

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**Автономное профессиональное образовательное учреждение Удмуртской Республики  
«Техникум радиоэлектроники и информационных технологий  
имени А.В. Воскресенского**

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**

**Учебной дисциплины**

**ОП.01 Теория электрических цепей**

**программы подготовки специалистов среднего звена**

**специальность 11.02.15 Инфокоммуникационные сети и системы связи"**

**квалификации выпускника – техник**

**Форма обучения – очная**

Лабораторный практикум учебной дисциплины разработан на основе Федерального государственного образовательного стандарта (далее – ФГОС) по специальности среднего профессионального образования (далее СПО) 11.02.15 Инфокоммуникационные сети и системы связи

Организация-разработчик: Автономное профессионально образовательное учреждение Удмуртской Республики «Техникум радиоэлектроники и информационных технологий им. А. В. Воскресенского» (далее АПОУ УР «ТРИТ им. А. В. Воскресенского»)

Разработчики:

1. Москова О. М., зам. директора по УМР АПОУ УР «ТРИТ им. А. В. Воскресенского»
2. Лихачева Л.И. преподаватель АПОУ УР «ТРИТ им. А. В. Воскресенского»

Рекомендована методическим объединением профессионального цикла

Протокол № \_\_\_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## Лабораторная работа №1 Исследование простейших цепей переменного тока

**Цель работы:** исследовать входные и передаточные частотные характеристики цепей с одним реактивным элементом.

В лабораторной работе необходимо изучить влияние индуктивного и емкостного сопротивления на входное сопротивление цепи и ее передаточную функцию по напряжению в зависимости от частоты генератора, сравнить полученные экспериментальные характеристики с теоретическими расчетами.

### Краткие теоретические сведения

Исследование простейших цепей переменного тока производится при питании от источника, работающего в режиме генератора напряжений. Это достигается за счет того, что независимо от сопротивления цепи напряжение на ее входе поддерживается неизменной величины с помощью регулировки выходного напряжения генератора.

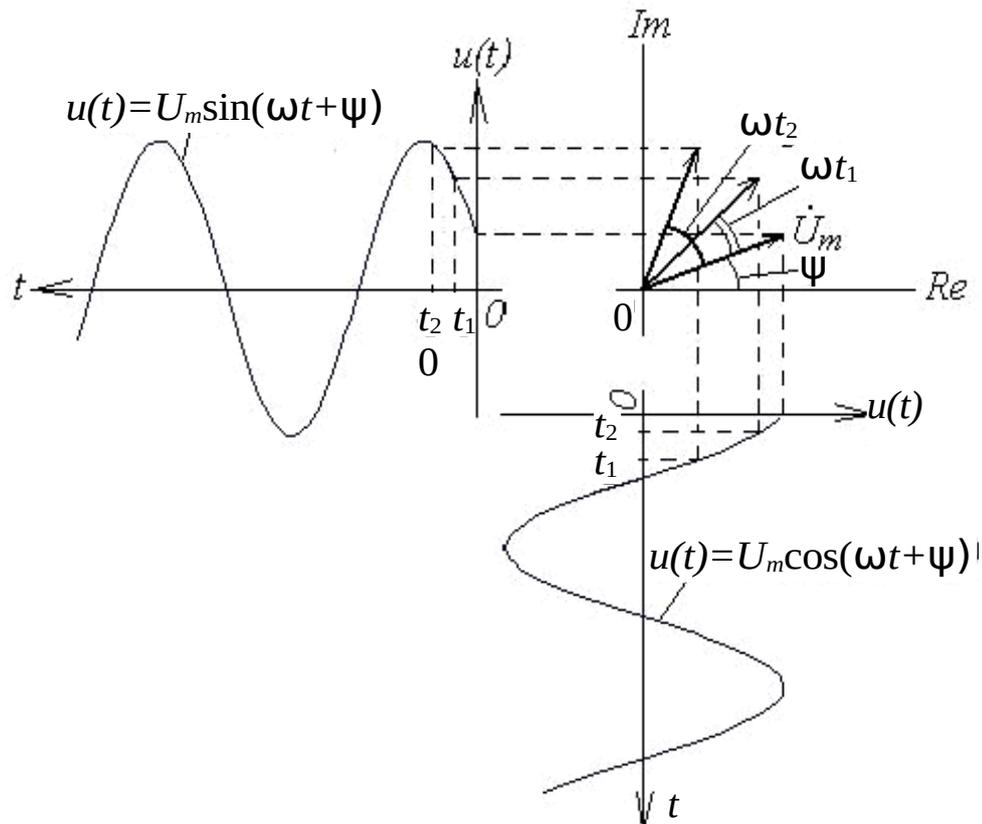


Рис. 1.1\*

При гармоническом воздействии на линейную цепь все токи и напряжения имеют форму гармонических колебаний, поэтому задача расчета цепи сводится к нахождению амплитуд и начальных фаз этих колебаний, т. е. их комплексных амплитуд.

Гармонические колебания согласно методу комплексных амплитуд могут быть представлены как проекции вектора  $\dot{U}_m$  на комплексной плоскости, вращающегося против часовой стрелки с угловой частотой  $\omega$  (рис. 1.1) на оси координат.

Проекция вектора на вещественную ось представляет собой мгновенное значение, выражаемое косинусоидальной функцией

$$U(t) = U_m \cos(\omega t + \psi),$$

\*Графика обозначений на рисунках приводится в авторской редакции.

а на мнимую ось – синусоидальной функцией  
 $U(t) = U_m \sin(\omega t + \psi)$ .

Символический вектор на комплексной плоскости математически может быть представлен в трех формах:

алгебраической  $\dot{U}_m = \text{Re}\dot{U}_m + j \text{Im}\dot{U}_m$ , где  $j = \sqrt{-1}$ ;

показательной  $\dot{U}_m = |\dot{U}_m| e^{j\psi}$  где  $|\dot{U}_m|$  – модуль;  $\psi$  – аргумент;

тригонометрической  $\dot{U}_m = \cos \alpha + j \sin \alpha$ .

Модуль вектора  $|\dot{U}_m| = \sqrt{(\text{Re}\dot{U}_m)^2 + (\text{Im}\dot{U}_m)^2}$ ,

Аргумент  $\alpha = \text{arctg} \frac{\text{Im}\dot{U}_m}{\text{Re}\dot{U}_m}$ .

В случае гармонического колебания аргумент комплексного числа является функцией времени  $\alpha = \omega t + \psi$ .

Поэтому число, символизирующее вращающийся вектор, выражается: в показательной форме

$$\dot{U}(t) = |\dot{U}_m| e^{j\psi} e^{j\omega t};$$

в тригонометрической форме

$$\dot{U}(t) = |\dot{U}_m| \cos(\omega t + \psi) + j |\dot{U}_m| \sin(\omega t + \psi).$$

Таким образом, для рассмотрения напряжений и токов в цепи с гармоническим воздействием может быть построена векторная диаграмма, представляющая собой совокупность радиус-векторов, отображающих комплексные амплитуды колебаний и вращающихся на комплексной плоскости против часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega$ .

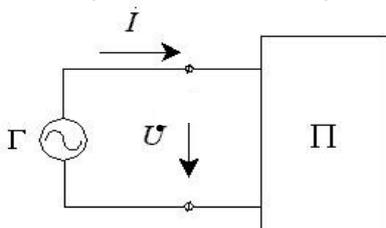


Рис. 1.2

Поскольку взаимное расположение векторов на диаграмме не изменяется, то удобно рассматривать комплексные амплитуды напряжений и токов в момент времени  $t = 0$ .

На [рис. 1.2](#) приведено схематическое изображение цепи переменного тока.

Генератор гармонических колебаний питает пассивный двухполюсник, состоящий из сопротивлений, индуктивностей и емкостей.

Отношение комплексных амплитуд напряжения  $\dot{U}$  и тока  $\dot{I}$  на входе двухполюсника называется его комплексным входным сопротивлением:

$$Z_{ВХ} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$

Величина, обратная комплексному сопротивлению, называется его комплексной проводимостью:

$$Y_{BX} = \frac{1}{Z_{BX}} = \overline{I} \cdot U$$

Учитывая, что  $U_m = U e^{j\psi}$  и  $I_m = I e^{j\psi_i}$ , получаем  $Z_{BX} = \frac{U_m}{I_m} e^{j(\psi_U - \psi_i)}$ .

Отношение  $\frac{U_m}{I_m}$  – полное входное сопротивление (модуль);  $\psi_U - \psi_i$  –

сдвиг фаз между напряжением и током.

Как всякое комплексное число, комплексное сопротивление и комплексная проводимость могут быть представлены в показательной, алгебраической и тригонометрической формах:

$$Z_{BX} = |Z_{BX}| e^{j\phi};$$

$R_{BX}$  – вещественная, активная составляющая;  $X_{BX}$  – мнимая, реактивная составляющая комплексного сопротивления;

$$Z_{BX} = |Z_{BX}| \cos \phi + j |Z_{BX}| \sin \phi.$$

Очевидно,

$$|Z_{BX}| = \sqrt{R_{BX}^2 + X_{BX}^2}, \quad \phi = \arctg \frac{X_{BX}}{R_{BX}}.$$

Если пассивный двухполюсник представляет собой активное сопротивление  $R$ , то на основании закона Ома

$$I = \frac{U}{R}, \quad I = I_m e^{j\psi_i} = \frac{U_m e^{j\psi_U}}{R},$$

т. е. амплитуда тока  $I_m =$

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

а разность фаз между током и напряжением

На векторной диаграмме (рис. 1.3) напряжение и ток совпадают по фазе  $Z_{BX} = R_{BX} = R, \quad X_{BX} = 0, \quad Y_{BX} = 1/R.$

Если пассивный двухполюсник представляет собой индуктивность, то

$$U_L = L \frac{di}{dt}.$$

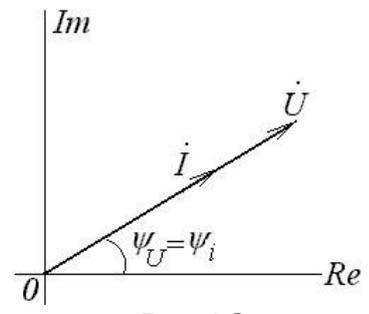


Рис. 1.3

Используя метод комплексных амплитуд, получаем

$$U_{Lm} = j\omega L I_m e^{j\psi} = \omega L I_m e^{j\psi} = \omega L I_m \left[ \cos(\psi + \frac{\pi}{2}) + j \sin(\psi + \frac{\pi}{2}) \right]$$

Отсюда следует, что амплитуда напряжения  $U_{Lm} = \omega L I_m = X_L I_m$ , где  $X_L = \omega L$  – индуктивное сопротивление, а обратная величина  $b_L = \frac{1}{\omega L}$  называется

индуктивной проводимостью. Угол сдвига фаз между напряжением и током,

т. е.  $\psi_U - \psi_I = \frac{\pi}{2}$  – ток отстает по фазе от напряжения на  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 1.4).

Очевидно, что входное сопротивление индуктивности – чисто мнимая величина

$$Z_{BX} = \frac{U}{I} = \frac{I_m e^{j\psi} j\omega L}{I_m e^{j\psi - \frac{\pi}{2}}} = j\omega L = \omega L e^{j\frac{\pi}{2}} = jX_L,$$

линейно изменяющаяся с частотой.

При подключении к источнику гармонического напряжения емкости в цепи потечет ток

$$i_C = C \frac{dU}{dt}.$$

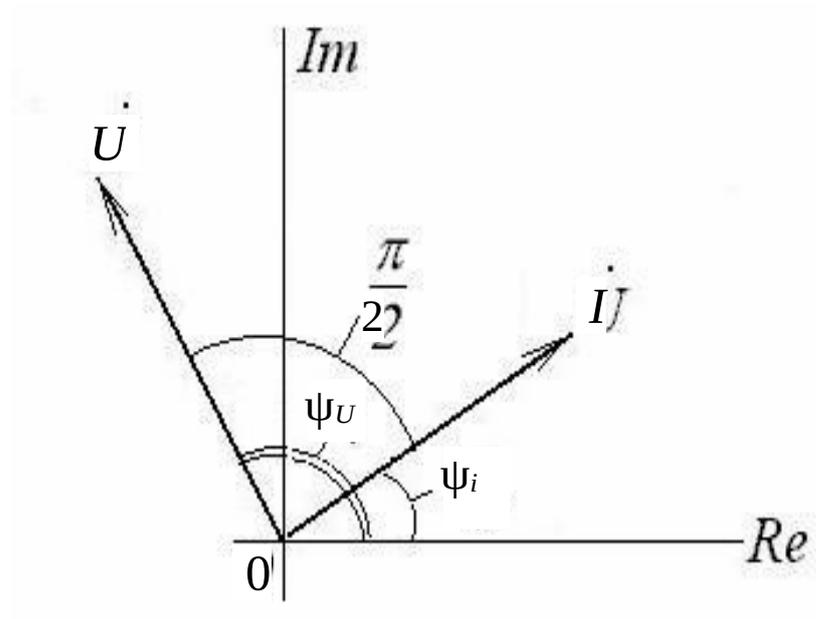


Рис. 1.4

Используя метод комплексных амплитуд, получаем:

$$i_C = C \frac{d(U e^{j\psi} U e^{j\omega t})}{dt} = CU e^{j\psi} U j\omega e^{j\omega t} = I e^{j\psi} e^{j\omega t},$$

$$\dot{I} = I_m e^{j\psi} \quad \dot{U} = U_m e^{j\psi - \frac{\pi}{2}}$$

Отсюда следует, что амплитуда тока в емкости

$$I_m = \omega C U_m = b U_m = \frac{U_m}{X_C}$$

где  $b_C = \omega C$  – проводимость емкости;  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  – емкостное сопротивление.

Сдвиг фаз между напряжением и током  $\psi = \psi_U - \psi_I = -\frac{\pi}{2}$ , т. е. ток опережает напряжение на  $\pi/2$  (рис. 1.5).

Следует отметить, что входное сопротивление емкости является чисто мнимой отрицательной величиной

$$Z_{BX} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U_m e^{j\psi_U}}{I_m e^{j\psi_I}} = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C} = -j X_C$$

зависящей от частоты источника.

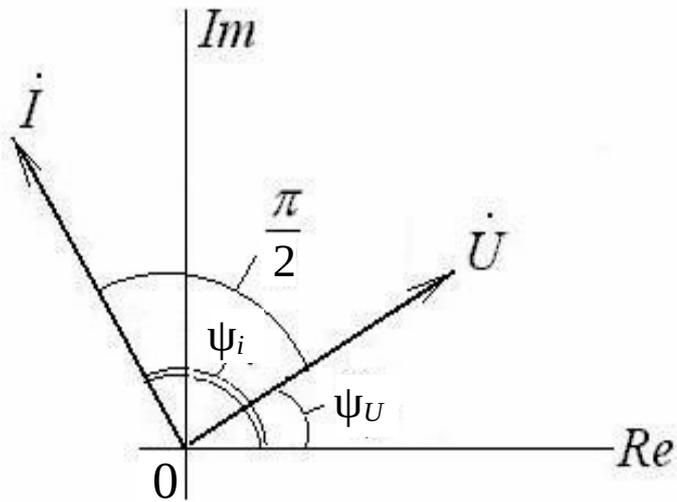


Рис. 1.5

Пассивный двухполюсник, состоящий из активных  $R$  и реактивных  $L, C$  элементов, имеет комплексное входное сопротивление, модуль и аргумент которого зависят от частоты генератора.

Зависимость модуля комплексного входного сопротивления цепи от частоты называется входной амплитудно-частотной характеристикой цепи (АЧХ):

$$Z_{\text{ВХ}} = Z_{\text{ВХ}}(\omega).$$

Зависимость аргумента комплексного входного сопротивления от частоты называется входной фазочастотной характеристикой цепи (ФЧХ):

$$\varphi_{Z_{\text{ВХ}}} = \varphi(\omega).$$

Для  $RL$ -цепи ([рис. 1.6](#))

$$\dot{Z}_{\text{ВХ}} = R + j\omega L = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} e^{j \arctg \frac{\omega L}{R}}.$$

Входная АЧХ последовательной  $RL$ -цепи

$$Z_{\text{ВХ}} = R \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2},$$

а входная ФЧХ

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\omega L}{R}.$$

Кривые  $Z_{\text{ВХ}}$  и  $\varphi(\omega)$  показаны на [рис. 1.7, а, б](#).

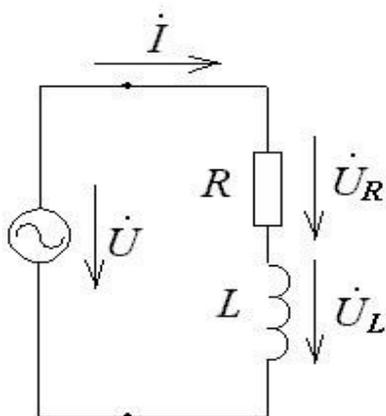


Рис. 1.6

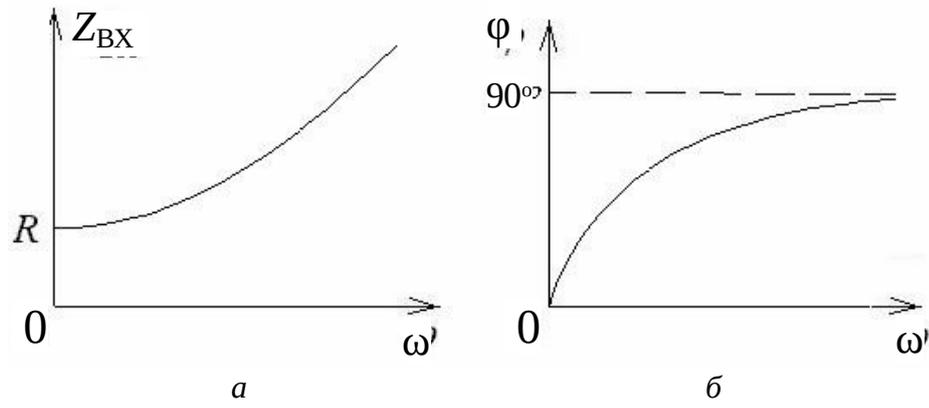


Рис. 1.7

На основании второго закона Кирхгофа

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L = R\dot{I} + j\omega L\dot{I},$$

где  $\dot{U}_R = R\dot{I}$  и  $\dot{U}_L = j\omega L\dot{I}$  – комплексные амплитуды напряжений на активных и реактивных сопротивлениях.

Построим векторные диаграммы напряжений и тока, приняв в качестве исходного вектор тока, поскольку он является общим для  $R$  и  $L$  при их последовательном соединении (рис. 1.8).

Очевидно, что в  $RL$ -цепи ток отстает от напряжения на входе на угол

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\omega L}{R}.$$

Если стороны треугольника напряжений поделить на ток, то получим:

$$\dot{Z}_{BX} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + j\omega L$$

или на комплексной плоскости сопротивление  $\dot{Z}_{BX}$  представляется вектором, направленным под углом  $\varphi$  к оси вещественных величин (рис. 1.9).

