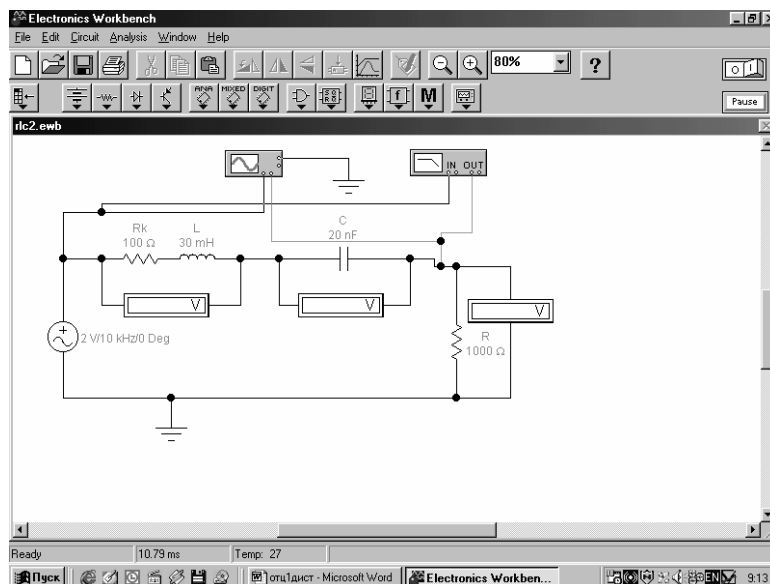


Рис. 4. 8. Схема исследования цепи на EWB

Для определения максимума напряжения на резисторе необходимо переключить измеритель характеристик Bode Plotter в положение Magnitude утопив эту кнопку и настроить пределы измерений по вертикали. Для определения максимумов на конденсаторе и катушки индуктивности надо собрать схему с подключением к корпусу (земле) соответствующего элемента, аналогично схеме рис. 4.7.

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как измерить напряжение  $U_R$ ,  $U_C$ ,  $U_K$  в последовательной  $RLC$  – цепи и угол сдвига по фазе  $\varphi$  между напряжением и током при гармоническом воздействии?
2. Как экспериментально определить резонансную частоту?
3. По каким формулам можно рассчитать реактивное  $X$ , комплексное  $Z$  и полное сопротивления  $Z$  в последовательной  $RLC$  - цепи?
4. По какой формуле рассчитывается угол сдвига по фазе  $\varphi$  между входным напряжением и током в цепи?
5. По каким формулам можно рассчитать комплексные и действующие значения напряжений,  $\underline{U}_R(U_R)$ ,  $\underline{U}_C(U_C)$ ,  $\underline{U}_K(U_K)$ , и тока  $\underline{I}(I)$ ?
6. Как рассчитать значение резонансной частоты?
7. Каковы частотные зависимости реактивного и полного ( $X$  и  $Z$ ) сопротивления, тока  $I$ , напряжения на элементах  $U_R$ ,  $U_C$ ,  $U_K$ , и угла сдвига по фазе  $\varphi$  в последовательной  $R, C$ - цепи?
8. Как построить векторные диаграммы для частот  $f < f_0$ ,  $f = f_0$  и  $f > f_0$ ?
9. Какой характер (индуктивный, емкостный, активный) имеет сопротивление последовательной  $RLC$  – цепи на частотах  $f < f_0$ ,  $f = f_0$  и  $f > f_0$ ?
10. Почему при резонансе в последовательной  $RLC$  – цепи ток максимален?
11. Объясните, почему при резонансе напряжения на реактивных элементах одинаковы?

### Литература

1. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2009, с. 72-69.
2. Бакалов В. П., Крук Б. И., Журавлева О. Б. Теория электрических цепей. СИБГАТИ, Новосибирск, 1998, с. 1-57.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Гардарики, 1999, с. 81-133.
4. Зевеке Г. В. и др., Основы теории цепей. -М.: Энергоатомиздат. 1989, с. 1- 114.
5. Карлашук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: Солон Р. 2001, - 512с.
6. Методические указания к лабораторным работам по 1-й части курса “Основы теории цепей”. ПГАТИ, каф. ТЭЦ, Самара, 2002.
7. Попов В. П. Основы теории цепей. -М.: Высшая школа, 2007, с. 1-143.
8. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. -М.: Высшая школа, 1990, с. 1- 163.

#### 4. РАБОТА 1-5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ $RC$ - И $RL$ -ЦЕПЕЙ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное исследование простейших параллельных цепей с  $R$ ,  $C$ - и  $R$ ,  $L$  элементами при изменении частоты источника гармонического воздействия; проверка экспериментом расчетного значения тока в цепи и фазовых соотношений.

#### 2. ЗАДАНИЕ НА ПОДГОТОВКУ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

2.1. Ознакомиться с описанием универсального стенда ЛКТИЦ, лабораторной работы и контрольными вопросами к работе.

2.2. Повторить теорию по одному из учебников и ознакомиться с описаниями к предварительному расчету и выполнить предварительный расчет.

#### 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

3.1. Для изображенных на рисунках 5.1 и 5.2 схем рассчитать активную  $G$ , реактивную  $B$  и полную  $y$  проводимости, ток  $I$  и сдвиг по фазе  $\varphi$  между приложенным напряжением  $\underline{U}$  и током в общей ветви  $\underline{I}$ . Значения параметров цепей приведены в таблицах 5.1 и 5.2 для каждой из бригад. Расчет производится на всех частотах, указанных в таблицах. Результаты расчета занести в таблицы вида 5.3 (приведена в разделе "Последовательность выполнения работы").

3.2. По данным предварительного расчета построить на одном листе графики  $b_c = b_c(f)$ ,  $I = I(f)$ ,  $\varphi = \varphi(f)$  для схемы рисунка 5.1, а на другом листе графики  $b_L = b_L(f)$ ,  $I = I(f)$ ,  $\varphi = \varphi(f)$  для схемы рисунка 5.2.

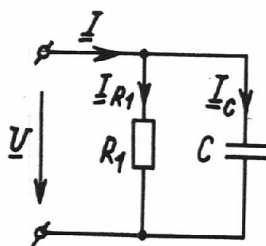


Рис. 5.1

Параллельная RC-цепь

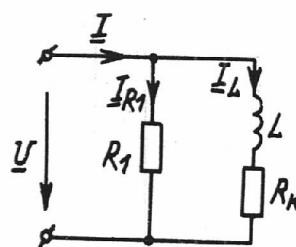


Рис. 5.2

Параллельная RL-цепь

Таблица 5.1. Данные для расчета RC-цепи

№ бригады	П а р а м е т р ы    ц е п и $U=2\text{ В}$						
	C нФ	$R_1$ кОм	Ч а с т о т а    в    кГц				
			$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
1	23,4	3	2	5	8	11	14
2	17,2	3					
3	12,92	3					
4	10,0	3					
5	7,92	3					
6	6,37	3					
7	5,21	3					
8	4,32	3					



9	3,62	3					
10	3,06	3					
11	4,18	3					
12	3,48	3					
13	3,08	3					
14	2,7	3					
15	2,3	3					

Таблица 5.2. Данные для расчета RL- цепи

№ бригады	П а р а м е т р ы    ц е п и $U=2 В$							
	$L$ мГн	$R_k$ Ом	$R_1$ кОм	Ч а с т о т а    в    кГц				
				$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
1	30	119	3					
2	35	127	3					
3	40	70	3					
4	45	116	3	5	8	11	14	17
5	50	104	3					
6	55	71	3					
7	60	116	3					
8	65	114	3					
9	70	132	3					
10	75	134	3					
11	50	70	3	4	7	10	13	16
12	55	71	3					
13	57	75	3					
14	60	71	3					
15	65	116	3					

#### 4. ПОЯСНЕНИЯ К ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМУ РАСЧЕТУ

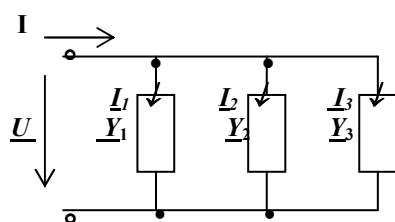


Рис. 5.3 Параллельная цепь

При параллельном соединении (рис. 5.3) все ветви находятся под одним напряжением  $\underline{U}$ . На основе первого закона Кирхгофа комплексное значение тока на входе цепи  $\underline{I}$  равно сумме комплексных токов ветвей

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3.$$

Очевидно, что токи в ветвях определяются зависимостями

$$\underline{I}_1 = \underline{U} \cdot \underline{Y}_1, \quad \underline{I}_2 = \underline{U} \cdot \underline{Y}_2,$$

$$\underline{I}_3 = \underline{U} \cdot \underline{Y}_3,$$

где  $\underline{Y}_1=1/\underline{Z}_1$ ,  $\underline{Y}_2=1/\underline{Z}_2$ ,  $\underline{Y}_3=1/\underline{Z}_3$  - комплексные проводимости ветвей, а  $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \dots, \underline{Z}_3$  - комплексные сопротивления

ветвей.

Таким образом,

$$\underline{I} = \underline{U} (\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3) = \underline{U} \cdot \underline{Y} = \underline{U} \cdot y e^{-j\varphi}.$$

Здесь  $\underline{Y}$  - комплексная проводимость цепи,

$y$  - полная проводимость цепи ( $y = |\underline{Y}|$ ),

$\varphi$  - угол сдвига фаз между входным напряжением и входным током ( $\varphi = -\arg \underline{Y}$ ).

Поскольку комплексная проводимость рассматриваемой цепи равна сумме комплексных проводимостей параллельно соединенных ветвей, то можно записать

$$\underline{Y} = \sum_{K=1}^n \underline{Y}_K = \sum_{K=1}^n G_K + j \sum_{K=1}^n B_K = G + jB = y \cdot e^{-j\varphi},$$

где  $G$  - активная проводимость цепи, равная сумме активных проводимостей параллельно соединенных ветвей;

$B$  - реактивная проводимость цепи, равная сумме реактивных проводимостей параллельно соединенных ветвей;

$y = \sqrt{G^2 + B^2}$  - полная проводимость цепи;

$\varphi = -\arctg(B/G)$  - угол сдвига фаз между напряжением цепи и входным током. Действующее значение тока в общей ветви (входного тока) определяется соотношением  $I = U \cdot y$ .

#### 4.1. Расчетные соотношения для RC – цепи (рис. 5.1)

Для ветви с резистором  $\underline{Y}_1 = 1/R_1 = G_1$ ,  $B_1 = 0$ .

Для ветви с емкостью

$$\underline{Y}_2 = 1/\underline{Z}_C = j\omega C = jB_2 = j b_c, \quad G_2 = 0,$$

где  $b_c = \omega C$  - емкостная проводимость.

Следовательно, для схемы рис. 5.1  $\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = G_1 + jB_2 = y \cdot e^{-j\varphi}$ ,

$$y = \sqrt{\frac{1}{R_1^2} + (\omega C)^2}, \quad \varphi = (-\arctg(\omega C R_1)) < 0.$$

В данном случае угол  $\varphi$  имеет отрицательное значение (напоминаем, что он отсчитывается на векторной диаграмме от вектора тока к вектору напряжения). Ток в общей ветви опережает приложенное к цепи

напряжение на угол  $\varphi$ . Действующее значение тока

$I =$

$$U \cdot y = U \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1^2} + (\omega C)^2}.$$

Данные расчетов занести в таблице вида 5.3.

#### 4.2. Расчетные соотношения для RL – цепи (рис. 5.2)

Для ветви с резистором  $\underline{Y}_1 = 1/R_1 = G_1$ ,  $B_1 = 0$ .