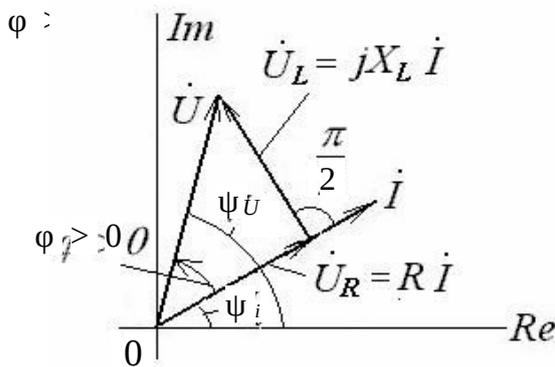


Рис. 1.8

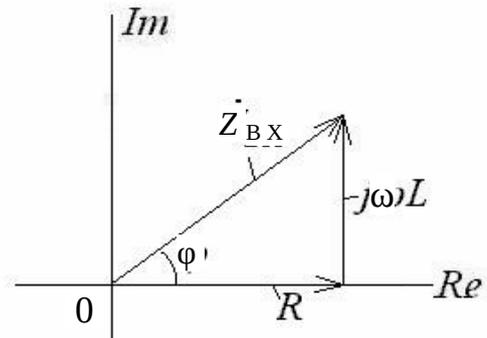


Рис. 1.9

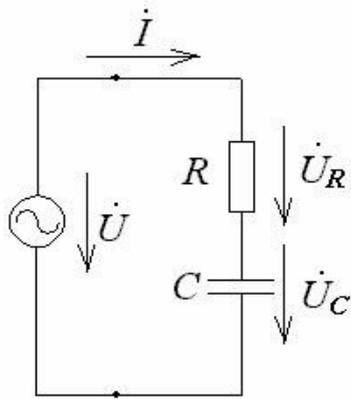


Рис. 1.10

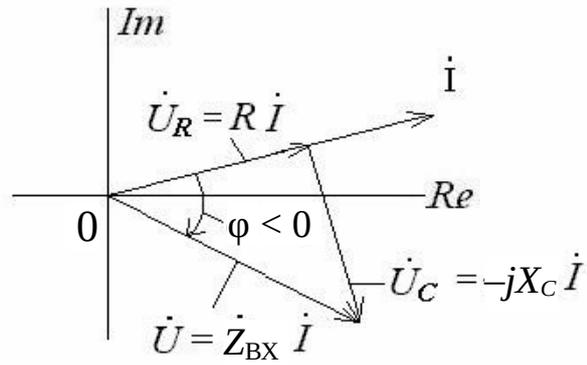


Рис. 1.11

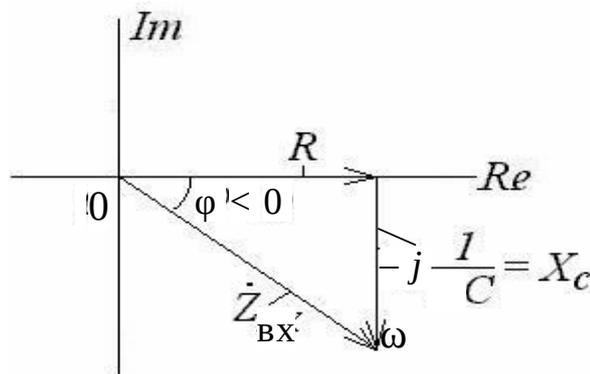


Рис. 1.12

Рассматривая аналогично последовательную RC-цепь (рис. 1.10), получаем

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C = R\dot{I} + \frac{1}{j\omega C}\dot{I} = -jX_C\dot{I}.$$

Векторные диаграммы напряжений и токов приведены на рис. 1.11. Очевидно, в RC-цепи ток опережает напряжение на угол

$$\varphi = \arctg \frac{X_C}{R} = \arctg \frac{1}{\omega CR}.$$

Аналогично, как и в RL-цепи, для последовательной RC-цепи можно построить на комплексной плоскости треугольник сопротивлений (рис. 1.12).

$$\dot{Z}'_{BX} = R + \frac{1}{j\omega C} = R \sqrt{1 + \left(\frac{1}{R\omega C}\right)^2} e^{-j \arctg \frac{1}{\omega CR}}.$$

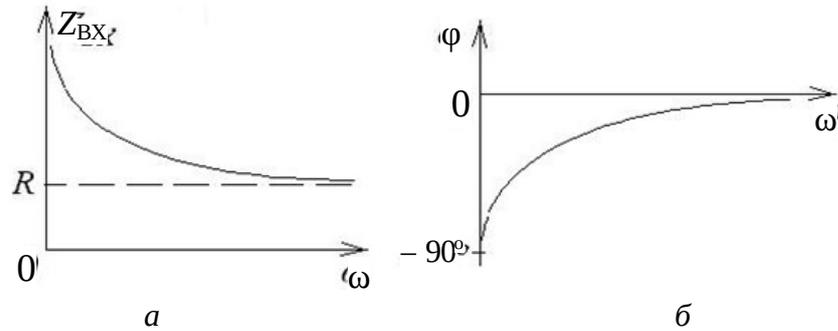


Рис. 1.13

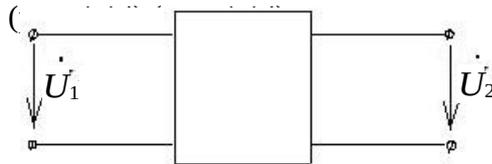


Рис. 1.14

Входная АЧХ –  $Z_{BX} = R \sqrt{1 + \left( \frac{1}{R\omega C} \right)^2}$  (рис. 1.13, а),  
 входная ФЧХ –  $j(\omega) = -j \arctg \frac{1}{\omega CR}$  (рис. 1.13, б).

Электрические цепи с четырьмя зажимами (двумя входными и двумя выходными) называются четырехполюсниками (рис. 1.14).

Одной из функций, характеризующих передачу сигнала четырехполюсником, является комплексная передаточная функция по напряжению, которая представляет собой отношение комплексных выходного  $U_2$  и входного

$U_1$  напряжений:

$$K(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = |K(\omega)| e^{jk(\omega)},$$

где  $|K(\omega)| = \left| \frac{U_2}{U_1} \right|$  – передаточная АЧХ;  $\varphi_k(\omega)$  – передаточная ФЧХ.

Комплексная передаточная функция по напряжению  $RL$ -цепи при выходном напряжении на индуктивности (рис. 1.15)

$$K_L(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{j\omega L}{R + j\omega L} = \frac{j\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} e^{j \arctg \frac{\omega L}{R}} = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} e^{j \arctg \frac{\omega L}{R}}$$

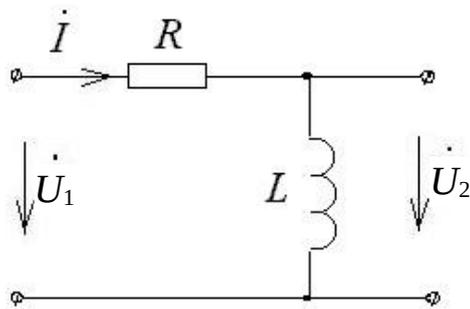


Рис. 1.15

Передаточная АЧХ –  $K_L(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}}$ ,

передаточная ФЧХ –  $\varphi_{kL}(\omega) = \pi - \arctg \frac{R}{\omega L}$ ,  
 (заметим, что  $\arctg \frac{\omega L}{R} = j(\omega)$  – входная ФЧХ).

Если в цепи (рис. 1.15) поменять местами  $R$  и  $L$ , то комплексная передаточная функция по напряжению

$$K_R(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I R}{(R + j\omega L)U_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}} e^{-j \arctg \frac{\omega L}{R}}$$

Передаточная АЧХ –  $K_R(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}}$ ,

передаточная ФЧХ –  $\varphi_{kR}(\omega) = - \arctg \frac{\omega L}{R} = -j(\omega)$ .

Кривые передаточных амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик  $RL$ -цепи приведены на рис. 1.16.

Аналогично получим комплексные передаточные характеристики  $RC$ -цепи (рис. 1.17):

$$K_C(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} e^{-j \arctg \omega CR}$$

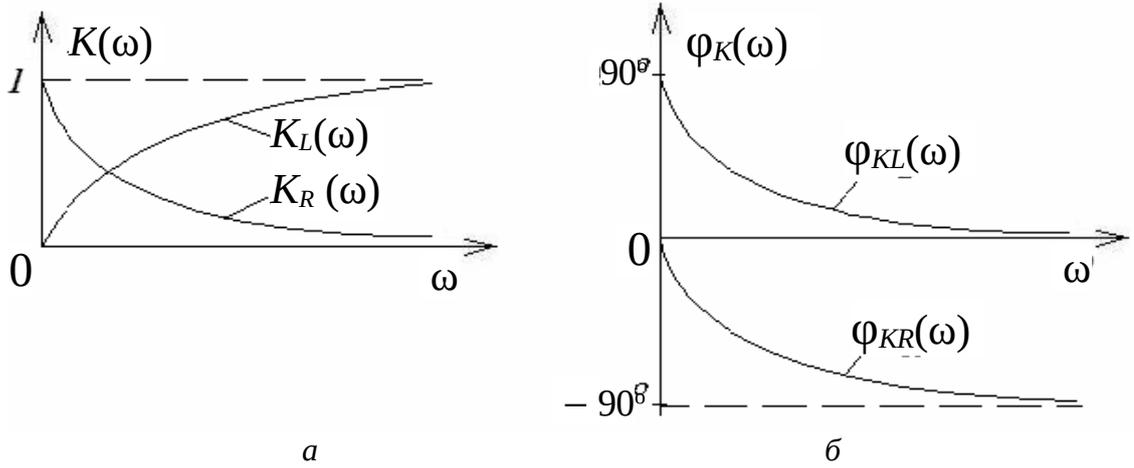


Рис. 1.16

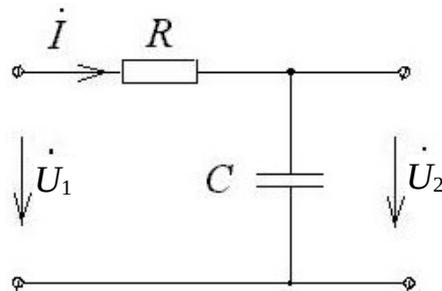


Рис. 1.17

Передаточная АЧХ –  $K_C(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$ ,  
 передаточная ФЧХ –  $\varphi_{KC}(\omega) = -\arctg \frac{1}{\omega CR}$ .

Если выходное напряжение снимать с сопротивления  $R$ , то

$$K_R(\omega) = \frac{U_1 R}{R - j \frac{1}{\omega C}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} e^{j \arctg \frac{1}{\omega CR}}$$

Передаточная АЧХ -  $K_R(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$ ,  
 передаточная ФЧХ -  $\varphi_{KR}(\omega) = \arctg \frac{1}{\omega CR}$ ,

где  $\varphi(\omega)$  – входная фазочастотная характеристика.

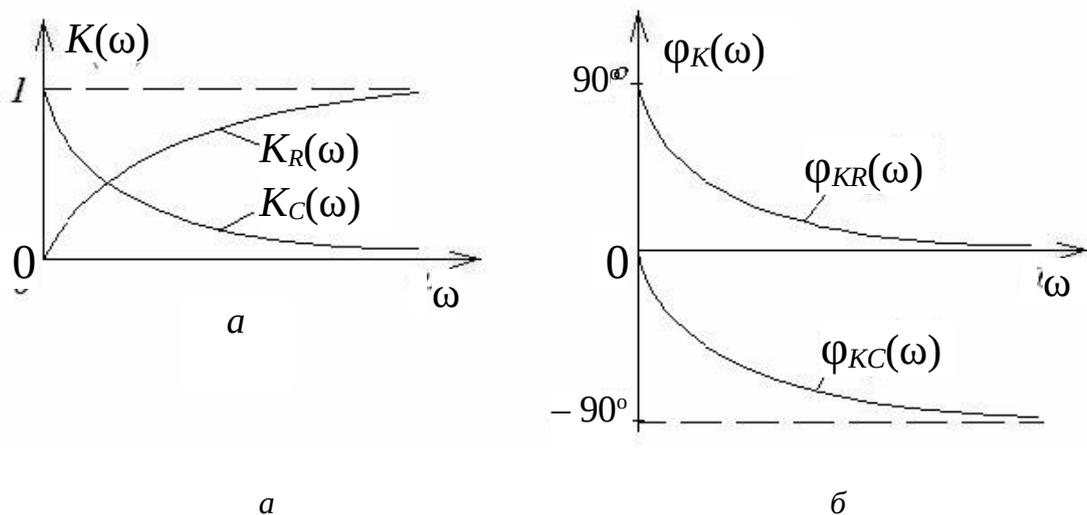


Рис. 1.18

Графики функций  $K_C(\omega)$ ,  $K_R(\omega)$ ,  $\varphi_C(\omega)$ ,  $\varphi_R(\omega)$  приведены на [рис. 1.18](#).

Рассмотренные передаточные характеристики  $RL$ - и  $RC$ -цепей позволяют определить и их входные характеристики. Действительно, передаточные ФЧХ  $RL$ - и  $RC$ -цепей при снятии напряжения с сопротивления представляют собой входные ФЧХ этих цепей, взятые с обратным знаком.

Входная АЧХ определяется как  $Z_{BX} = \frac{U_1}{I}$ , для  $RL$ - и  $RC$ -цепей ([рис. 1.15](#) и [рис. 1.17](#)):

$$I = \frac{U_2}{R}, \text{ но } U_2 = K_R(\omega)U_1,$$

следовательно,  $Z_{BX} = \frac{U_1 R}{K_R(\omega)U_1} = \frac{R}{K_R(\omega)},$

т. е., зная сопротивление  $R$  и определив (например экспериментально) передаточную АЧХ, можно рассчитать входную амплитудно-частотную характеристику цепи.

### Домашнее задание

1. Рассчитать и построить графики входных и передаточных АЧХ и ФЧХ  $RL$ -цепи ([рис. 1.15](#)). Расчет произвести для  $R = R_L + R_3 = R_L + R_5$ ,  $L = L_1 + L_5$  (табл. 1.1) ( $R_L = 30$  Ом – сопротивление потерь индуктивностей), если частота изменяется в диапазоне 1–20 кГц.

Таблица 1.1

Элементы цепи	Номер макета				
	1	2	3	4	5
Емкости $C_1-C_{10}$ (нФ)	14,2	14,7	10,0	15,8	20,0
Индуктивности $L_1-L_6$ (мГн)	22,5	19,8	30,0	25,0	14,3
Резисторы	100	100	100	100	100
$R_1$	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
$R_2$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$R_3$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
$R_4$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$R_5$	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
$R_6$	100	100	100	100	100
$R_7$ (кОм)					

1. Рассчитать и построить графики входных и передаточных частотных характеристик  $RC$ -цепи (рис. 1.17) для  $R = R_3 = R_5$ ,  $C = C_2 = C_8$  при изменении частоты в диапазоне 1–20 кГц.

#### Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь по схеме (рис. 1.19) (замкнуть ключи К3, К13, К14, К26, К20). С помощью клавиатуры ПК задать параметры входного сигнала для снятия передаточных АЧХ и ФЧХ. (Нижняя частота  $f_H = 1$  кГц, верхняя частота  $f_B = 20$  кГц, шаг по частоте  $\Delta f = 500$  Гц, амплитуда колебаний 1 В).

Полученные на экране ПК характеристики скопировать на дискету (или зарисовать с экрана на миллиметровку).

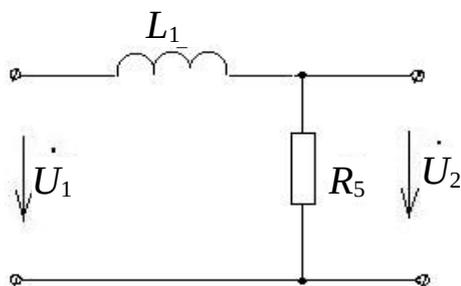


Рис. 1.19

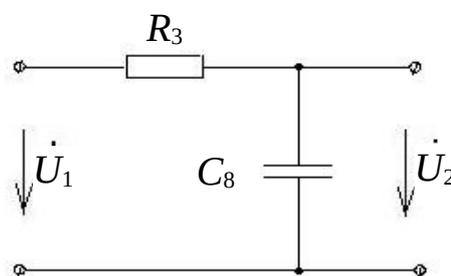


Рис. 1.20

1. Поменяв в цепи ([рис. 1.19](#))  $L_1$  на  $L_1 + L_4$   $2L_1$  (замкнуть ключи К3, К15, К26, К20), повторить измерения (п. 1). Отметить изменения АЧХ и ФЧХ, полученные при изменении величины индуктивности.

2. Поменяв в цепи ([рис. 1.19](#))  $L_1$  на  $R_3 = R_5$  и  $R_5$  на  $L_5 = L_1$ , повторить измерения передаточных АЧХ и ФЧХ при снятии выходного напряжения с индуктивности  $L_5$ .

3. Подключив в цепь (п. 3) последовательно с  $L_5$  индуктивность  $L_4$ , повторить регистрацию АЧХ и ФЧХ при полной индуктивности:

$$L = L_5 + L_4 = 2L_4.$$

4. Собрать цепь по схеме, представленной на [рис. 1.20](#). Для диапазона частот ([п. 1](#)) произвести регистрации передаточных АЧХ и ФЧХ при снятии напряжения с емкости.

5. Для исследования влияния величины емкости на частотные характеристики цепи повторить измерения по п. 5 для двух случаев:

1) вместо  $C_8$  включены  $C_8 + C_{10} = 2 C_8$ ;

2) вместо  $C_8$  включены последовательно соединенные  $C_8$  и  $C_6$ .

2. Для исследования частотных характеристик RC-цепи при снятии выходного напряжения с сопротивления поменять в цепи ([рис. 1.20](#))  $R_3$  на  $C_2 = C_8$ , а  $C_8$  на  $R_3 = R_5$  и произвести регистрацию АЧХ и ФЧХ в том же диапазоне частот, что и в предыдущих случаях.

3. Аналогично [п. 6](#) исследовать изменения частотных характеристик RC-цепи в случае замены  $C_2$  на последовательно соединенные  $C_2$  и  $C_6$ .

4. По результатам проведенных измерений

рассчитать и построить графики входных АЧХ и ФЧХ для цепей (рис. 1.19, рис. 1.20).

5. Для частот  $f = 1, 10, 20$  кГц построить векторные диаграммы напряжений в  $RL$ - и  $RC$ -цепях.

### Содержание отчета

Отчет должен включать:

1. Результаты выполнения домашнего задания в виде таблиц и графиков.
2. Схемы экспериментальных исследований.
3. Графики полученных экспериментальных частотных характеристик.
4. Векторные диаграммы.
5. Краткие выводы по работе с объяснением причины расхождения расчетных и экспериментальных данных.

### Контрольные вопросы

1. Что называется амплитудно-частотной характеристикой цепи?
2. Что называется фазочастотной характеристикой цепи?
3. Как определяется фазовый сдвиг между напряжением и током в цепи, содержащей активное сопротивление и индуктивность?
4. Как определяется фазовый сдвиг между напряжением и током в цепи, содержащей активное сопротивление и емкость?
5. Как выглядит векторная диаграмма цепи, содержащей активное сопротивление и индуктивность?
6. Как выглядит векторная диаграмма цепи, содержащей активное сопротивление и емкость?
7. Показать зависимость тока и напряжения на элементах от частоты для цепи, содержащей последовательно включенные  $R$  и  $L$  при питании от источника ЭДС и источника тока.

8. Показать зависимость тока и напряжения на элементах от частоты для цепи, содержащей последовательно включенные  $R$  и  $C$  при питании от источника ЭДС и источника тока.

9. Показать зависимость тока и напряжения на элементах от частоты для цепи, содержащей параллельно включенные  $R$  и  $L$  при питании от источника ЭДС и источника тока.

10. Показать зависимость тока и напряжения на элементах от частоты для цепи, содержащей параллельно включенные  $R$  и  $C$  при питании от источника ЭДС и источника тока.

11. Как осуществить эквивалентный переход от цепи, содержащей последовательно включенные  $R$  и  $X$ , к цепи с параллельными элементами?

12. Как осуществить эквивалентный переход от цепи, содержащей параллельно включенные  $R$  и  $X$ , к цепи с последовательными сопротивлениями?

13. Как обеспечиваются режим генератора ЭДС и генератора тока при работе с реальными источниками?

14. Как определить фазовый сдвиг между напряжением и током в цепи с последовательно включенными  $R$  и  $X$  по известным напряжениям на входе и на элементах цепи?

## Лабораторная работа № 2

### Исследование разветвленной электрической цепи постоянного тока

**Цель работы:** экспериментальная проверка выполнения законов Кирхгофа; исследование распределения потенциалов в сложной электрической цепи; проверка выполнения баланса мощностей.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

##### Электрическая схема и ее элементы

**Электрической цепью** называется совокупность устройств, предназначенных для получения, передачи, распределения и взаимного преобразования электрической (электромагнитной) и других видов энергии, в которой процессы, протекающие в устройствах, могут быть описаны при помощи понятий об электродвижущей силе (ЭДС), токе и напряжении.

Основными элементами электрических цепей являются **источники и приемники** электрической энергии. Кроме источников и приемников электрической энергии электрическая цепь содержит соединительные провода, защитную и коммутационную аппаратуру, измерительные приборы. В дальнейшем, при анализе электрических цепей, будем считать, что все эти элементы не влияют на токораспределение в цепи, а только выполняют функции коммутации, защиты или измерения.

Любая реальная электрическая цепь может быть представлена расчетной электрической схемой замещения.

**Расчетной схемой электрической цепи** называют условное графическое изображение идеализированной электрической цепи, показывающее последовательность соединения ее участков и их характер.

Геометрическая конфигурация схемы характеризуется понятиями *ветвь, узел, контур*.

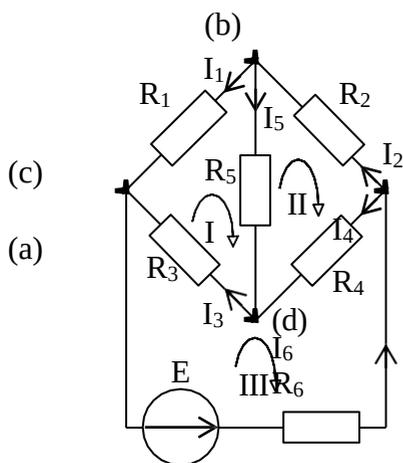


Рис. 1.1

принадлежащий другим контурам.

Схема электрической цепи (рис. 1.1) имеет четыре узла (a, b, c, d), шесть ветвей с токами  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$  и  $I_6$  и три независимых контура (I, II, III).

### Источники электрической энергии

В источниках электрической энергии происходит преобразование различных видов энергии (механической, тепловой, химической и т.д.) в электрическую энергию. Источники электрической энергии можно рассматривать как *источники ЭДС* или как *источники тока*. Каждый из них может быть идеальным или реальным.

К *источникам ЭДС* относят источники электрической энергии, в которых напряжение  $U_E$  мало зависит от тока, идущего от источника в приемник, и внутреннее сопротивление  $R_B$  которых мало по сравнению с сопротивлением нагрузки.

**Идеальным источником ЭДС** называется источник, внутреннее сопротивление которого равно нулю и напряжение на зажимах источника  $U_E$  всегда равно ЭДС (рис. 1.2, а).

**Ветвь** - участок электрической схемы, который включен между двумя соседними узлами и по которому протекает один и тот же ток.

**Узел** - место соединения не менее трех ветвей электрической схемы.

**Контур** - любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям, в котором один узел является началом и концом пути.

**Независимый (или элементарный) контур** - контур, содержащий хотя бы один элемент, не

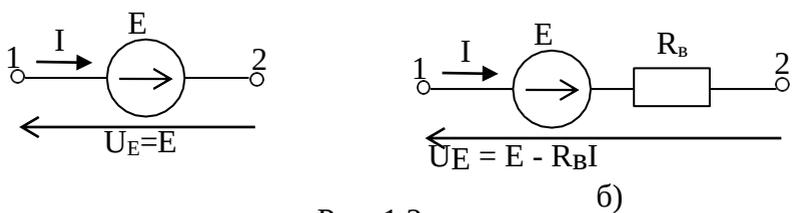


Рис. 1.2

**Реальные источники ЭДС**, обладающие внутренним сопротивлением, отличным от нуля, на схеме замещения (рис. 1.2, б) показывают в виде последовательного соединения идеального источника ЭДС и его внутреннего сопротивления.

Напряжение реального источника ЭДС определяется:  $U_E = E - R_B I$ . Такой источник часто называют **источником напряжения**.

К **источникам тока** обычно относят источники электрической энергии, в которых ток мало зависит от напряжения, которое создается источником на зажимах приемника, а внутреннее сопротивление велико по сравнению с сопротивлением нагрузки.

**Идеальным источником тока**  $J$  называется источник, внутреннее сопротивление которого равно бесконечности, то есть внутренняя проводимость  $g_B$  равна нулю (рис. 1.3, а). Ток ветви, содержащей такой идеальный источник, всегда равен току источника  $J$ .

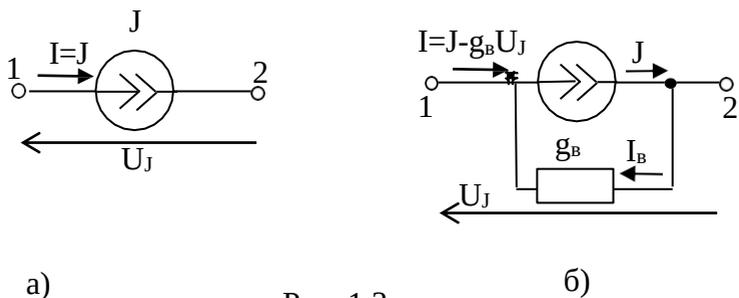


Рис. 1.3

**Реальный источник тока**, внутренняя проводимость которого отлична от нуля, на схеме замещения показывают в

виде параллельного соединения идеального источника тока и ветви с проводимостью  $g_B$  (рис. 1.3, б). Ток ветви, содержащей реальный источник тока:  $I = J + I_B = J + g_B U_J$ .

На рис. 1.2 и 1.3 показаны положительные направления напряжений  $U_E$  и  $U_J$  на зажимах источников электрической энергии.

Источники электрической энергии могут быть представлены двумя эквивалентными схемами: реальный источник напряжения (рис. 1.4, а) или реальный источник тока (рис. 1.4, б).

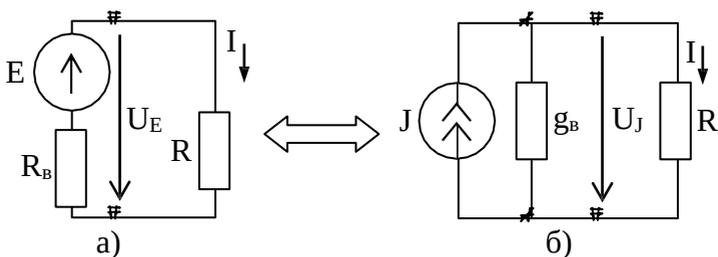


Рис. 1.4

Реальные источники ЭДС и тока эквивалентны при условии;

$$\frac{E}{R_B} = J + g_B \quad \text{и} \quad g_B = \frac{1}{R_B}$$

### Приемники электрической энергии

В приемниках происходит преобразование электрической энергии в другие виды энергии. Все приемники электрической энергии характеризуются такой величиной, как электрическое сопротивление  $R$ .

В том случае, если величина сопротивления не зависит от тока и напряжения ( $R = \text{const}$ ), приемники называют **линейными**, и их вольт-амперная характеристика (ВАХ) линейна (рис. 1.5, а). Если же величина сопротивления зависит от тока или

напряжения  $R=f(U, I)$ , то такие приемники имеют нелинейную ВАХ (рис. 1.5, б) и называются **нелинейными**.

U, В

U, В

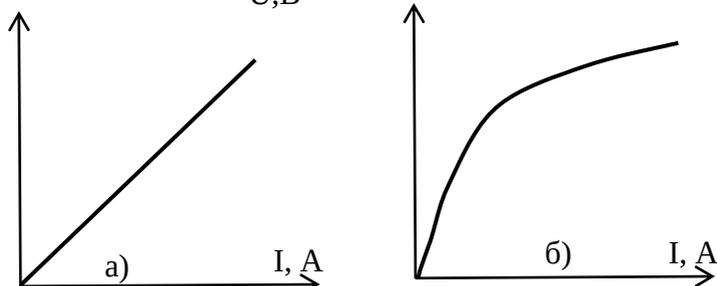


Рис. 1.5

### Закон Ома

Закон Ома устанавливает связь между током, напряжением и сопротивлением отдельной ветви или одноконтурной цепи.

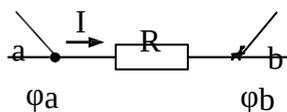
а) закон Ома для участка цепи

без источников электрической энергии.

Ток в резисторе (рис. 1.6) направлен от точки с **большим** потенциалом

(а) к точке с **меньшим** потенциалом

(б). Положительное направление



$U_{ab}$  Рис. 1.6



напряжения на приемнике всегда совпадает по направлению с током.

Закон Ома для участка цепи, не содержащего источника ЭДС, устанавливающий связь между напряжением и током этого участка, может быть записан в виде:

$$U_{ab} = RI,$$

где  $R$ - коэффициент пропорциональности между напряжением и током на участке  $ab$ .

Напряжение  $U_{ab}$  между двумя точками равно разности потенциалов этих точек. Тогда на основании закона Ома можно сделать следующие записи:

$$U_{ab} = U_a - U_b = -RI; \quad U_{ab} = U_a - U_b = R I$$

б) закон Ома для участка цепи с источниками ЭДС. Определим напряжение на участке цепи, содержащей источники ЭДС (рис. 1.7). Для этого запишем значение потенциала точки  $a$  относительно потенциала точки  $b$ . Примем потенциал точки  $b$  равным нулю и последовательно определим потенциалы всех остальных точек участка.

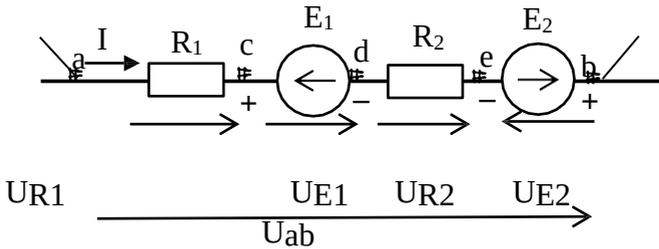


Рис. 1.7

При переходе от точки  $b$  к точке  $e$  потенциал уменьшается на величину ЭДС  $E_2$ , так как распределение потенциалов на зажимах источника не зависит от направления тока и «минус» источника подсоединен к точке  $e$ :  $U_b = 0$ ;  $U_e = U_b - E_2$ .

При переходе от точки  $e$  к точке  $d$  через резистор с сопротивлением  $R_2$  потенциал увеличивается на величину напряжения на этом участке, так как ток течет в резисторе от точки  $c$  с большим потенциалом к точке  $d$  с меньшим потенциалом:  $U_d = U_e + R_2 I$ .

Потенциал точки  $c$  больше потенциала точки  $d$  на величину ЭДС  $E_1$  источника, так как ЭДС всегда направлена в сторону высокого потенциала независимо от направления тока.



При переходе от точки  $c$  к точке  $a$  через резистор с сопротивлением  $R_1$  потенциал увеличивается на величину напряжения на этом резисторе, так как мы движемся против тока:  $a$   $c$   
 $R_1 I$ .

Запишем значение потенциала точка  $a$  через потенциал точки  $b$ :

$$\varphi_a = \varphi_b + E_2 - R_2 I + E_1 - R_1 I.$$

Выразив из этого уравнения ток, получим выражение для закона Ома для участка цепи с источником ЭДС:

$$I = \frac{(\varphi_a - \varphi_b) + E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_{ab} + E_1 - E_2}{R_1 + R_2}$$

или в обобщенном виде

$$I = \frac{U_{ab} + \sum_{k=1}^n E_k}{\sum_{k=1}^n R_k},$$

где  $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$  – напряжение между началом и концом участка цепи, совпадающее по направлению с искомым током;

$\sum_{k=1}^n E_k$  – алгебраическая сумма ЭДС ветви, в которую ЭДС, совпадающие по направлению с искомым током, входят со знаком «плюс», а не совпадающие – со знаком «минус»;

$\sum_{k=1}^n R_k$  – сумма сопротивлений рассматриваемого участка цепи.

В случае, если полученное в результате расчета значение тока отрицательно, значит, его действительное направление противоположно ранее принятому за

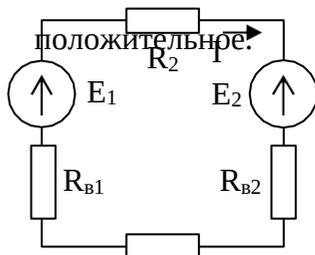


Рис. 1.8

в) закон Ома для неразветвленной цепи (рис. 1.8) в общем виде: ток прямо пропорционален алгебраической сумме ЭДС цепи и обратно пропорционален сумме сопротивлений этой цепи.

$$I = \frac{E_k}{R_{k1} + R_{k2} + \dots + R_{kn}}$$

Направление тока в такой цепи соответствует направлению большей по величине ЭДС. При записи алгебраической суммы ЭДС принимают: если ЭДС одинаково направлена с током, она считается положительной; если ЭДС направлена навстречу току, то она считается отрицательной.

Для цепи рис. 1.8 ток можно записать:

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_{B1} + R_2 + R_{B2}}$$

### Законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа применяют к узлам схемы и формулируют следующим образом: алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0.$$

В этом уравнении одинаковые знаки берут для токов, имеющих одинаковые направления относительно узла схемы.

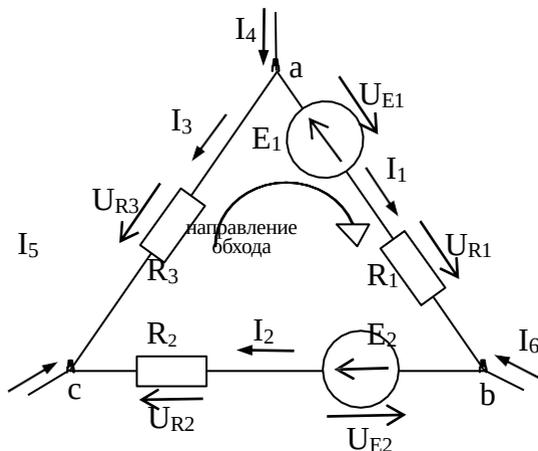
Для узла а схемы рис. 1.9 уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа будет иметь вид:

$$I_1 + I_3 + I_4 = 0.$$

Второй закон Кирхгофа применяют к контурам схемы электрической цепи и формулируют следующим образом: алгебраическая сумма напряжений на всех элементах контура равна нулю.

В этом уравнении слагаемые берут со знаком «плюс», если направления напряжений совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура и со знаком «минус» - если не совпадают. При этом необходимо помнить, что направление напряжения на приемниках совпадает по направлению с током, а напряжение источника противоположно направлению ЭДС.

Рис. 1.9



Например, составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, схема которого изображена на рис. 1.9. Напряжения на всех элементах контура и произвольно выбранный обход показаны на схеме.

Уравнение, составленное на основании второго закона Кирхгофа, имеет вид

$$U_{E1} \quad U_{R1} \quad U_{E2} \quad U_{R2} \quad U_{R3} \quad 0 \quad \text{или}$$

$$E_1 \quad R_1 I_1 \quad E_2 \quad R_2 I_2 \quad R_3 I_3 \quad 0.$$

Перенесем напряжения источников в правую часть уравнения

$$R_1 I_1 \quad R_2 I_2 \quad R_3 I_3 \quad E_1 \quad E_2.$$

Тогда второй закон Кирхгофа можно сформулировать следующим образом: *в любом контуре алгебраическая сумма напряжений на приемниках, входящих в контур, равна алгебраической сумме ЭДС этого контура:*

$$\sum_{k=1}^n R_k I_k - \sum_{k=1}^n E_k = 0$$

В этом уравнении положительные знаки принимают для напряжений и ЭДС, направления которых совпадают с произвольно выбранным направлением обхода рассматриваемого контура.

### Режимы работы источников электрической энергии

Рассмотрим работу реального источника ЭДС, к зажимам которого присоединен линейный резистор с сопротивлением  $R$  (рис. 1.10).

Ток в такой цепи  $I = \frac{E}{R + R_B}$ , а напряжение на зажимах источника  $U_E = E - R_B I$ .

При изменении сопротивления нагрузочного резистора будет изменяться ток в цепи и напряжение источника. Зависимость между напряжением и током источника показана на вольт-амперной характеристике (ВАХ) рис. 1.11.

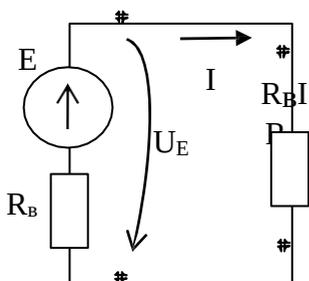


Рис. 1.10

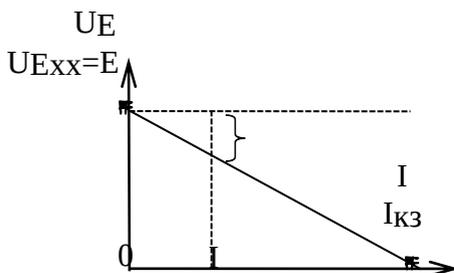


Рис. 1.11

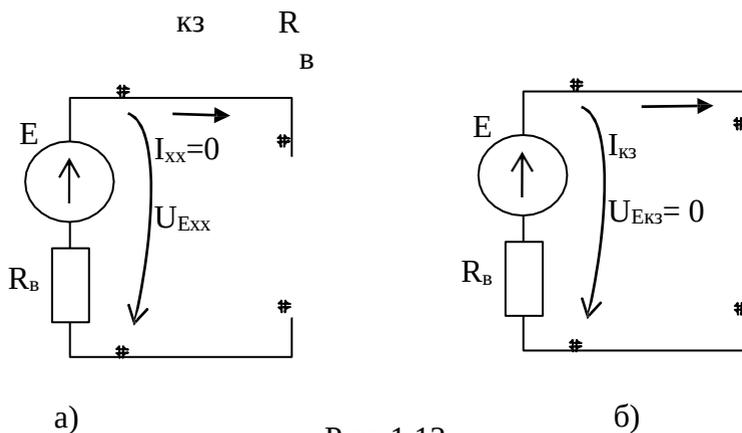
Если зажимы источника разомкнуты (рис. 1.12, а),

нагрузка не подключена ( $R_H = \infty$ ) – источника работает в *режиме холостого хода*. При этом ток в цепи отсутствует  $I_{XX} = 0$ .