Для ветви с индуктивностью с учетом сопротивления потерь катушки  $R_K$

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_K} = \frac{1}{j\omega L + R_K} = \frac{R_K}{R_K^2 + (\omega L)^2} + j \left[ \frac{-\omega L}{R_K^2 + (\omega L)^2} \right].$$

Следовательно,

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = \frac{1}{R_1} + \frac{R_K}{R_K^2 + (\omega L)^2} + j \left[ \frac{-\omega L}{R_K^2 + (\omega L)^2} \right] = G + jB = y \cdot e^{-j\varphi},$$

$$y = \sqrt{\left[ \frac{1}{R_1} + \frac{R_K}{R_K^2 + (\omega L)^2} \right]^2 + \left[ \frac{-\omega L}{R_K^2 + (\omega L)^2} \right]^2},$$

$$\varphi = \arctg \left[ \left( \frac{\omega L}{R_K^2 + (\omega L)^2} \right) / \left( \frac{1}{R_1} + \frac{R_K}{R_K^2 + (\omega L)^2} \right) \right].$$

Для рассматриваемой цепи угол  $\varphi > 0$  (ток в общей ветви отстает от напряжения на угол  $\varphi$ ). Действующее значение тока определяется выражением  $I = U \cdot y$

Если  $R_K \ll \omega L$ , то расчетные формулы упрощаются:

$$G=1/R_1, \quad B=-1/\omega L = -b_L,$$

$$y = \sqrt{\frac{1}{R_1^2} + \left(-\frac{1}{\omega L}\right)^2}, \quad \varphi = \arctg(R_1/\omega L).$$

Данные расчетов занести в таблицу аналогичную 5.3, где во второй строке вместо  $b_C$  используется  $b_L$ , а в третьей используется

$$G=1/R_1+R_K/(R_K^2+x_L^2)$$

#### 4.3. Построение векторных диаграмм для параллельных RC- и RL-цепей

В параллельных RC- и RL-цепях при построении векторных диаграмм в качестве опорного вектора, откладываемого по горизонтали, выбирается вектор напряжения  $U$ , а токи ветвей строятся в соответствии с фазовыми сдвигами относительно напряжения. На рисунке 5.4 показана диаграмма для RC-цепи (рис. 5.1). Здесь ток  $I_{R1}$  совпадает по фазе с напряжением  $U$ , а ток  $I_C$  - опережает на  $90^\circ$ .

Составляющие токи  $I_{R1}$  и  $I_C$  находятся по формулам:

$$I_{R1} = U/R_1, \quad I_C = U \cdot b_C,$$

$I = \sqrt{I_{R1}^2 + I_C^2}, \quad \varphi = -\arctg(I_C/I_{R1}).$  Векторная диаграмма RL-цепи (рис. 5-2) без учета потерь ( $R_K=0$ ) приведена на рис. 5.5.

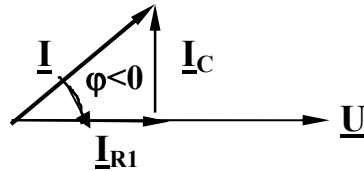


Рис. 5.4. Векторная диаграмма RC-цепи

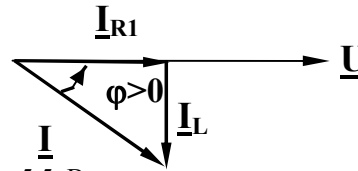


Рис. 5.5. Векторная диаграмма RL-цепи

Здесь ток  $I_{R1}$  совпадает по фазе с напряжением  $U$ , а ток  $I_L$  - отстает на  $90^\circ$ . Причем  $I_{R1} = U/R_1, \quad I_L = U/\omega L,$

$$I = \sqrt{I_{R1}^2 + I_L^2}, \quad \varphi = \arctg(I_L/I_{R1}).$$

С учетом потерь в катушке индуктивности ток  $I_L$  будет отставать от напряжения на угол  $\varphi_K = \arctg(\omega L/R_K)$ , меньше  $90^\circ$ , а итоговый угол будет меньше чем  $\arctg(R_1/\omega L)$ .

## 5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 5.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ RC-ЦЕПИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ

5.1.1. Собрать схему для измерения напряжения на добавочном сопротивлении  $R_2 = 100 \text{ Ом}$  согласно рисунку 5.6 с использованием емкости  $C_A$ .

5.1.2. Установить регуляторы ЛКЦ на блоке Г1, – в положение  $2 \div 20 \text{ кГц}$ , на блоке Г2 –  $f_{\text{вар}}$ , на Г3 –  $10 \text{ В}$ , на блоке “ $\varphi - V3$ ” – в положение  $\varphi$ , на блоке ЭК – все тумблеры в положение “ВНУТР.”, а переключатель каналов – в среднее положение. В этом случае осциллограф через 1 канал подключается к генератору, а через второй – к сопротивлению  $R_2$ .

5.1.3. Включить на блоке питания тумблеры “СЕТЬ”, “ГЕНЕРАТОР”, “V2”, “ $\varphi - V3$ ”, “КОММУТАТОР – ОСЦИЛЛОГРАФ” (не включать тумблер анализатора спектра).

5.1.4. Установить на блоке Г1 первую заданную частоту, а на блоке Г3 по вольтметру V1 напряжение  $U = 2 \text{ В}$  и дальнейшем поддерживать его постоянным при каждом изменении частоты генератора.

5.1.5. Измерьте вольтметром V2 напряжение на добавочном сопротивлении  $R_2$ , а фазометром – угол сдвига фаз между напряжением и общим током на первой заданной частоте. Результаты измерений занесите в таблицу

Добавочный резистор необходим, чтобы определить входной ток.

Если измерить напряжение  $U_{R2}$ , то

$$I = I_{R2} = U_{R2}/R_2.$$

На всех частотах, при которых ставится эксперимент, падением напряжения на  $R_2$  можно пренебречь, поэтому напряжение на соединенных параллельно  $R_1$  и  $C_A$  можно считать равным  $2 \text{ В}$ .

5.1.6. Зарисуйте диаграммы колебаний с экрана осциллографа. На экране осциллографа одновременно должно появиться два гармонических колебания – временная диаграмма входного напряжения  $u(t)$  и временная диаграмма напряжения на добавочном резисторе  $u_{R2}(t)$ .