Напряжение источника в этом случае равно ЭДС:  $U_{E_{XX}} = E$ .

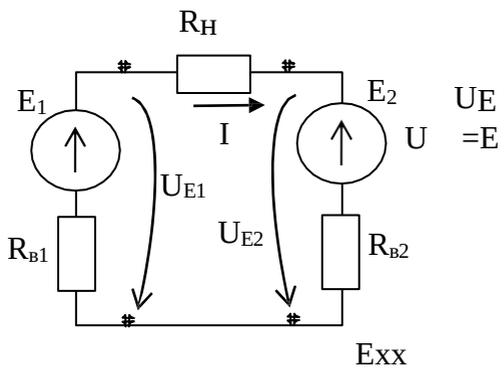
Если зажимы источника соединены проводником с сопротивлением равным нулю ( $R_H = 0$ ) (рис. 1.12, б), источник замкнут накоротко – источник работает в *режиме короткого замыкания*. Напряжение источника равно нулю  $U_{E_{K3}} = 0$ . Ток

цепи в этом случае  $I = \frac{E}{R_B}$ .



В схеме рис.1.13 два реальных источника ЭДС включены встречно. Если  $E_1 > E_2$ , то ток в цепи будет совпадать по направлению с первым источником ЭДС и находится, как

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R + R_{B1} + R_{B2}}$$



Режим приемника  
Идеальный источник  
ЭДС

Режим генератора

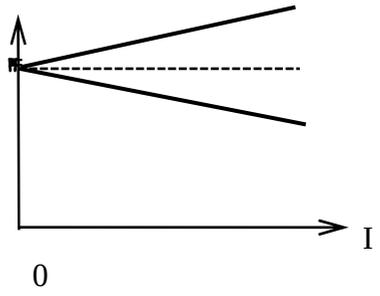


Рис. 1.13

Рис. 1.14

Первый источник, под действием которого в цепи возникает ток и ЭДС которого совпадает по направлению с этим током, работает в *режиме генератора* и напряжение на его зажимах равно

$$U_{E1} = E_1 - R_{B1}I.$$

Второй источник, направление ЭДС которого не совпадает по направлению с током цепи, по отношению к первому источнику работает в *режиме нагрузки* и напряжение на его зажимах

$$U_{E2} = E_2 + R_{B2}I.$$

На рис. 1.14 показаны ВАХ идеального источника ЭДС ( $R_B=0$ ) и реальных источников, работающих в режиме генератора и в режиме приемника.

### Эквивалентные преобразования пассивной части электрической цепи

С целью упрощения расчета электрической цепи часто оказывается целесообразным осуществить эквивалентное преобразование некоторой части цепи.

Часть цепи до преобразования эквивалентна этой же части после преобразования при условии, что режим в остальной не преобразованной части схемы остается неизменным. То есть разность потенциалов между зажимами преобразованной части схемы остается такой же, как и напряжение на зажимах не преобразованной части схемы, а также входной ток преобразованной части схемы остается неизменным.

Ветвь может содержать любое число последовательно соединенных элементов цепи. При этом *последовательным* соединением участков электрической цепи называют соединение, при котором через все участки цепи проходит один и тот же ток.

Напряжение на зажимах такого участка цепи равно сумме напряжений на каждом из ее элементов (рис. 1.15):

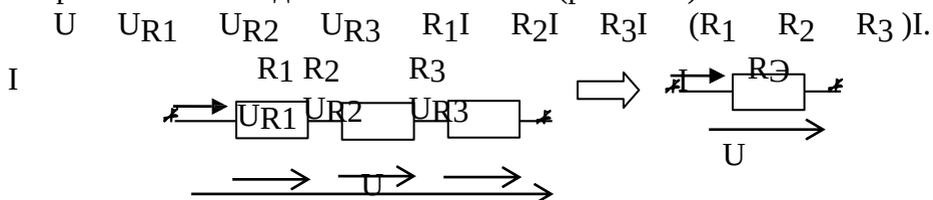


Рис. 1.15

Если мы хотим заменить участок цепи, состоящий из нескольких последовательно соединенных элементов, одним эквивалентным, то напряжение на нем будет равно:  $U = R_{\Sigma} I$ .

Учитывая условия эквивалентного преобразования, получаем:  $R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3$ ,

то есть при последовательном соединении элементов сопротивление цепи равно сумме сопротивлений составляющих ее элементов.

*Параллельным* соединением участков (ветвей) электрической цепи называют соединение, при котором все участки цепи присоединены к одной паре узлов и на всех этих участках имеется одно и то же напряжение (рис. 1.16).

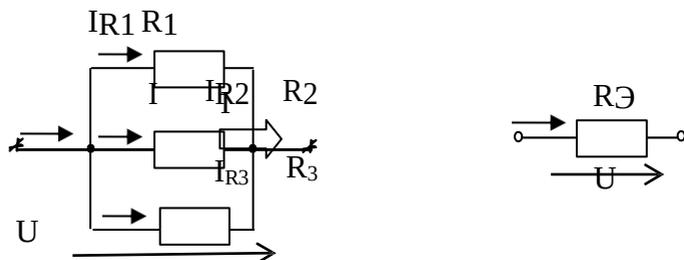


Рис. 1.16

При этом ток на входе цепи равен сумме токов параллельных ветвей:

$$I = I_{R1} + I_{R2} + I_{R3} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) U = (G_1 + G_2 + G_3) U.$$

В том случае, если необходимо заменить участок электрической цепи, состоящий из нескольких параллельно соединенных элементов, одним эквивалентным, то ток такого эквивалентного элемента будет определяться:

$$I = \frac{U}{R_{\text{Э}}} = G_{\text{Э}} U.$$

Учитывая условия эквивалентного преобразования, можно записать:

$$G_{\text{Э}} = G_1 + G_2 + G_3 \quad \text{или} \quad \frac{1}{R_{\text{Э}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3},$$

то есть при параллельном соединении приемников для получения эквивалентной проводимости, складывают проводимости параллельных ветвей.

Отсюда можно получить формулу для определения эквивалентного сопротивления:

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}.$$

$$R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3$$

Для случая параллельного соединения двух ветвей это выражение

буде иметь вид:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_3}$$

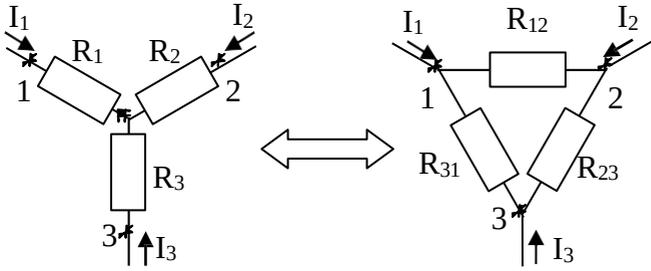
э  $R_1 R_2$

При расчете электрических цепей возникает необходимость взаимных эквивалентных преобразований *звезды сопротивлений* (рис. 1.17, а) и *треугольника сопротивлений* (рис. 1.17, б). Соединения звездой и треугольником эквивалентны друг другу при условии, что при одинаковых для двух схем напряжениях  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$  между точками 1, 2 и 3, токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , подходящие к этим точкам от остальной части цепи, также одинаковы в обоих случаях. Формулы для определения *сопротивлений лучей звезды* через сопротивления сторон треугольника имеют вид:

$$R_{12} = \frac{R_{23} R_{31}}{R_{23} + R_{31} + R_{12}}$$

$$R_{23} = \frac{R_{12} R_{31}}{R_{23} + R_{31} + R_{12}}$$

$$R_{31} = \frac{R_{12} R_{23}}{R_{23} + R_{31} + R_{12}}$$



а) б)

Рис. 1.17

Формулы для расчета *сопротивлений сторон треугольника* через сопротивления лучей звезды имеют вид:

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_{31} = \frac{R_3 R_1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

## **Расчет электрических цепей путем непосредственного применения законов Кирхгофа**

Если известны величины всех сопротивлений электрической цепи, а также величины и направления всех ЭДС, то токи в ветвях можно определить, используя законы Кирхгофа.

При этом рекомендуется придерживаться следующей *последовательности расчета*:

- произвольно выбирают положительные направления токов во всех ветвях схемы и обходов контуров;

- на основании законов Кирхгофа составляется система алгебраических уравнений, необходимая для определения неизвестных токов в ветвях схемы; число совместно решаемых уравнений, составляемых по законам Кирхгофа, равно количеству неизвестных токов в ветвях схемы; из них число уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа, на одно меньше, чем количество узлов в схеме; остальные недостающие уравнения составляются по второму закону Кирхгофа.

- полученная система уравнений решается любым удобным способом.

Если в результате решения составленной системы уравнений значение какого-либо тока получится отрицательным, то это значит, что действительное направление этого тока противоположно ранее выбранному. По найденным значениям токов можно определить напряжения на участках схемы и расходуемые в резисторах мощности.

Составим систему уравнений на основании законов Кирхгофа для электрической цепи, схема которой представлена на рис.1.18.

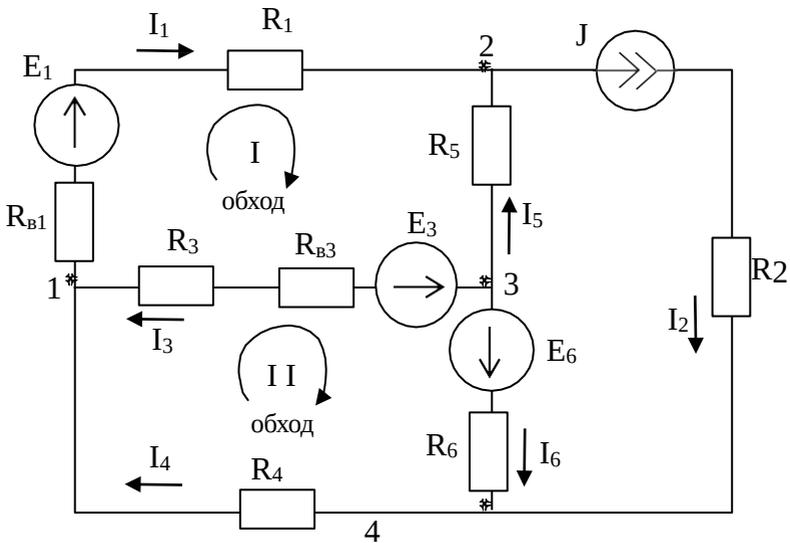


Рис. 1.18

Схема содержит шесть ветвей: одна из ветвей содержит идеальный источник тока и поэтому ток в этой ветви равен току источника  $I_2=J$ , в остальных пяти ветвях токи неизвестны. Так как в схеме четыре узла, то по первому закону Кирхгофа составляем три уравнения, то есть на одно меньше, чем количество узлов. Недостающие два уравнения составляем по второму закону Кирхгофа для двух элементарных контуров. Контур выбирается таким образом, чтобы ветвь с источником тока, то есть с известным током, ни в один контур не входила.

Направления обходов контуров выбираются произвольно и показаны на рис. 1.18.

Узел 1:	$I_1$	$I_3$	$I_4$	
Узел 2:				$0,$
Узел 3:	$I_1$	$I_2$	$I_5$	
				$0,$

## Потенциальная диаграмма

Потенциальная диаграмма представляет собой график распределения потенциала вдоль какого-либо участка цепи или замкнутого контура.

При построении потенциальной диаграммы один из узлов схемы принимается в качестве опорного и потенциал этого узла считают равным нулю. Сообщить опорному узлу нулевой потенциал можно, заземлив этот узел, при этом токораспределение в схеме не изменится. Относительно опорного узла просчитываются потенциалы других точек схемы и в прямоугольной системе координат строится потенциальная диаграмма.

По оси абсцисс в выбранном масштабе сопротивлений  $mR$  откладывают сопротивления в том порядке, в каком они встречаются при обходе цепи. По оси ординат в выбранном масштабе для потенциалов  $m\phi$  откладываются значения рассчитанных потенциалов.

Рассмотрим построение потенциальной диаграммы для первого контура электрической схемы, представленной на рис. 1.18, содержащего два источника ЭДС  $E_1$  и  $E_3$  с внутренними сопротивлениями  $R_{B1}$  и  $R_{B3}$ . Схема рассматриваемого контура представлена на рис. 1.19.

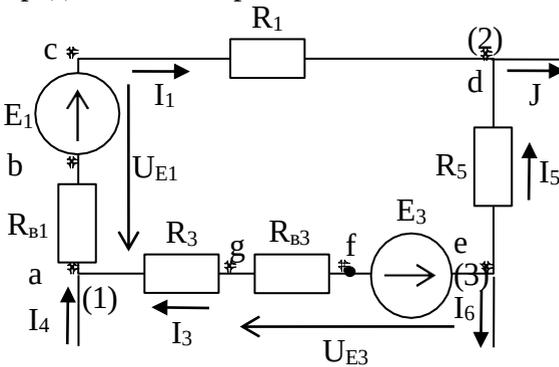


Рис. 1.19

Укажем в контуре точки таким образом, чтобы между двумя соседними был включен только один элемент.

Между точками **a-c** и точками **e-g** включены реальные источники ЭДС с внутренним сопротивлением, представленные на схеме в виде последовательного соединения идеального источника ЭДС и его внутреннего сопротивления.

Примем потенциал точки **a** равным нулю ( $\varphi_a=0$ ). Потенциал точки **b** больше потенциала точки **a** на величину ЭДС  $E_1$ , так как распределение потенциалов на зажимах источника ЭДС не зависит от тока, протекающего через него, и ЭДС всегда направлена в сторону большего потенциала:  $\varphi_b = \varphi_a + E_1$ .

Потенциал точки **c** по отношению к потенциалу точки **b** меньше на величину напряжения на внутреннем сопротивлении источника ЭДС  $R_{в1}$ , так как ток через него протекает от точки **b** к точке **c**:  $\varphi_c = \varphi_b - R_{в1}I_1$ .

Потенциал точки **d** по сравнению с потенциалом точки **c** уменьшается на величину напряжения на сопротивлении  $R_1$ , так как ток на этом участке протекает от точки **c** к точке **d**:

$$\varphi_d = \varphi_c - R_1I_1.$$

Аналогично рассчитываем потенциалы остальных точек контура:  $\varphi_e = \varphi_d + R_5I_5$ ,  $\varphi_f = \varphi_e + E_3$ ,  $\varphi_g = \varphi_e - R_{в3}I_3$ .

Необходимо заметить, что при правильном расчете токов в схеме потенциал точки **a** должен получиться равным нулю:

$$\varphi_a = \varphi_g - R_3I_3 = 0.$$

На рис. 1.20 показана потенциальная диаграмма для рассматриваемого контура. Пользуясь потенциальной диаграммой, можно определить напряжение между двумя любыми точками схемы.

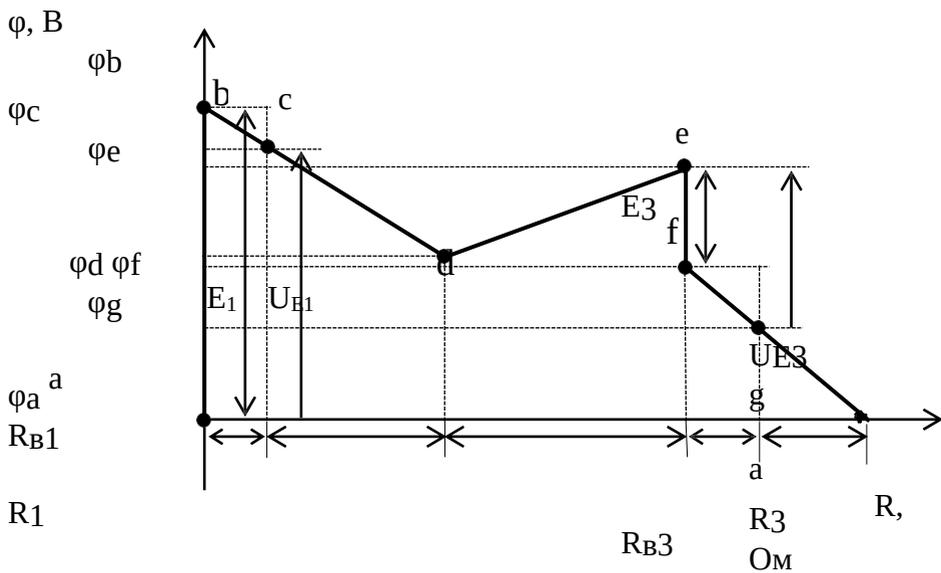


Рис. 1.20

Как видно на потенциальной диаграмме, напряжение на зажимах источника ЭДС  $E_1$  меньше значения его ЭДС на величину напряжения на внутреннем сопротивлении  $R_{в1}$ :

$$U_{E1} = E_1 - R_{в1}I_1.$$

Такой источник работает в режиме генератора, при этом направление ЭДС и тока ветви, в которую включен источник, совпадают.

Напряжение на зажимах источника ЭДС  $E_3$  больше значения его ЭДС на величину напряжения на внутреннем сопротивлении  $R_{в3}$ :

$$U_{E3} = E_3 + R_{в3}I_3.$$

Такой источник работает в режиме потребителя, и в этом случае направление его ЭДС и тока противоположные.

### Баланс мощностей

Баланс мощностей является следствием закона сохранения энергии и формулируется следующим образом:

$$\sum_{k=1}^n P_{ист k} = \sum_{k=1}^n P_{пр k},$$

$$\sum_{k=1}^n P_{ист k} = \sum_{k=1}^n P_{пр k},$$

$$\sum_{k=1}^n P_{ист k} = \sum_{k=1}^n P_{пр k},$$

где  $P_{ист k}$  - мощность, генерируемая источниками электрической энергии,

$P_{пр k}$  - мощность, потребляемая приемниками.

$$P_{ист k} = E_k I_k - \text{мощность, генерируемая источниками ЭДС;}$$

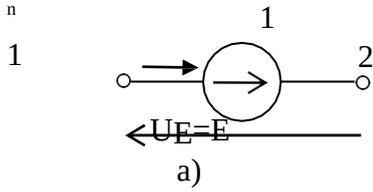
$$P_{пр k} = U_k I_k - \text{мощность, потребляемая приемниками.}$$

$$\sum_{k=1}^n P_{ист k} = \sum_{k=1}^n P_{пр k}$$

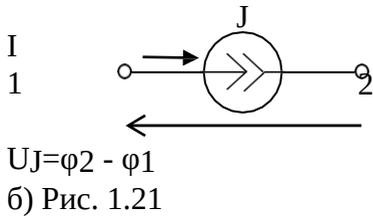
$$\sum_{k=1}^n P_{ист k} = \sum_{k=1}^n P_{пр k} - \text{мощность, генерируемая источниками ЭДС;}$$

$$\sum_{k=1}^n P_{ист k} = \sum_{k=1}^n P_{пр k} - \text{мощность, потребляемая приемниками.}$$

$R_k$  - мощность,  $I^2 R_k$  - мощность, рассеиваемая в сопротивлениях, она всегда положительна.



Мощность источников энергии может быть как положительной, так и отрицательной. Для идеального источника ЭДС (рис. 1.21, а) мощность



$P_E = EI$  положительна, если направления ЭДС источника  $E$  и тока ветви  $I$  совпадают, то есть источник работает в режиме генератора. В противном случае мощность отрицательна, то есть источник работает в режиме потребления энергии.

Для источника тока (рис. 1.21, б) мощность определяется  $P_J = U_J \cdot J = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot J$ .  
 Выполнение баланса мощностей является одним из критериев правильности расчета электрической схемы исследуемой цепи.

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В работе исследуется электрическая цепь, содержащая два источника ЭДС, схема которой приведена на рис. 1.22.

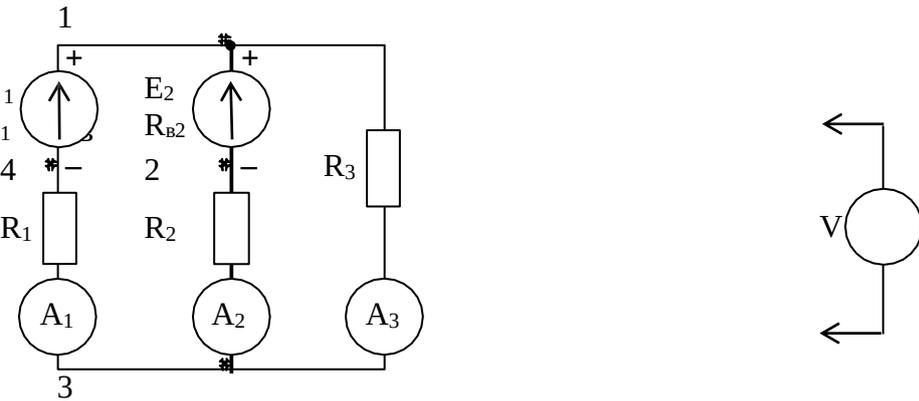


Рис. 1.22

Измерительные приборы: стендовый вольтметр М 903; амперметры Э59 0,25÷1,0 А – 3 шт.

Источники энергии и резисторы установлены в блоках лабораторного стенда. Номиналы сопротивлений  $R_1 \div R_3$  согласно варианту указаны в табл. 1.1.

### Задание.

Для электрической схемы, соответствующей номеру варианта и изображённой на рис. 1.1 – 1.20, выполнить следующее:

1. Упростить схему, заменив последовательно и параллельно соединённые резисторы четвёртой и шестой ветвей эквивалентными. Дальнейший расчёт (п. 2 – 6) вести для упрощённой схемы.
2. Составить на основании законов Кирхгофа систему уравнений для расчёта токов во всех ветвях схемы.
3. Определить токи во всех ветвях схемы методом контурных токов.
4. Определить токи во всех ветвях схемы методом узловых напряжений.
5. Результаты расчёта токов, проведённого двумя методами, свести в таблицу и сравнить между собой.
6. Составить баланс мощностей в исходной схеме, вычислив суммарную мощность источников и суммарную мощность нагрузок (сопротивлений).

Значения сопротивлений, ЭДС и токов источников тока для каждого варианта даны в табл. 1.1.

**Указания:** Для студентов, фамилии которых начинаются с букв А – Е, за нулевой потенциал принять потенциал узла  $a$ ; с букв Ж – М – потенциал узла  $b$ ; с букв Н – Т – потенциал узла  $c$ ; с букв У – Я – потенциал узла  $d$ .

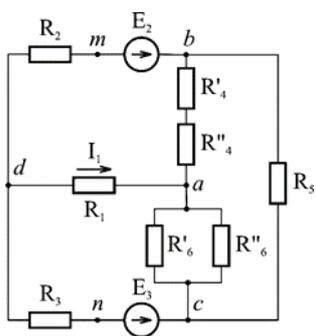


Рис.1.1

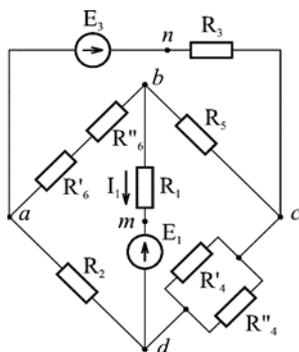


Рис. 1.2

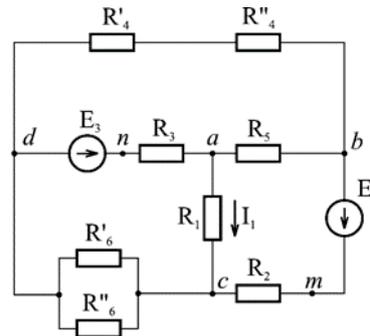


Рис.1.3

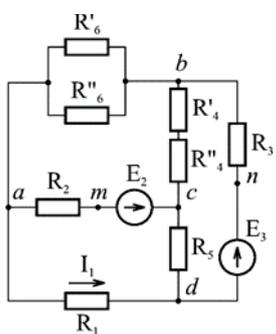


Рис.1.4

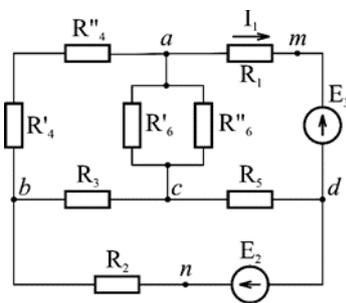


Рис. 1.5

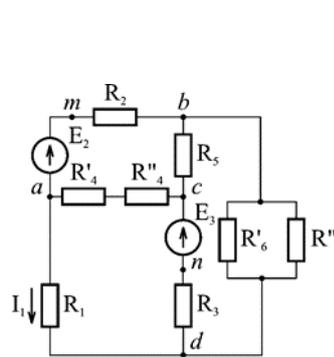


Рис.1.6

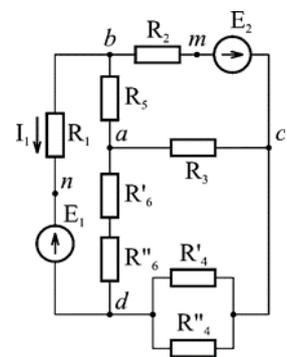


Рис. 1.7

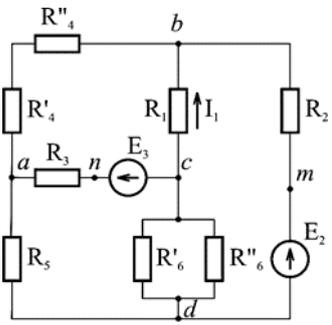


Рис.1.8

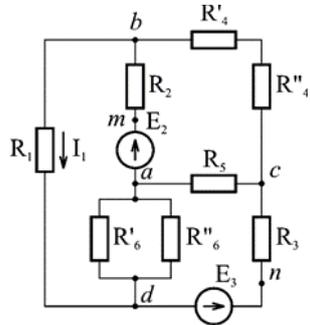


Рис. 1.9

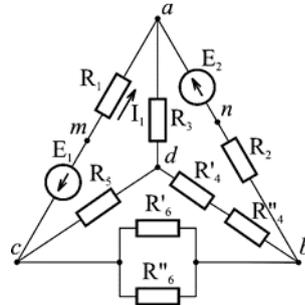


Рис.1.10

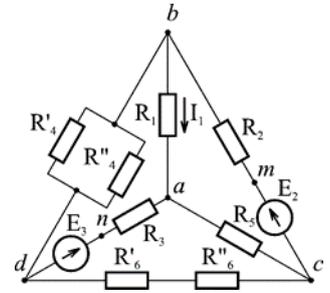


Рис. 1.11

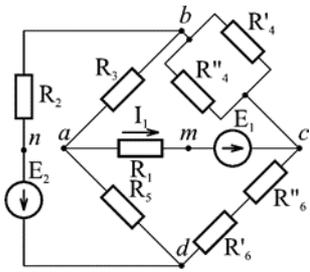


Рис.1.12

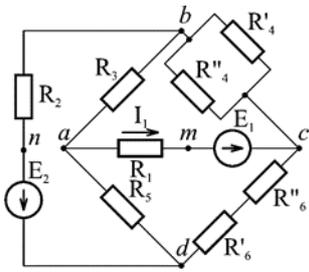


Рис. 1.13

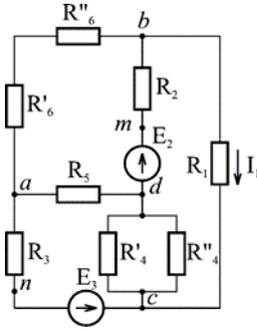


Рис.1.14

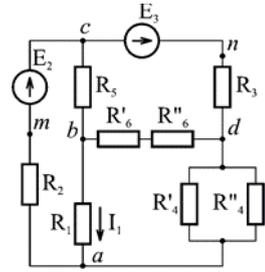


Рис. 1.15

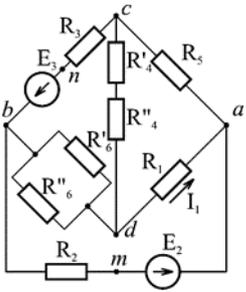


Рис.1.16

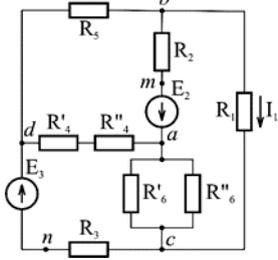


Рис. 1.17

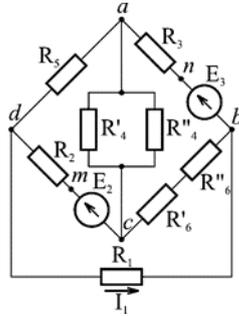


Рис.1.18

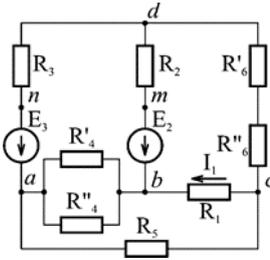


Рис. 1.19

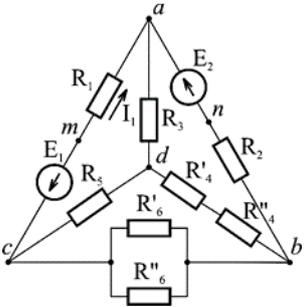


Рис. 1.20

Задание 2. Линейные электрические цепи синусоидального тока.

Для электрической схемы, соответствующей номеру варианта (табл. 1.2) и изображенной на рис. 1.21 – 1.40, выполнить следующее:

1. На основании законов Кирхгофа составить в общем виде систему уравнений для расчёта токов во всех ветвях цепи, записав её в двух формах: а) дифференциальной; б) символической.
2. Определить комплексы действующих токов во всех ветвях, воспользовавшись одним из методов расчёта линейных электрических цепей.

При выполнении п. 2 учесть, что одна или две ЭДС в табл. 1.2 могут быть заданы синусоидой (не косинусоидой). Данные каждого варианта приведены в двух строках табл. 1.2. Чтобы правильно записать её в виде комплексного числа, сначала надо от синусоиды перейти к косинусоиде.

3. По результатам, полученным в п. 2, определить показание ваттметра.

Таблица 1.1

Вариант	Рисунок	R1	R2	R3	R4	R4	R5	R6	R6	E1	E2	E3
		Ом								В		
1	1.15	19,5	7,5	13,5	21	21	15	4	2	–	21	45
2	1.1	19,5	7,5	3	1	11	16,5	30	90	–	24	30
3	1.16	6	7,51	9	10	5	19,5	16	240	–	69	22,5
4	1.11	30	2	150	210	70	225	12	48	–	210	375
5	1.17	15	120	7,5	14	1	12	13,5	27	–	43,5	52,5
6	1.3	6	19,5	13,5	10	5	7,5	36	12	–	31,8	15
7	1.7	19,5	60	90	150	600	165	40	27,5	25,8	37,5	–
8	1.20	9	7,5	12	22,5	315	10,5	0	12	–	45	33
9	1.8	82,5	120	150	20	40	105	504	280	–	49,5	22,5
10	1.10	16,5	90	67,5	25	200	120	100	300 <sub>51</sub>	54	21	–
11	1.9	10,5	18	6	10	3,5	22,5	15	60	–	48	15
12	1.18	45	60	33	60	20	21	50	25	–	52,5	22,5
13	1.12	22,5	18	15	13,5	15	12	5,5	5	24	30	–
14	1.4	18	52,5	33	6	3	15	90	30	–	51	18
15	1.13	6	10,5	15	11	7	30	16,5	16,5	–	51	30
16	1.5	6	16,5	7,5	6	12	10,5	36	18	49,5	15	–
17	1.14	13,5	30	24	90	180	45	12	21	–	75	27
18	1.6	7,5	15	18	5	5,5	12	24	360	–	30	37,5

19	1.1 9	7,5	10, 5	15	5	1	22, 5	42	10 5	3 0	–	45
20	1.2	12	15	9	36	60	31, 5	31	8	4 9, 5	–	30
21	1.1 5	6,5	2,5	4,5	3,5		5	1	1	–	6	15
22	1.1	6,5	2,5	1	4	0	5,5	10	30	–	7	10
23	1.1 6	2	4	3	2	3	6,5	7	17, 5	–	19	7,5
24	1.1 1	10	40	50	14 0	20	75	15	5	–	66	12 5
25	1.1 7	5	9	2,5	3	2	4	9	4,5	–	11, 5	17, 5

### Лабораторная работа №2 А

#### «Исследование последовательного и параллельного включения элементов в электрической цепи»

**Цель:** Экспериментальным путем проверить результаты расчета простой электрической цепи

#### Задание

1. В программной среде Multisim или другом ПО (модулирования электрических схем) собрать установку по схеме расчета простой цепи постоянного тока, включив в каждую ветвь амперметр и вольтметр для измерения токов.
2. Включить режим симуляции и снять показания амперметров.
3. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу

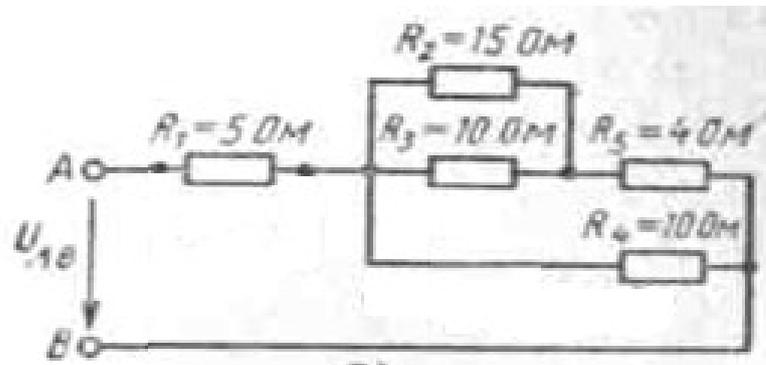
Резистор	Результаты расчета		Результаты измерения	
	Ток, А	Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В
R1				
R2				
R3				
R4				
R5			52	
R6				

#### 4. Содержание отчета

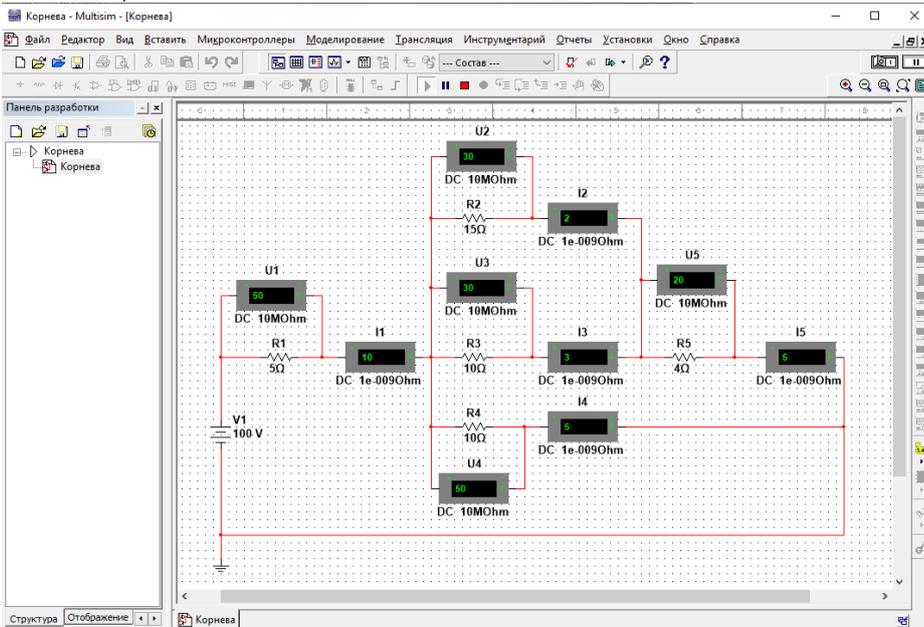
1. Тема, цель.
2. Схема исследований (скрин под своей фамилией) (с результатами измерений).
4. Таблица с опытными и расчетными данными.
5. Выводы по работе.