Для лучшего анализа временных диаграмм регуляторами блока ЭК “РАЗВЕРТКА” и “УСИЛЕНИЕ” добейтесь изображения на экране осциллографа  $1,5 \div 2$  периодов колебаний, а тумблерами и регуляторами входа каналов – примерно равной амплитуды колебаний. ( $U_m$  чуть больше  $U_m R2$ ). Регулятором “РАСХОЖДЕНИЕ” совместите диаграммы по 1 и 2 каналам и зарисуйте полученную осциллограмму. Поскольку напряжение на добавочном резисторе  $u_{R2}(t)$  совпадает по фазе с входным (общим) током, то такая осциллограмма позволяет визуально просмотреть фазовые сдвиги между напряжением  $u(t)$  и током  $i(t)$  в исследуемой цепи.

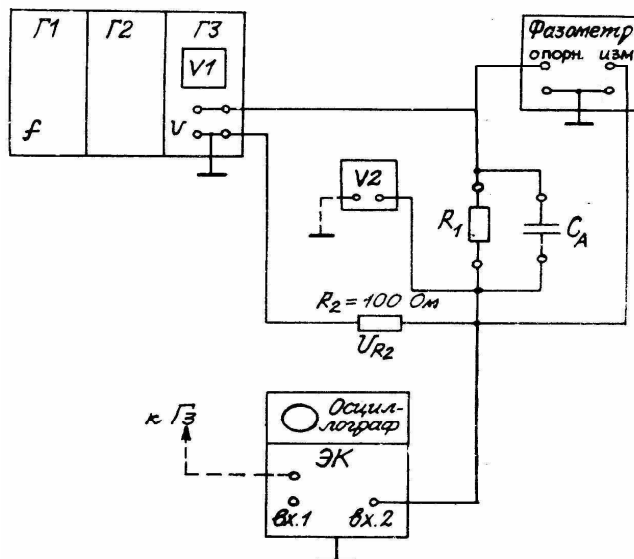


Рис. 5.6 Схема исследования параллельной цепи

$f$ , кГц		$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
Расчетные величины	$b_c$ , См					
	$G_1$ , См					
	$y$ , См					
	$\varphi$ , град					
	$I$ , мА					
Измеренные величины	$U_{R2}$ , В					
	$\varphi$ , град					
	$I$ , мА					

5.1.7. Проведите измерения на остальных частотах  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$  и  $f_5$ , причем осциллограмму зарисуйте только для частоты  $f_5$  и сделайте вывод об изменении угла  $\varphi$  на временной диаграмме.

5.1.8 Сравните данные опыта с расчетными величинами и постройте графики  $I = I(f)$ ,  $\varphi = \varphi(f)$  по экспериментальным данным на том же листе, что и расчетные графики. Сделайте выводы.

## 5.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ $RL$ - ЦЕПИ

5.2.1. В цепи по схеме рисунка 5.6 вместо конденсатора  $C_A$  включите катушку индуктивности  $L_A$ .

5.2.2. Проведите экспериментальное исследование  $RL$  - цепи, как и для  $RC$  - цепи на заданных для нее частотах, записывая данные в соответствующую таблицу. Зарисуйте осциллограммы на частотах  $f_1$  и  $f_5$ .

5.2.3. Сравните расчетные и измеренные величины для  $RL$  - цепи и постройте графики  $I = I(f)$ ,  $\varphi = \varphi(f)$

) по экспериментальным данным на том же листе, что и расчетные.

### 6. Выполнение работы на ЭВМ по Воок 3.0

Для выполнения данной работы на ЭВМ сначала нужно запустить программу **BOOK 3.0** [2], используя файл **Menu.exe** программы в папке **ТЭЦ/ТЭЦ-2 (TEZ-2)** или “**ярлык**” программы. После появления заставки нажать любую клавишу и в результате появится оглавление разделов.

6.1 Выберите раздел “**Векторные диаграммы в параллельной RLC -цепи**” и войдите в него. Для этого используют клавиши перемещения курсора и **Enter**.

6.2. Далее следует выбрать подраздел “**исследование RC цепи**” и ввести данные своего варианта. Вначале выбираются единицы измерения перемещением курсора и “**Ent**”, затем вводятся соответствующие величины: **R**, **C**, **f** (первую из таблицы 5.3), амплитуду тока **I<sub>m</sub>**, угол сдвига фаз с обратным знаком (**-φ**) – все для первой частоты. Обратите внимание на то, что при вводе величины тока в **ma**, она может восприняться в программе в **A**. Зарисуйте получившиеся графики тока, напряжения и векторную диаграмму с указанием масштабов. Используя масштаб для напряжения, определите его действующее значение.

6.3. Выбрав опцию “**Нет**”, повторите ввод и, выполняя указания программы, получите графики токов и векторную диаграмму всей цепи. Зарисуйте результаты исследований. Используя масштабы для токов, определите их действующие значения. Выбрав опцию “**Да**”, проведите аналогичные исследование на остальных расчетных частотах, зарисовывая графики, векторные диаграммы и определяя действующие значения токов.

6.4. Выберите опцию “**Нет**” и закончите исследования. Далее следует проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

6.5 Выбрать подраздел “**исследование RL цепи**” и провести аналогичное исследование этой цепи по своему варианту (**R<sub>K</sub>=0**).

6.6. Выбрать опцию “**Нет**” и закончить исследования. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы и выйти через **F10** из раздела и программы.

### 7. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММЫ Electronics Workbench 5.12

7.1. Запустить программу **Electronics Workbench (EWB)**, используя ярлык или окна интерфейса: пуск и программы.

7.2. Собрать схему измерения по рисунку 5.7. Для этого следует выбрать нужный элемент на панели и буксировать его, не отпуская левой кнопки мыши, на рабочий стол (технология Drag and Drop). Генератор переменного напряжения и заземление находятся на панели источников, пассивные элементы и точки соединений □ на панели резисторов, вольтметр – на панели индикаторов, а осциллограф и измеритель фазы – на панели инструментов. Чтобы соединить два элемента между собой, необходимо подвести курсор к внешнему выводу первого элемента и при появлении точки нажать левую кнопку мыши. Далее, не отпуская кнопки, надлежит подвести курсор к внешнему выводу второго элемента и при появлении точки отпустить левую кнопку мыши. Проводник можно подсоединять не только к внешнему выводу элемента, но и к середине другого проводника. Если нужно убрать лишний проводник, то курсор подводят к радиоэлементу и при появлении точки отводят проводник в сторону (как бы отрывая его).

При необходимости элемент можно повернуть на 90 градусов. Для этого его надо активизировать (навести на него курсор, “щелкнуть” левой кнопкой мыши и его цвет должен стать красным). Затем в главном меню выбрать пункт **Circuit**, а там - подпункт **Rotate**. Аналогичный эффект будет достигнут, если после активизации радиоэлемента нажать комбинацию клавиш **Ctrl+R**. При составлении схем один узел должен быть обязательно “заземлен”: Зажимы осциллографа и измерителя фазы уже заземлены автоматически и с заземлением их можно не соединять.

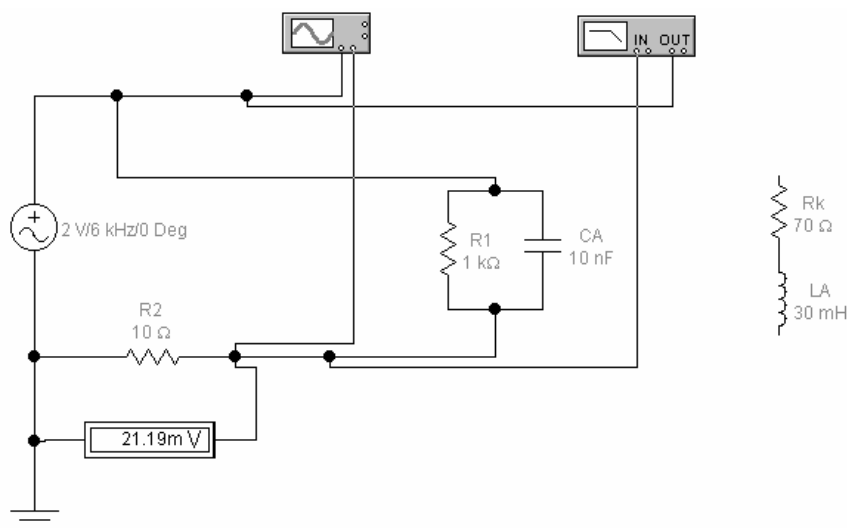


Рис.5.7. Схема измерения по программе EWB

7.2. Установить данные по своему варианту. Установка номиналов элементов производится с помощью диалоговых окон, которые вызываются двойным щелчком по соответствующему элементу по позиции Value, а установка обозначений по позиции Label. Аналогично устанавливаются параметры генератора (напряжение, частота). Для вольтметра необходимо установить по позиции Value режим измерения переменного напряжения  $\square$  AC и сопротивление не менее 100 МОм. Для получения наглядных осциллограмм целесообразно раскрашивать проводники, подходящие к осциллографу, в разные цвета, дважды щелкнув по выбранному проводнику и выбрав соответствующий цвет.

7.3. Запустить схему на моделирование. Для этого следует нажать кнопку, расположенную в правом верхнем углу рабочего окна программы с помощью левой кнопки манипулятора “мышь”. Для просмотра осциллограмм необходимо развернуть двойным щелчком осциллограф и установить удобные для наблюдений масштабы по вертикали (напряжению) и горизонтали (времени), учитывая, что по каналу А показывается график напряжения с генератора, а по каналу В  $\square$  с добавочного резистора R2. При этом целесообразно выключить моделирование щелчком по кнопке запуска. Нажатием кнопки Expand на осциллографе можно раскрыть изображение шире для лучшего наблюдения. Ток определяется по показанию вольтметра с учетом того, что  $R_2=10$  Ом. Для измерения фазового сдвига следует раскрыть двойным щелчком измеритель частотных характеристик, нажать кнопку Phase и установить пределы измерений по частоте и углу в соответствии с исходными данными и расчетами. Закрытие приборов осуществляется нажатием кнопки x.

7.4. Провести измерения на первой из заданных частот, записав показания вольтметра и фазометра в таблицу 5.3 и зарисовав осциллограммы по каналам А и В на одном рисунке. Затем провести измерения на остальных частотах, а осциллограммы зарисовать только для последней частоты.

7.5. Удалить конденсатор из схемы, а на его место подключить катушку (Rk и LA). Для этого отсоединить проводники от конденсатора и стереть его клавишей Del. Затем провести аналогичные исследования RL цепи, записав данные в таблицу, подобную 5.3.

## 8. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Предварительный расчет со всеми исходными данными в виде таблиц, схем, формул. Причем, подробный расчет производится только для одной частоты.
2. Схемы измерений и измеренные величины.
3. Графики  $I = I(f)$ ,  $\varphi = \varphi(f)$ ,  $b_C = b_C(f)$ ,  $b_L = b_L(f)$ .
4. Векторные диаграммы и осциллограммы для частот  $f_1$  и  $f_5$ . При выполнении на ЭВМ диаграммы и осциллограммы для всех частот.
5. Выводы о проведенном исследовании.

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чему равны комплексная, полная, активная и реактивная проводимости ветви и каковы графики их частотных зависимостей, если комплексное сопротивление ветви: а)  $\underline{Z} = R + j\omega L$ , б)  $\underline{Z} = R - j/\omega C$ ?
2. Какой вид имеют частотные зависимости токов  $I$ ,  $I_C$ , полной проводимости  $y$ , угла  $\varphi$  для цепи рисунка 5.1?
3. Какой вид имеют частотные зависимости токов  $I$ ,  $I_L$ , полной проводимости  $y$ , угла  $\varphi$  для цепи рисунка 5.2, для случая идеальной индуктивности?
4. Какой вид имеют частотные зависимости  $I$ ,  $I_L$ ,  $y$ ,  $\varphi$  для цепи рисунка 2.2 с учетом потерь в

катушке индуктивности ?