#### Пример

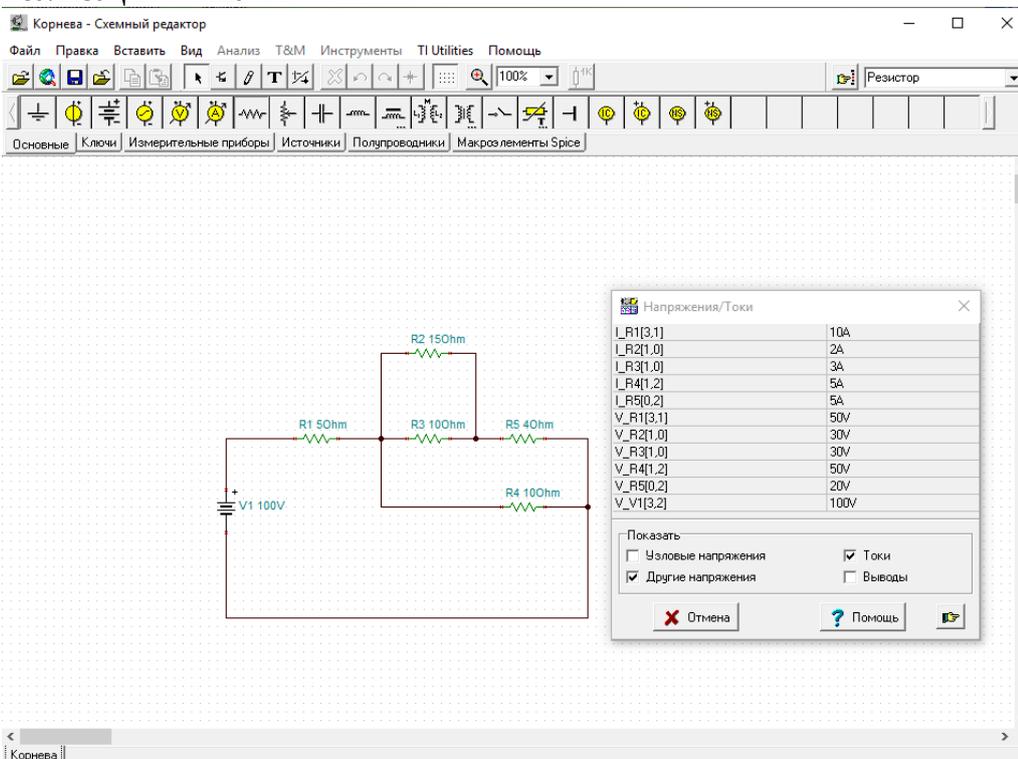
Исходная схема



## Реализация в Multisim



## Реализация в Tina-TI



## Лабораторная работа 2Б

Тема: Исследование линейной электрической цепи

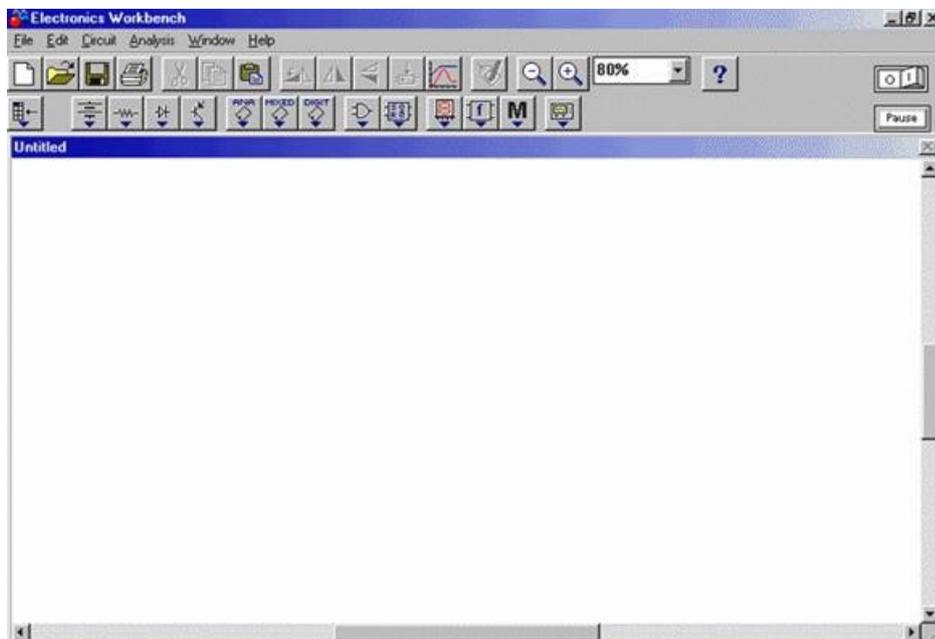
**Цель занятия:** Анализ вольтамперных характеристик резистивных элементов электрической цепи, определение их параметров.

**Продолжительность занятия** – 2 часа.

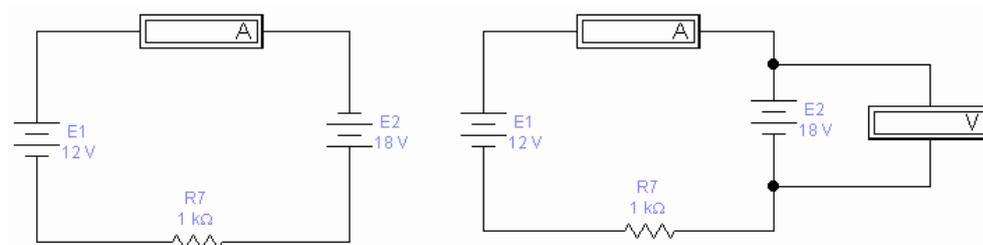
**Задание:**

**Задание на выполнение лабораторной работы**

**1.1** Приступая к выполнению данной лабораторной работы необходимо запустить программу ELECTRONICS WORKBENCH. После запуска она будет выглядеть следующим образом



**1.2.** Для работы необходимо загрузить схему исследования. При нажатии кнопки  открывается окно, в котором курсором необходимо пометить файл " **Согласное включение.ewb** " и нажать кнопку " **Открыть** ". Появится схема, имеющая следующий вид:



**1.3.** Чтобы схема начала функционировать, необходимо нажать кнопку в верхнем правом углу. 

**Порядок выполнения работы**

**2.1.** Используя универсальный вольтметр программной оболочки необходимо измерить напряжение на E1; E2; R<sub>н</sub> ток.

**2.2.** Затем необходимо загрузить вторую схему исследования с именем файла " **Встречное включение.ewb** "

**2.3.** В открывшейся схеме также необходимо измерить напряжение на E1, E2 и R<sub>н</sub> ток.

**Данные измерений по пункту 2.1.и 2.2 занести в таблицу**

Проведите расчет данных таблицы 1. Данные расчета занесите в таблицу

1)  $U_0 = E - U$  (генератор)

2)  $U_0 = U - E$  (потребитель)

3)  $P = I_{(опыта)} * R(U)$ ;

$$4) r_0 = \frac{U_0}{I_{(\text{источник})}};$$

$$5) I_{(\text{расчетн})} = \frac{E_1 + -E_2}{r_{01} + r_{02} + r_n};$$

$$6) P_H = U_H * I$$

$$7) P_0 = U_0 * I \quad 8) h = \frac{P_n}{P_{1+} + P_2}$$

таблица 1

	ОПЫТНЫЕ ДАННЫЕ										РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ										
Соединение Источник ов	E 1 В	U 1 В	E 2 В	U 2 В	U <sub>H</sub> В	I <sub>H</sub> м А	r <sub>H</sub> м	r <sub>к0</sub> О м	r <sub>01</sub> О м	U <sub>01</sub> В	U <sub>02</sub> В	I <sub>01</sub> О м	I <sub>02</sub> О м	I <sub>М</sub> А	U <sub>H</sub> В Т	P <sub>1</sub> В Т	P <sub>2</sub> В Т	P <sub>01</sub> В Т	P <sub>02</sub> В Т	P <sub>H</sub> В Т	h
Согласно е включени е																					
Встречно е включени е																					

### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы исследования. Таблица.
3. Расчетные формулы, расчет встречного и согласного включения источников ЭДС.
4. Краткие выводы по работе.

### Лабораторная работа<sup>55</sup> 2В

Тема: Исследование последовательного включения элементов в электрической цепи

**Цель занятия:** Определение распределения тока и напряжения при последовательном и параллельном включении резистивных элементов электрической цепи.

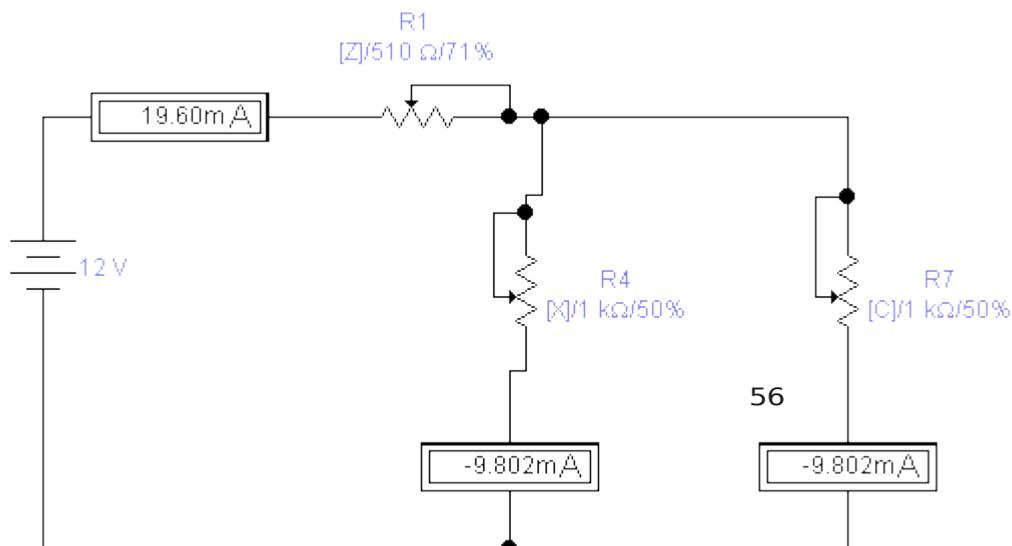
**Продолжительность занятия** – 2 часа.

#### Задание:

**1.1.** Приступая к выполнению данной лабораторной работы необходимо запустить программу ELECTRONICS WORKBENCH. После запуска она будет выглядеть следующим образом



1.2. Для работы необходимо загрузить схему исследования. При нажатии кнопки  открывается окно, в котором курсором необходимо пометить файл " **Смешанное соединение сопротивлений. ewb** " и нажать кнопку " **Открыть** ". Появится схема, имеющая следующий вид:



1.3. Чтобы схема начала функционировать, необходимо нажать кнопку в верхнем правом углу. 

### Порядок выполнения работы

2.1. Опыт 1: Включить источники постоянного тока и произвести измерения токов  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  и напряжений, результаты опыта записать в таблицу 3.а

ТАБЛИЦА 3

ОПЫТЫ	Измеренные Величины									
	U В	$r_0$ Ом	R1 кОм	R4 кОм	R7 кОм	I <sub>1</sub> mA	I <sub>2</sub> mA	I <sub>3</sub> mA	U <sub>1</sub> В	U <sub>AB</sub> В
1			1	1	1					
2			1	2	1					
3			0, 51	2	1					
	Расчетные величины									

### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы исследования. Таблица.
3. Расчет по схеме.
4. Краткие выводы по работе.

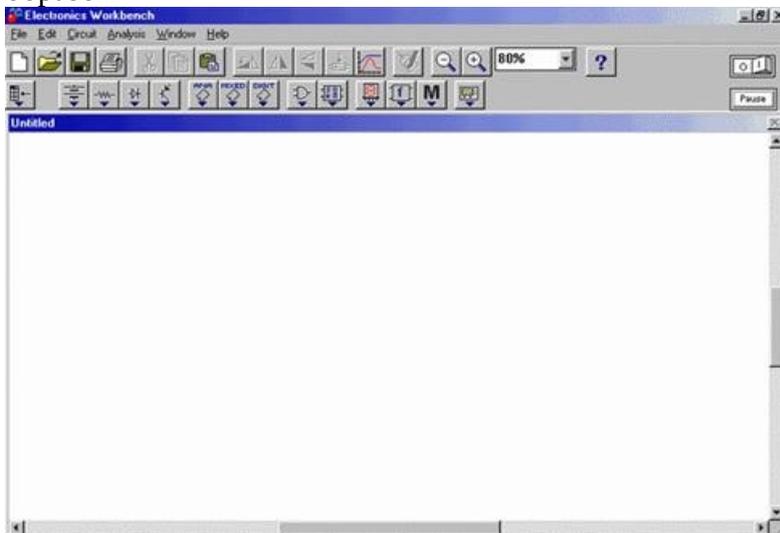
### Лабораторная работа 2Г

**Тема: Исследование параллельного включения элементов в электрической цепи.**

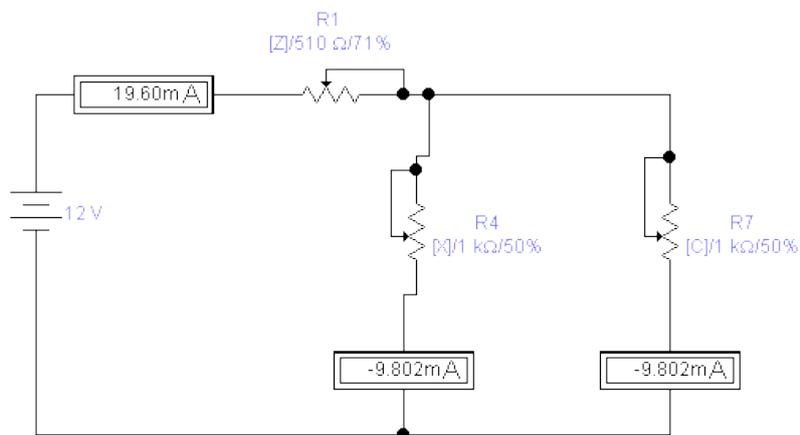
**Цель занятия:** Определение распределения тока и напряжения при последовательном и параллельном включении резистивных элементов электрической цепи.

**Продолжительность занятия** – 2 часа.

**Задание: 1.1.** Приступая к выполнению данной лабораторной работы необходимо запустить программу ELECTRONICS WORKBENCH. После запуска она будет выглядеть следующим образом



**1.2.** Для работы необходимо загрузить схему исследования. При нажатии кнопки  открывается окно, в котором курсором необходимо пометить файл " **Смешанное соединение сопротивлений.ewb** " и нажать кнопку " **Открыть** ". Появится схема, имеющая следующий вид:



1.3. Чтобы схема начала функционировать, необходимо нажать кнопку в верхнем правом углу.

### Порядок выполнения работы

2.1. Опыт 1: Включить источники постоянного тока и произвести измерения токов  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  и напряжений, результаты опыта записать в таблицу 3.

[sigma.ru](http://sigma.ru)

Реклама

2.2. Опыт 2: Измените значения сопротивлений эл. цепи согласно значениям таблицы 3, и повторите опыт п. 2.1.

2.3. Опыт 3: Измените значения сопротивлений эл. цепи согласно значениям таблицы 3, и повторите опыт п. 2.1.

### ТАБЛИЦА 3

ОПЫТЫ	Измеренные Величины									
	U В	$r_0$ Ом	R1 кОм	R4 кОм	R7 кОм	$I_1$ мА	$I_2$ мА	$I_3$ мА	$U_1$ В	$U_{AB}$ В
1			1	1	1					
2			1	2	1					
3			0, 51	2	1					
Расчетные величины							58			

### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы исследования. Таблица.
3. Расчет по схеме.
4. Краткие выводы по работе.

## Лабораторная работа № 3

### «Исследование на ЭВМ резонансных явлений в пассивном и активном последовательном колебательном контуре»

#### 1.Задание

##### Цель лабораторной работы

С помощью программы Micro-Cap исследовать характеристики одиночного последовательного пассивного и активного колебательного контура при различных добротностях

##### Задание на лабораторную работу

Рассчитать величину индуктивности  $L$ , выбрав из заданного интервала величину ёмкости  $C \in [10; 40]$  нФ так, чтобы резонансная частота пассивного последовательного колебательного контура (рисунок 1) была  $f_0=4,8$  кГц.

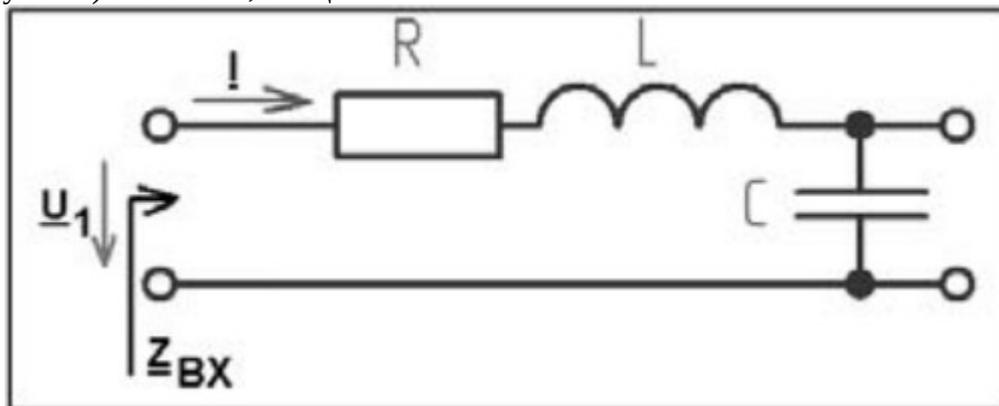


Рисунок 1 – Пассивный колебательный контур

Рассчитать следующие параметры последовательного контура ( $U_1=1$  В):

- $\rho$  — характеристическое сопротивление;
- $Q$  — добротность;
- $f_1$  — нижнюю граничную частоту;
- $f_2$  — верхнюю граничную частоту;
- $\Pi$  — абсолютную полосу пропускания;
- $I_0$  — модуль входного тока при резонансе.

Расчеты провести для двух значений сопротивления:  $R=160$  и  $640$  Ом.

Полученные данные записать в таблицу 1.

На одном графике построить три зависимости входного сопротивления от частоты  $f \in [2; 8]$  кГц,  $R=160$  Ом:

- модуля входного сопротивления  $|Z_{BX}(f)|$ ;
- действительной части входного сопротивления  $\text{Re}[Z_{BX}(f)]$ ;
- мнимой части входного сопротивления  $\text{Im}[Z_{BX}(f)]$ .

На другом графике повторить эти построения для  $R=640$  Ом.

Построить график зависимости фазы входного сопротивления  $\phi_{Z_{BX}}(f)=\arg[Z_{BX}(f)]$  от частоты  $f \in [2; 8]$  кГц.

Построения провести на одном графике для двух значений сопротивления  $R=160$  и  $640$  Ом.

Построить график резонансной кривой, т.е. зависимость модуля входного тока  $|I(f)|$  последовательного контура от частоты  $f \in [2; 8]$  кГц. 59

Построения провести на одном графике для двух значений сопротивления  $R=160$  и  $640$  Ом.

Рассчитать значение ёмкости  $C_1$  так, чтобы резонансная частота активного последовательного колебательного контура с гиратором в качестве индуктивности (рисунок 2) равнялась  $f_0=5$  кГц. Принять  $R=0,1$  Ом,  $C_2=1$  мкФ и  $G=0,1$  См.

Полученные данные записать в таблицу 1.