5. Чему равна полная проводимость  $y$  и угол  $\varphi$  ветвей, если

$$\underline{Y}_1 = (0,1 + j 0,1) \text{ См}, \quad \underline{Y}_2 = (0,3 - j 0,2) \text{ См},$$

$$\underline{Y}_4 = j 0,5 \text{ См}, \quad \underline{Y}_5 = -j 0,8 \text{ См}, \quad \underline{Y}_6 = 1 \text{ См} ?$$

6. Какой вид будет иметь векторная диаграмма параллельной  $R, L$  - цепи с учетом потерь в катушке индуктивности ?

7. Как изменяются векторные диаграммы цепей рисунков 5.1 и 5.2 при увеличении частоты ?

#### Литература

1. Алексеев А.П. Информатика 2003. –М.: Солон - Р, 2003, с. 269-329.
2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2009, с. 72-69.
3. Бакалов В. П., Крук Б. И., Журавлева О. Б. Теория электрических цепей. СИБГАТИ, Новосибирск, 1998, с. 1-57.
4. Зевеке Г. В. и др. Основы теории цепей. -М.: Энергоатомиздат. 1989, с. 61- 105.
5. Методические указания к лабораторным работам по 1-й части курса “Основы теории цепей”. ПГАТИ, каф. ТЭЦ, Самара, 2002.
6. Попов В. П. Основы теории цепей. -М.: Высшая школа, 2007, с. 72-108.
7. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. -М.: Высшая школа, 1990, с. 50- 99.

## 5. РАБОТА 1-6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЦЕПИ С $R, L, C$ – ЭЛЕМЕНТАМИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

### 1.1. Цель работы

Экспериментальное исследование параллельной  $L, C$  – цепи при изменении частоты гармонического воздействия.

### 1.2. Задание на подготовку к лабораторной работе

2.1 Ознакомиться с описанием к лабораторной работе, с описанием универсального стенда ЛКТС и контрольными вопросами.

2.2 Повторить теорию по одному из учебников, ознакомиться с пояснениями к предварительному расчету и выполнить предварительный расчет.

### 1.3. Предварительный расчет.

3.1. Для изображенной на рисунке 6.1 схемы рассчитать резонансную частоту  $f_p$ , активную  $G$ , реактивную  $B$  и полную  $y$  проводимость цепи, действующее значение входного тока  $I$  и сдвиг по фазе  $\varphi$  между входным напряжением  $U$  и током  $I$ . Значения параметров цепи приведены в таблице 6.1.

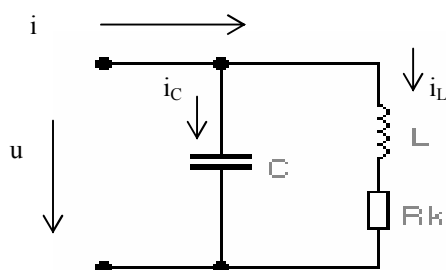
3.2. Результаты расчета занести в таблицу 6.2.

3.3. По данным предварительного расчета на одном листе построить графики:  $B=B(f)$ ,  $\varphi=\varphi(f)$ ,  $I=I(f)$ .

Таблица 6.1. Исходные данные для расчета

№ бригады	$C$ , нФ	$L$ , мГн	$R_K$ , Ом	$U$ , В
1	23,4	30	119	2
2	17,2	35	127	
3	12,92	40	70	
4	10	45	116	
5	7,92	50	104	
6	6,37	55	71	
7	5,21	60	116	
8	4,32	65	114	
9	3,62	70	132	
10	3,06	75	134	
11	4,18	50	70	
12	3,48	55	71	
13	3,08	57	75	
14	2,7	60	71	
15	2,3	65	116	

### 1.4. Пояснения к предварительному расчету.



Комплексная проводимость  $Y$  схемы рисунка 6.1 определяется выражением

$$Y = j\omega C + \frac{1}{R_K + j\omega L} = \frac{R_K}{R_K^2 + (\omega L)^2} + j \left( \omega C - \frac{\omega L}{R_K^2 + (\omega L)^2} \right) = G + jB = y e^{j\varphi}, \quad \text{где } y := \sqrt{G^2 + B^2}.$$



$$G = \frac{R_K}{R_K^2 + (\omega L)^2}, \quad B = \omega C - \frac{\omega L}{R_K^2 + (\omega L)^2}, \quad \varphi = -\operatorname{arctg} \frac{B}{G}$$

При равенстве реактивной проводимости цепи  $B$  нулю имеет место резонанс токов. Условие резонанса:

$$\omega C = \frac{\omega L}{R_K^2 + (\omega L)^2}$$

Отсюда резонансная частота  $\omega_p$  будет равна:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{R_K^2 C}{L} \right)}, \quad f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$$

Если  $R_K \ll \omega L$ , то резонанс возникает на частоте

$$\omega_p = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

условием резонанса будет соотношение  $b_C (= \omega C) = b_L (= \omega L)$ .

При подготовке к выполнению данной работы на ЭВМ по БООК-3 принять  $R_K=0$ , а параллельно емкости включить резистор  $R_4=1$  кОм. В этом случае  $f_p = f_0$ ,  $B = \omega C - 1/\omega L$ ,  $G = 1/R_4$

При резонансе токов полная проводимость  $y$  цепи рисунка 6.1 минимальна и равна активной составляющей, а угол сдвига фаз  $\varphi$  равен нулю. При частотах, меньших резонансной, реактивная проводимость индуктивной ветви больше емкостной проводимости (по абсолютной величине) и общая реактивная проводимость цепи носит индуктивный характер (ток отстает от напряжения, угол  $\varphi > 0$ ). При частотах, больших резонансной, емкостная проводимость по абсолютной величине больше индуктивной составляющей и результирующая реактивная проводимость носит емкостной характер, (ток опережает напряжение, угол  $\varphi < 0$ ). На частотах, близких к нулю, при малых значениях  $R_K$ , проводимость цепи велика, а угол  $\varphi$  близок к  $\pi/2$ . Однако на частоте  $\omega = 0$  угол  $\varphi = 0$ , т.к.  $x_C = 0$ ,  $x_L = \omega L = 0$  и  $Y = 1/R_K$ . На частотах, значительно больших резонансной, велика проводимость емкостной ветви и мала индуктивной, общая проводимость будет велика, а угол  $\varphi$  близок к  $-\pi/2$ .

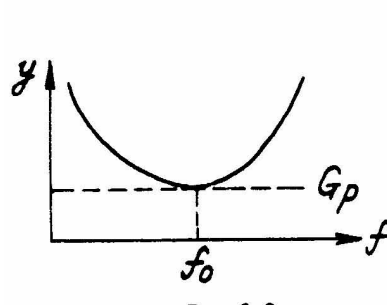


Рис. 6.2

График полной проводимости исследуемой цепи

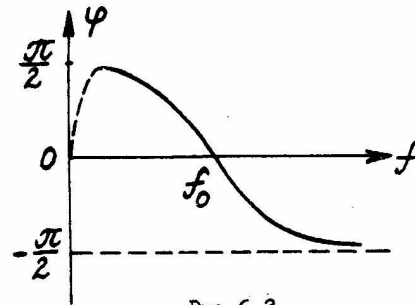


Рис. 6.3

График фазового сдвига исследуемой цепи

На резонансной частоте  $Y = G_p = \frac{R_K}{R_K^2 + (\omega L)^2}$  является чисто активной. Качественно

графики частотных зависимостей  $y=y(f)$  и  $\varphi=\varphi(f)$  показаны на рисунках 1.2 и 1.3 соответственно. При постоянном напряжении график действующего значения тока  $I$  качественно повторяет частотную зависимость полной проводимости, так как  $I=U \cdot y$ .

При построении векторных диаграмм вектор входного напряжения откладывают по горизонтали, вектор емкостного тока опережает вектор напряжения на  $90^\circ$ , а вектор тока через катушку отстает на угол  $\varphi_K = \operatorname{arctg}(\omega L/R_K)$  и при  $R_K \ll \omega L$  близок  $90^\circ$ . При этом, на частотах  $\omega < \omega_p$  емкостная проводимость меньше индуктивной и действующее значение емкостного тока будет меньше индуктивного:  $I_C < I_L$ . На частотах  $\omega > \omega_p$  все будет наоборот, а именно:  $I_C > I_L$ , а на резонансной частоте  $I_C \approx I_L$ .

При выполнении расчетов целесообразно применить программу **Mathcad**

Пример расчета приведен ниже.

$$L:=25 \cdot 10^{-3} \quad C:=14.910^{-9} \quad R_k=100 \quad U:=2$$

$$j:=\sqrt{-1} \quad f_p:=\frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} \cdot \left(1 - R_k^2 \cdot \frac{C}{L}\right)} \quad \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} = 8.246 \cdot 10^3$$

$$R_4 := \frac{R_k^2 + (2\pi \cdot f_p \cdot L)^2}{R_k} \quad R_4 = 1.678 \cdot 10^4$$

$$R_4 := \frac{R_k + (2\pi \cdot f_p \cdot L)}{R_k} \quad R_4 = 1.678 \cdot 10^4$$

$$Y(f) := j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C + \frac{1}{R_k + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L} \quad Y(1000) = 2.884 \cdot 10^{-3} - 4.437i \cdot 10^{-3}$$

$$Y(f) := j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L} \quad Y(1000) = 5.96 \cdot 10^{-5} - 6.273i \cdot 10^{-3}$$

Здесь можно делать вычисления сразу в комплексной форме и строить графики, например, полной проводимости  $y$ , как модуля комплекса (рис. 6.3а).

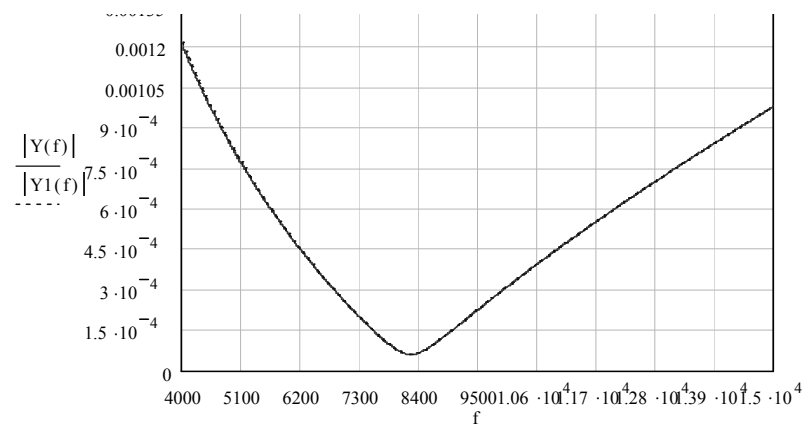


Рис. 6.3а. Частотная зависимость  $y(f)$

Для вычисления угла  $\varphi$  на конкретной частоте можно использовать формулу вида

$$-\arg(Y(1000)) \cdot \frac{180}{\pi} = 56.974^\circ$$

## 1.5. Экспериментальное исследование параллельной цепи при изменении частоты

5.1. Собрать схему для измерения напряжения на добавочном сопротивлении  $R_2 = 100$  Ом согласно рисунку 6.4.