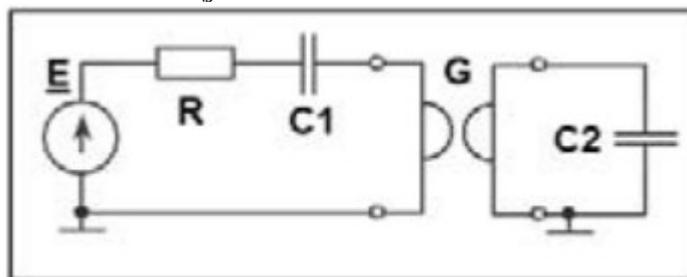


Рисунок 2 – Активный колебательный контур с гиратором в качестве индуктивности

## 2.Ход выполнения лабораторной работы

### 2.1 Предварительный расчет

Формулы для расчёта:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{U_1}{I} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$$

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega(0)C} = 0$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 0$$

И так как  $\omega_0 = 2\pi f_0$ , , получим формулу:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ – резонансная частота контура}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ – характеристическое сопротивление}$$

$$Q = \sqrt{\frac{\rho}{R}} \text{ – добротность}$$

$$f_1 = \frac{f_0}{2Q} (\sqrt{1 + 4Q^2} - 1) \text{ – нижняя граничная частота}$$

$$f_2 = \frac{f_0}{2Q} (\sqrt{1 + 4Q^2} + 1) \text{ – верхняя граничная частота}$$

$\Pi = f_2 - f_1$  – абсолютная полоса пропускания

$$I_0 = \frac{U_1}{R} \text{ – модуль входного тока при резонансе}$$

$$I(\omega) = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \text{ – резонансная кривая тока при условии, что меняется только частота}$$

источника напряжения

Определение добротности по резонансной кривой (необходимые построения показаны на рисунке 3):

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

60

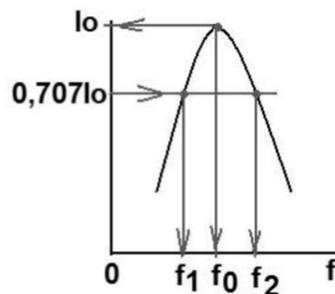


Рисунок 3

Гиратор:

Гиратором называется четырёхполюсник (см. рисунок 4), описываемый системой уравнений:

$$\begin{cases} I_1 = -GU_2 \\ I_2 = -GU_1, \end{cases}$$

где  $G$  – проводимость гиратора (коэффициент гирации)

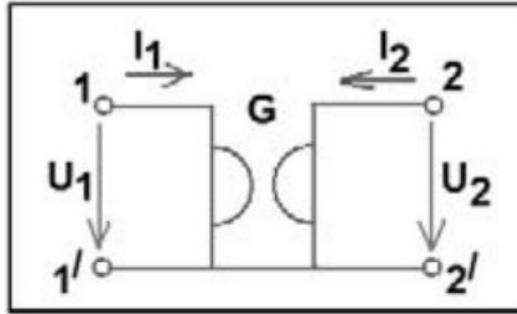


Рисунок 4

При подключении к выходу гиратора комплексного сопротивления  $Z_2$  (см. рисунок 5):

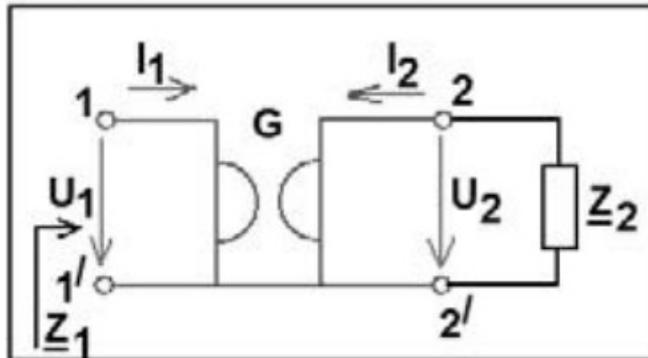


Рисунок 5

$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{-I_2}{G^2 U_2} = \frac{1}{G^2 Z_2}$  – входное сопротивление нагруженного гиратора, так как:

$$I_2 = \frac{-U_2}{Z_1}$$

При подключении к выходу гиратора конденсатора  $C_2$  (см. рисунок 6) выясняется, что с помощью гиратора, нагруженного на конденсатор, можно имитировать индуктивность.

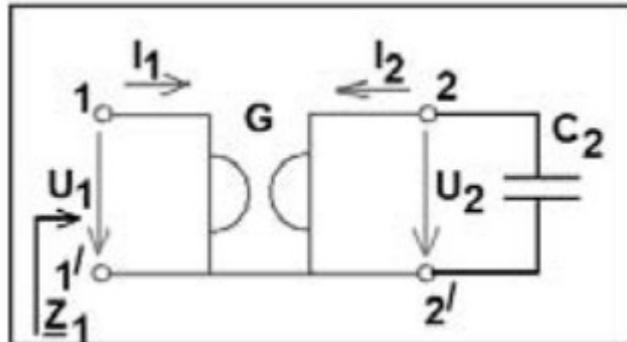


Рисунок 6

В этом случае:

$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}$  – выходное сопротивление

$$Z_1 = j\omega \frac{C_2}{G^2} = j\omega L,$$

где  $L = \frac{C_2}{G^2}$  – эквивалентная индуктивность

Модель последовательного колебательного контура с гиратором, имитирующим катушку индуктивности (см. рисунок 7):

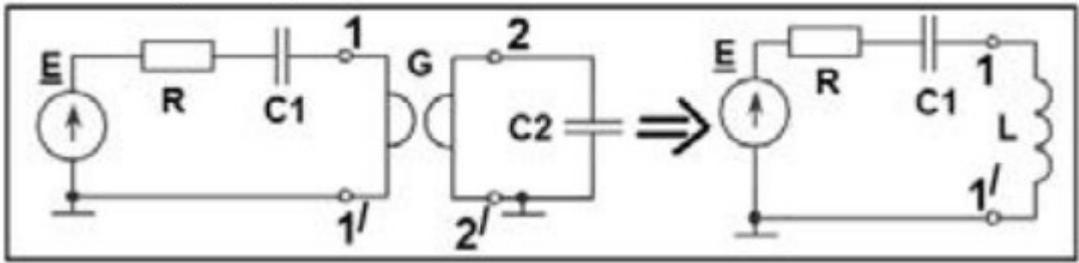


Рисунок 7

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} = \frac{G}{2\pi\sqrt{C_1 C_2}} - \text{резонансная частота данного контура}$$

Данные, полученные путём предварительного расчёта и экспериментально при  $U_1 = 1$  В,  $f_0 = 4,8$  кГц,  $C = 10$  нФ,  $L = 0,11$  Гн представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные, полученные путём предварительного расчёта и экспериментально.

По предварительному расчёту							Получено экспериментально						
R, Ом	$\rho_0$ , Ом	Q	$f_1$ , кГц	$f_2$ , кГц	$\Pi$ , кГц	$I_0$ , А	$f_0$ , кГц	$f_0$ , кГц	$I_0$ , А	$f_1$ , кГц	$f_2$ , кГц	$\Pi$ , кГц	Q
160	3316,62	4,553	4,302	5,356	1,05	0,00625	4,8	4,796	0,006	4,684	4,916	0,232	4,54
640	3316,62	2,276	3,860	5,969	2,11	0,001563	4,8	4,796	0,0015	4,358	5,285	0,927	2,27

Данные, полученные путём предварительного расчёта и экспериментально при  $U_1 = 1$  В,  $f_0 = 5$  кГц,  $C_2 = 1$  мкФ,  $G = 0,1$  см представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Гиратор. Данные, полученные путём предварительного расчёта и экспериментально

По предварительному расчёту		Экспериментально
R, Ом	$C_2$ , мкФ	$f_0$ , кГц
0,1	10,14	5

### Исследование характеристик пассивного колебательного контура

Схема пассивного колебательного контура представлена на рисунке 8.

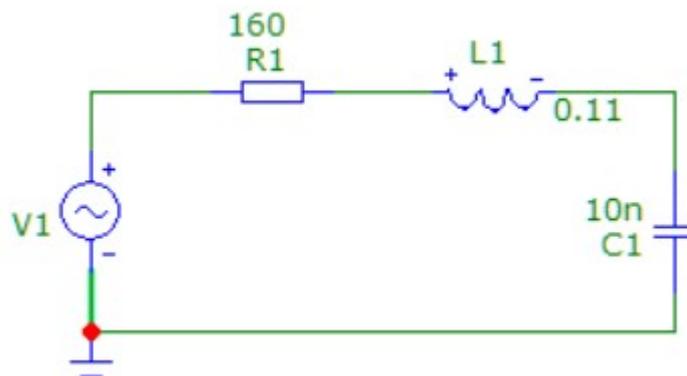


Рисунок 8 – Схема пассивного колебательного контура

На рисунке 9 представлены зависимости модулей входного сопротивления от частоты ( $R = 160$  Ом)

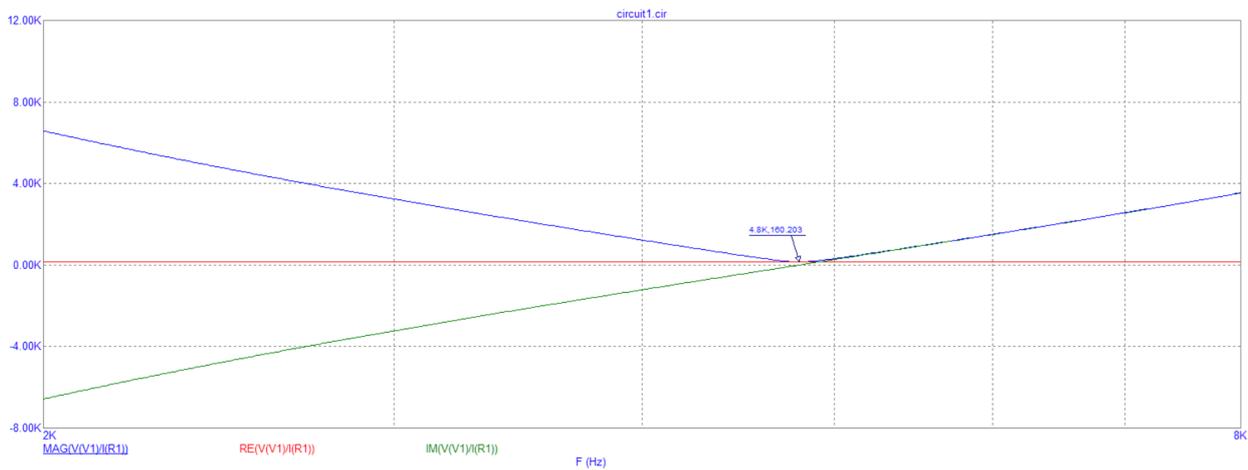


Рисунок 9 – Графики зависимостей модуля входного сопротивления от частоты ( $R = 160 \text{ Ohm}$ )  
 верх - полное входное сопротивление от частоты  
 середина - действительная часть  
 низ отрицательная

На рисунке 10 представлены зависимости модулей входного сопротивления от частоты ( $R = 640 \text{ Ohm}$ )

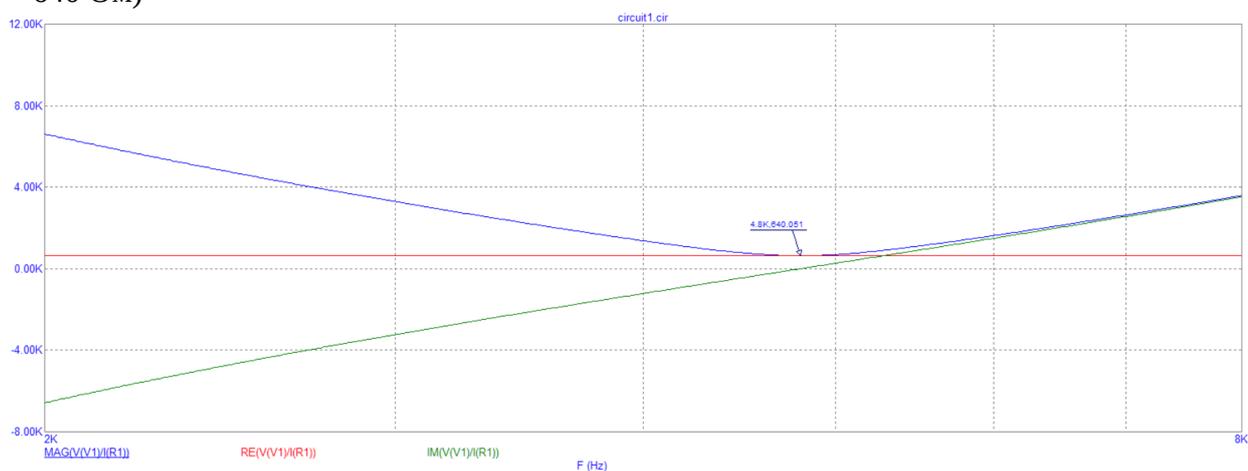


Рисунок 10 – Графики зависимости модулей входного сопротивления от частоты ( $R = 640 \text{ Ohm}$ )  
 (повысилась действ часть)

Синий график – входная АЧХ, красный – действительная часть входного сопротивления, зелёный – мнимая часть входного сопротивления.

На рисунке 11 представлен график зависимости фазы входного сопротивления от частоты

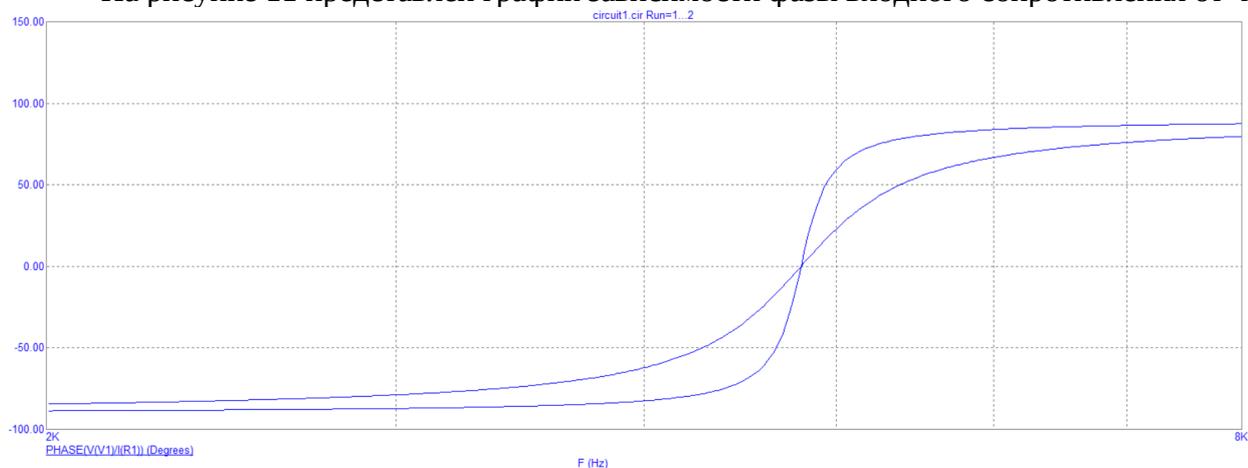


Рисунок 11 – График зависимости фазы входного сопротивления от частоты  
 Более крутая кривая образовалась при  $R_1 = 160 \text{ Ohm}$ , менее крутая при  $R_2 = 640$ .  
 Конденсатор еще не заряжен поэтому не имеет собственного сопротивления??

На рисунке 12 представлен график зависимости модуля входного тока от частоты.

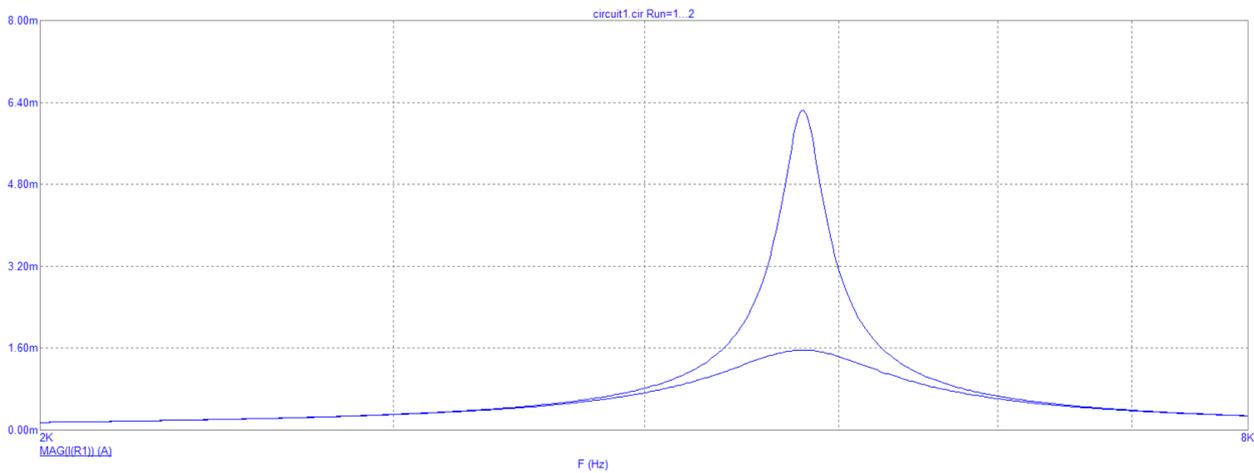


Рисунок 8 – График зависимости модуля входного тока от частоты

График с большей амплитудой образовался при  $R_1=160$  Ом, меньшей – при  $R_2=640$  Ом

$$I(\omega) = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

– резонансная кривая тока при условии, что меняется только частота

источника напряжения

На рисунке 13 представлен график зависимости модуля входного тока от частоты при изменении параметров индуктивности ( $L_1 = 0,11$  Гн и  $L_2 = 0,22$  Гн).

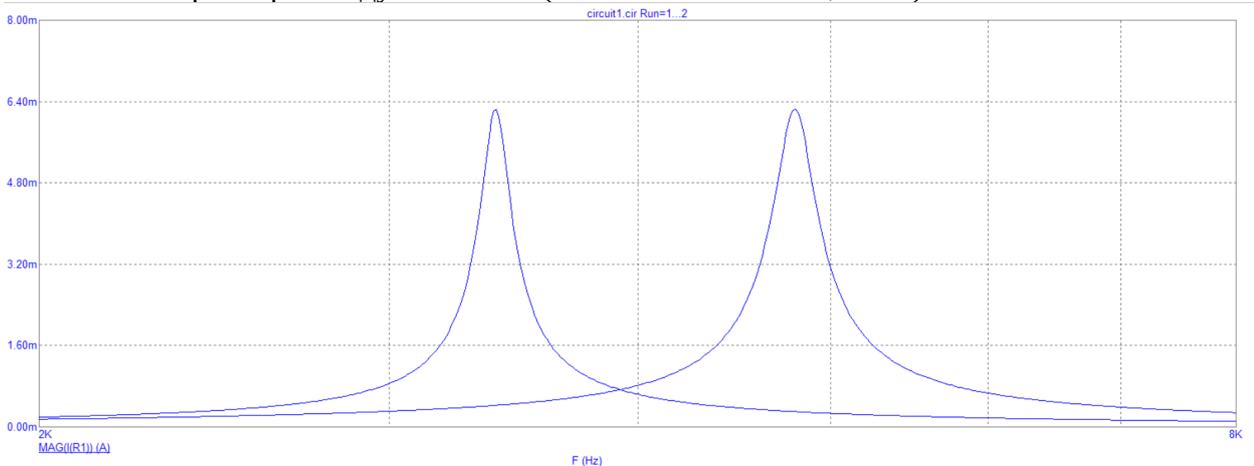


Рисунок 13 – График зависимости модуля входного тока от частоты при изменении параметров индуктивности.

График с амплитудой ближе по оси абсцисс к 0 образовался при  $L_2 = 0,22$  Гн, ближе по оси абсцисс к бесконечности – при  $L_1 = 0,11$  Гн.

у меня подозрение что это потому что кондер быстрее/медленнее заряжается но как это может зависеть от L16:33

На рисунке 14 представлен график зависимости модуля входного тока от частоты при изменении параметров емкости ( $C_1 = 10$ нФ и  $C_2 = 20$ нФ).