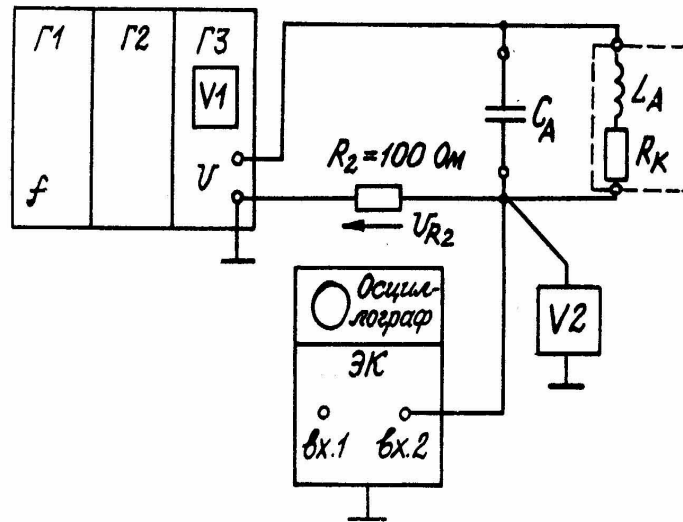


Рис. 6.4 Схема исследования LC-цепи

Таблица 6.2. Данные расчета и эксперимента

$f$ , кГц		$f_{p-1,5}$	$f_{p-1,0}$	$f_{p-0,5}$	$f_p$	$f_{p+0,5}$	$f_{p+1,0}$	$f_{p+1,5}$
Теоритич.	$b_c$ , См							
	$b_L$ , См							
	$B$ , См							
	$G$ , См							
	$y$ , См							
	$\phi$ , град							
Эксп.	$f$ , кГц	$f_{pЭ-1,5}$	$f_{pЭ-1,0}$	$f_{pЭ-0,5}$	$f_{pЭ}$	$f_{pЭ+0,5}$	$f_{pЭ+1,0}$	$f_{pЭ+1,5}$
	$U_{R2}$ , В							
	$I$ , мА							

### 1.6. Выполнение работы на ЭВМ

Данную работу можно выполнить с применением программы **Electronics Workbench 4.0** или **5.0**. Вид экрана по программе **Electronics Workbench 5.0** показан ниже на рис. 6.6.

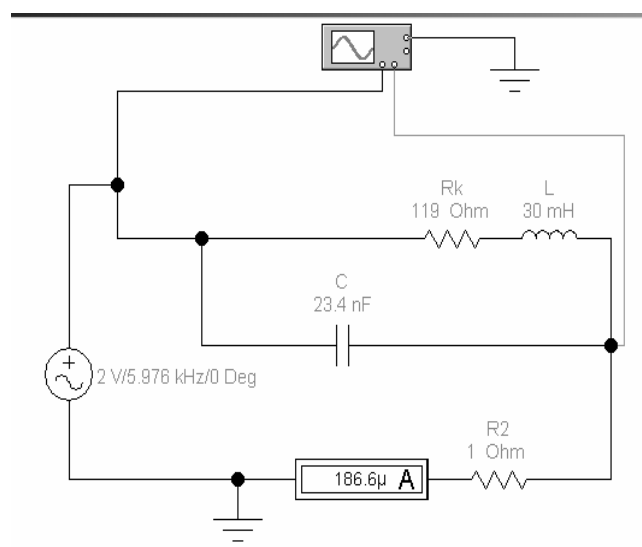


Рис. 6.6. Вид экрана по программе Electronics Workbench 5.12.

Для измерения угла сдвига фаз  $\varphi$  следует подключить Bode Ploter, аналогично как в работе 1-5 и добавить соответствующую строчку в таблицу 6.2. Для дальнейшего исследования этой цепи рекомендуется увеличить сопротивление катушки до 500 Ом и повторить измерения, определив частоту минимума показаний амперметра.

### 1.7. Содержание отчета.

1. Предварительный расчет.
2. Схему измерений, измеренные величины (заносятся в таблицы вида 6.2) и графики  $I=I(f)$ ,  $\varphi=\varphi(f)$ ,  $V=B(f)$ , построенные по результатам расчетов и по экспериментов.
3. Осциллограммы временных зависимостей  $u(t)$  и  $u_{R2}(t)$  для частот  $f_p \pm 1500$  и векторные диаграммы для тех же частот. При выполнении на ЭВМ временные зависимости и векторные диаграммы для всех частот.
4. Выводы по результатам исследований.

### 1.8. Контрольные вопросы

1. Как определяется активная  $G$ , реактивная  $B$ , полная  $Y$  проводимости и угол сдвига фаз  $\varphi$  цепи рисунка 6.1?
2. Когда возникает в цепи рисунка 6.1 резонанс токов и как определяется резонансная частота  $f_p$ ?
3. Какой вид имеют частотные зависимости токов  $I_C$  и  $I_L$  цепи рис .6.1 при постоянной величине действующего значения входного напряжения?
4. Какой вид имеют векторные диаграммы цепи рисунка 6.1 при  $f < f_p$ ,  $f = f_p$ ,  $f > f_p$ ?
5. Какой вид будут иметь векторные диаграммы цепи рисунка 6.1, если параллельно емкости включить резистор?
6. По каким признакам в опыте можно установить, что цепь рисунка 6.1 находится в состоянии резонанса?
7. Чему равна комплексная проводимость цепи рисунка 6.7, если известно, что  $Y_1 = (0,1 + j 0,1)$  См,  
 $Y_2 = (0,3 - j 0,2)$  См,  
 $Y_3 = -j 0,8$  См?
8. Чему будет равен ток в цепи рисунка 6.7 (при тех же параметрах схемы, что и в предыдущем вопросе), если  $\underline{U} = 20 e^{j30^\circ}$ ?

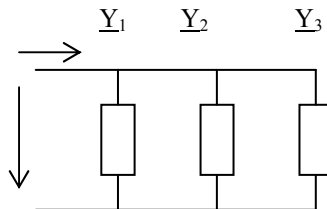


Рис. 6.7.

### Литература

1. Алексеев А.П. Информатика 2003. –М.: Солон - Р, 2003, с. 269-329.
2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. –М.: Радио и связь. 2009, с. 72-69.
3. Бакалов В. П., Крук Б. И., Журавлева О. Б. Теория электрических цепей. СИБГАТИ, Новосибирск, 1998, с. 1-57.
4. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей. – М.: Радио и связь. 1986, с.98- 155.
5. Зевеке Г. В. И др. Основы теории цепей. –М.: Энергоатомиздат. 1989, с. 61- 105.
6. Методические указания к лабораторным работам по 1-й части курса “Основы теории цепей”. ПГАТИ, каф. ТЭЦ, Самара, 2002.
7. Попов В. П. Основы теории цепей. –М.: Высшая школа, 2007, с. 72-108.
8. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. –М.: Высшая школа, 1990, с. 50- 99.