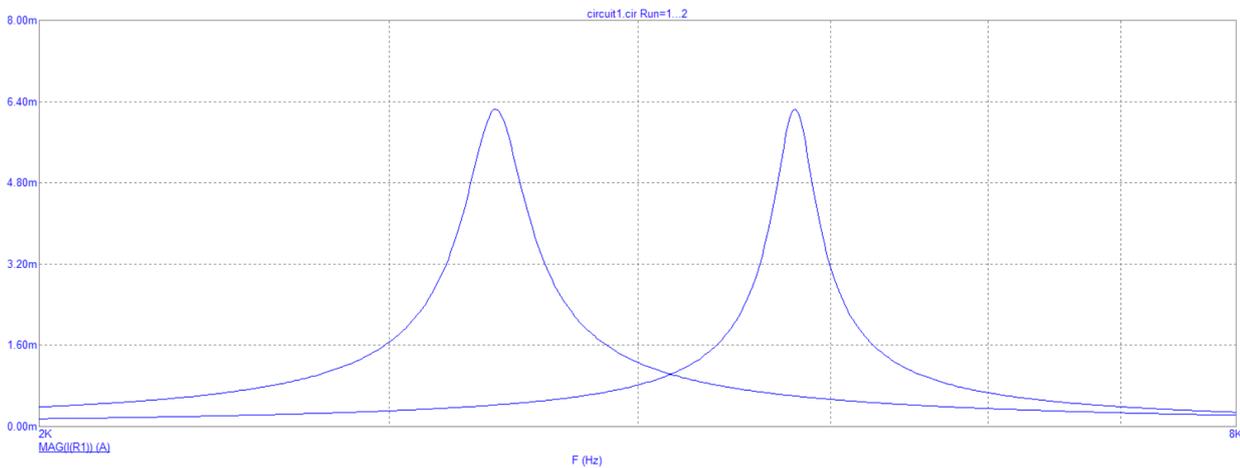


Рисунок 14 – График зависимости модуля входного тока от частоты при изменении параметров емкости.

График с амплитудой ближе по оси абсцисс к 0 образовался при  $C_2 = 20\text{нФ}$ , ближе по оси абсцисс к бесконечности – при  $C_1 = 10\text{нФ}$ .

### Исследование зависимости модуля входного тока от частоты в схеме с гиратором

Схема с гиратором представлена на рисунке 15

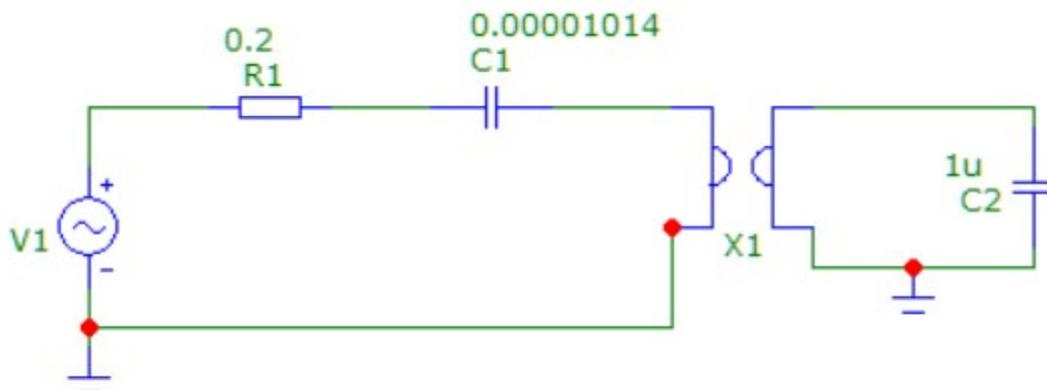


Рисунок 15 – Колебательный контур с гиратором

65

На рисунке 16 представлен график зависимости модуля тока от частоты в схеме с гиратором.

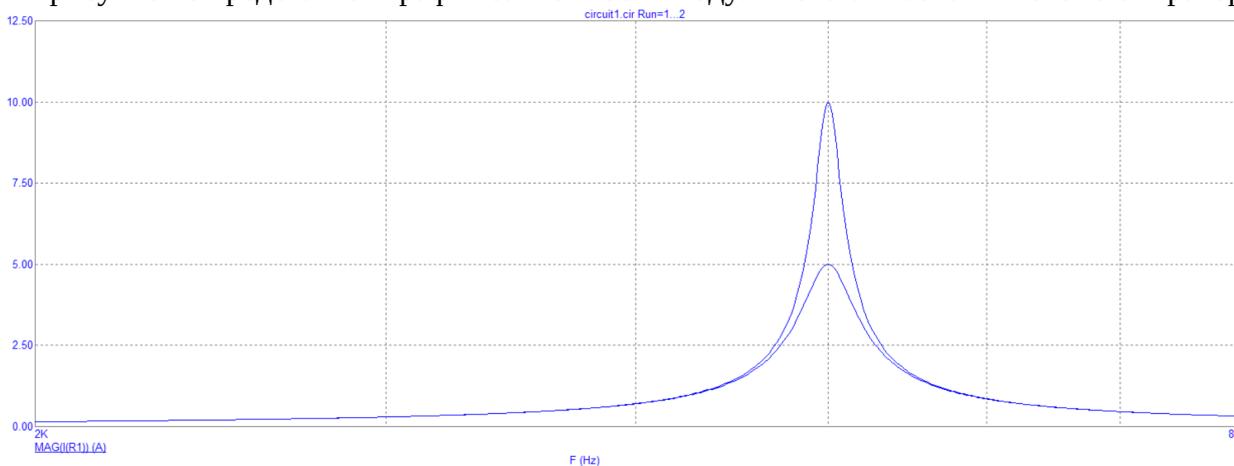


Рисунок 9 – Зависимость модуля тока от частоты в схеме с гиратором  
График с большей амплитудой образовался при  $R_1=0,1\text{ Ом}$ , меньшей – при  $R_2=0,2\text{ Ом}$

$$I(\omega) = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} - \text{резонансная кривая тока при условии, что меняется только частота}$$

источника напряжения

### 3. Вывод

С помощью программы Micro-Cap были исследованы характеристики одиночного последовательного контура при различных добротностях. Данные, полученные путём предварительного расчёта сошлись с экспериментальными.

### 4. Ответы на вопросы

**1) Почему резонанс в последовательном пассивном колебательном контуре называется резонансом напряжений?**

Отношение волнового сопротивления к резистивному  $r/R = Q$ , называется добротностью контура, а величина обратная  $D=1/Q$  – затуханием. Таким образом, добротность численно равна отношению напряжения на реактивном элементе контура к напряжению на резисторе или на входе в режиме резонанса. Добротность может составлять несколько десятков единиц и во столько же раз напряжение на реактивных элементах контура будет превышать входное.

На любой частоте, кроме резонансной, напряжения на индуктивности и емкости отличаются - они зависят от амплитуды тока в схеме и номиналами модулей реактивных сопротивлений  $X_L$  и  $X_C$ . Поэтому резонанс в последовательном колебательном контуре называют резонансом напряжений.

**2) Как рассчитывается резонансная частота сложного пассивного колебательного контура и как она рассчитывается для схем, содержащих гиратор?**

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}};$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} = \frac{G}{2\pi\sqrt{C_1 C_2}} \text{ (с гиратором)}$$

66

**3) Что такое добротность последовательного пассивного колебательного контура?**

Добротность последовательного колебательного контура – величина, определяющая амплитуду и ширину АЧХ резонанса и говорящая о том, во сколько раз сохраненной энергии в колебательном контуре больше, чем потери энергии за единичный период колебаний.

**4) Что такое полоса пропускания последовательного пассивного колебательного контура? Какие существуют способы расчета полосы пропускания?**

Полоса пропускания — диапазон частот, в пределах которого амплитудно-частотная характеристика акустического, радиотехнического, оптического или механического устройства достаточно равномерна для того, чтобы обеспечить передачу сигнала без существенного искажения его формы.

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} - \text{характеристическое сопротивление};$$

$$Q = \sqrt{\frac{\rho}{R}} - \text{добротность};$$

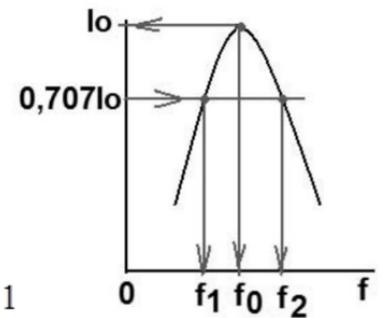
$$f_1 = \frac{f_0}{2Q} (\sqrt{1 + 4Q^2} - 1) \quad \text{– нижняя граничная частота;}$$

$$f_2 = \frac{f_0}{2Q} (\sqrt{1 + 4Q^2} + 1) \quad \text{– верхняя граничная частота;}$$

$\Pi = f_2 - f_1$  – абсолютная полоса пропускания.

**5) Выведите уравнения, с помощью которых рассчитывают входные АЧХ и ФЧХ последовательного пассивного колебательного контура.**

Зависимость тока в контуре или напряжения на реактивных элементах от частоты питающего генератора при постоянном по величине напряжении генератора называется резонансной кривой или амплитудно-частотной характеристикой контура:



$$A = \frac{|I_k|}{I_{\text{рез}}} = \frac{e_r}{|z|} \cdot \frac{e_r}{R} = \frac{R}{|z|} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_{\text{вх}}^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{X_{\text{вх}}^2}{R^2}}}$$

Реактивная составляющая

входного

сопротивления контура равна:

$$X_{\text{вх}} = \omega L - \frac{1}{\omega C} = \frac{\omega_0}{\omega} \omega L - \frac{\omega_0 L}{\omega_0 L} \cdot \frac{1}{\omega C} = \omega_0 L \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{1}{\omega_0 \omega LC} \right) = \omega_0 L \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) =$$

$$= \omega_0 L \frac{(\omega - \omega_0)(\omega + \omega_0)}{\omega \omega_0} \approx \omega_0 L \frac{2\omega * \Delta\omega}{\omega \omega_0} = \rho \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} = \rho \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$$

Здесь  $\frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$  – относительная расстройка контура.

При небольших абсолютных расстройках контура  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$  (в пределах полосы

пропускания)  $\omega + \omega_0 \approx 2\omega_0$

С учетом этого амплитудно-частотная характеристика контура

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{X_{\text{вх}}^2}{R^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{\rho * 2\Delta\omega}{R * \omega_0} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (Q\varepsilon)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}$$

$$\xi = Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \quad \text{– обобщенная расстройка контура}$$

Окончательно уравнение амплитудно-частотной характеристики контура запишется в виде:

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}$$

Фазовая характеристика контура

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_{\text{вх}}}{R} = \operatorname{arctg} \xi.$$

Из формулы для АЧХ контура найдем полосу пропускания:

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Отсюда полоса пропускания контура на уровне  $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,7$ . Будет равна:

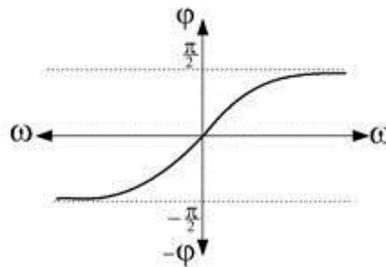
$$2\Delta\omega_{0,7} = \frac{\omega_0}{Q}.$$

Зная резонансную частоту и полосу пропускания, можно рассчитать добротность контура:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega_{0,7}}$$

Фазовая характеристика последовательного контура

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_{\text{вх}}}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$



68

#### Список использованных источников

- ГОСТ 7.32-2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. - URL: <https://files.stroyinf.ru/Index/655/65555.htm>

#### Лабораторная работа № 4

#### «Исследование на ЭВМ резонансных явлений в пассивном параллельном колебательном контуре»

#### 1.Задание

Цель лабораторной работы

С помощью программы Micro-Cap получить входные и передаточные характеристики одиночного параллельного колебательного контура при различных добротностях.

## Задание на лабораторную работу

Рассчитать величину индуктивности  $L$  выбрав из заданного интервала величину ёмкости  $C \in [10; 40]$  нФ так, чтобы резонансная частота пассивного параллельного колебательного контура (рис. 1)  $f_p = 5$  кГц.

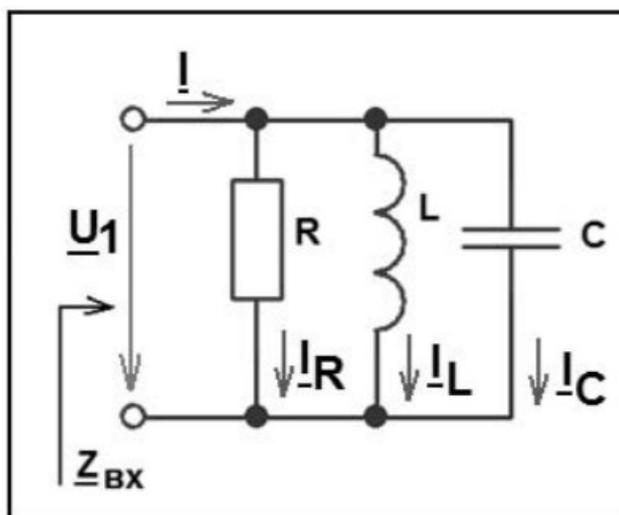


Рисунок 1 – Пассивный параллельный колебательный контур

Рассчитать следующие параметры простого пассивного параллельного контура ( $R=14$  кОм):

$\rho$  — характеристическое сопротивление;

$Q$  — добротность;

$f_1$  — нижнюю граничную частоту;

$f_2$  — верхнюю граничную частоту;

$\Pi$  — абсолютную полосу пропускания;

69

$Z(f_p)$  — модуль входного сопротивления при резонансе.

Полученные данные записать в таблицу 1.

Построить график зависимости модуля входного сопротивления  $|Z_{вх}(f)|$  от частоты  $f \in [2; 8]$  кГц.

Построить график зависимости фазы входного сопротивления  $\phi Z_{вх}(f) = \arg[Z_{вх}(f)]$  от частоты  $f \in [2; 8]$  кГц.

На одном графике построить четыре зависимости от частоты  $f \in [2; 8]$  кГц,  $U_1=1$  В:

- модуля входного тока  $|I(f)|$ ;
- модуля тока в резисторе  $|I_R(f)|$ ;
- модуля тока в катушке  $|I_L(f)|$ ;
- модуля тока в конденсаторе  $|I_C(f)|$ .

Рассчитать следующие параметры пассивного параллельного контура первого типа (рис. 2) для двух значений добротности  $Q_p=2$  и  $Q_p=100$  ( $L$  и  $C$  оставить прежними #3.1):

$R$  — сопротивление в ветви с катушкой индуктивности;

$f_{p1}$  — резонансную частоту контура первого типа;

$Z(f_{p1})$  — модуль входного сопротивления при резонансе.

Полученные данные записать в таблицу 2.

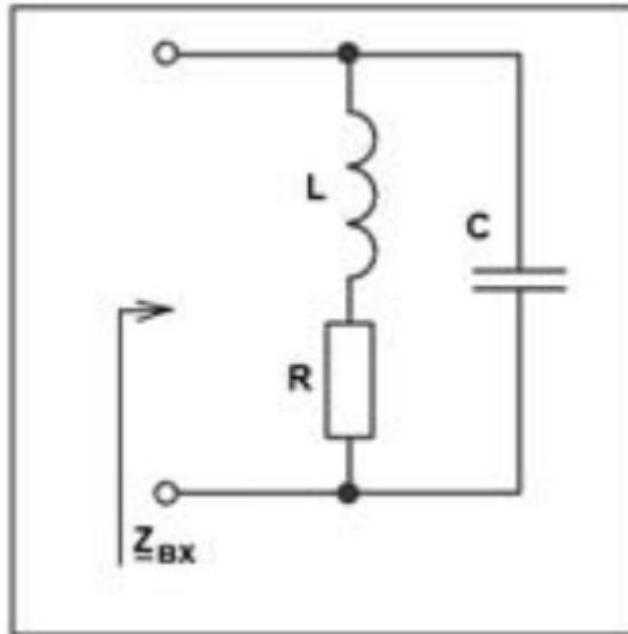


Рисунок 2 – Пассивный параллельный контур первого типа

Построить для двух значений добротности графики зависимости модуля входного сопротивления  $|Z_{вх}(f)|$  и фазы входного сопротивления  $\phi Z_{вх}(f) = \arg[Z_{вх}(f)]$  от частоты  $f \in [2; 8]$  кГц.

## 2.Ход выполнения лабораторной работы

### 2.1 Предварительный расчет

70

Формулы для расчёта:

$$\text{Im}(\underline{Y}_{вх}) = 0$$

$$\underline{Y}_{вх} = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \text{ – комплексная входная проводимость контура}$$

$$\text{Im}(\underline{Y}_{вх}) = \omega_p C - \frac{1}{\omega_p L} = 0$$

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\omega_p = 2\pi f_p$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ – резонансная частота}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ – характеристическое сопротивление}$$

$$Q = \frac{R}{\rho} = \frac{f_p}{\Pi} \text{ – добротность}$$

$$\omega_1 = \frac{-1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \text{ – нижняя граничная частота}$$

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \text{ – верхняя граничная частота}$$

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi}$$

$\Pi = f_2 - f_1$  – абсолютная полоса пропускания

$$Z_{\text{вх}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)} = Z(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \text{ – комплексное входное сопротивление}$$

$$Z(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \text{ – модуль входного сопротивления при условии, что меняется только частота источника напряжения}$$

71

$$\varphi(\omega) = \arctg\left[\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)R\right] \text{ – фаза входного сопротивления в градусах}$$

$$\underline{I} = \frac{U_1}{Z_{\text{вх}}}, \underline{I}_R = \frac{U_1}{R}, \underline{I}_L = \frac{U_1}{j\omega L}, \underline{I}_C = \frac{U_1}{\omega C} \text{ – комплексные токи}$$

$$Q = \frac{f_p}{f_2 - f_1} \text{ – добротность последовательного контура}$$

$$R = \frac{\rho}{Q_p} = \frac{\sqrt{L}}{Q_p C} \text{ – сопротивление}$$

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{R^2}{p^2}} \text{ – резонансная частота контура}$$

$$Z_{\text{вк}} = \frac{(R + j\omega L) \frac{-j}{\omega C}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \text{ – комплексное входное сопротивление}$$

$$Z(f_{p1}) = RQ^2 \text{ – модуль входного сопротивления при резонансе}$$

Таблица 1 – Данные, полученные путём предварительного расчёта и экспериментально.

По предварительному расчёту									Получено экспериментально						
R, Ом	ρ <sub>0</sub> , Ом	Q	f <sub>1</sub> , кГц	f <sub>2</sub> , кГц	П, кГц	I <sub>0</sub> , А	f <sub>0</sub> , кГц	f <sub>0</sub> , кГц	I <sub>0</sub> , А	f <sub>1</sub> , кГц	f <sub>2</sub> , кГц	П, кГц	Q		
160	3316,62	4,553	4,302	5,356	1,05	0,00625	4,8	4,796	0,006	4,684	4,916	0,232	4,54		
640	3316,62	2,276	3,860	5,969	2,11	0,001563	4,8	4,796	0,0015	4,358	5,285	0,927	2,27		

### Схема 1

Схема пассивного колебательного контура представлена на рисунке 3.

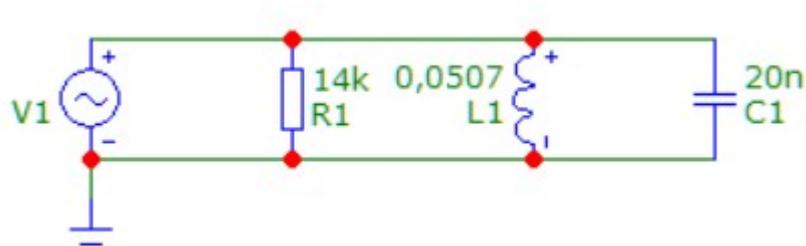


Рисунок 3 – Схема пассивного колебательного контура

Зависимость модуля входного сопротивления от частоты представлена на рисунке 4.

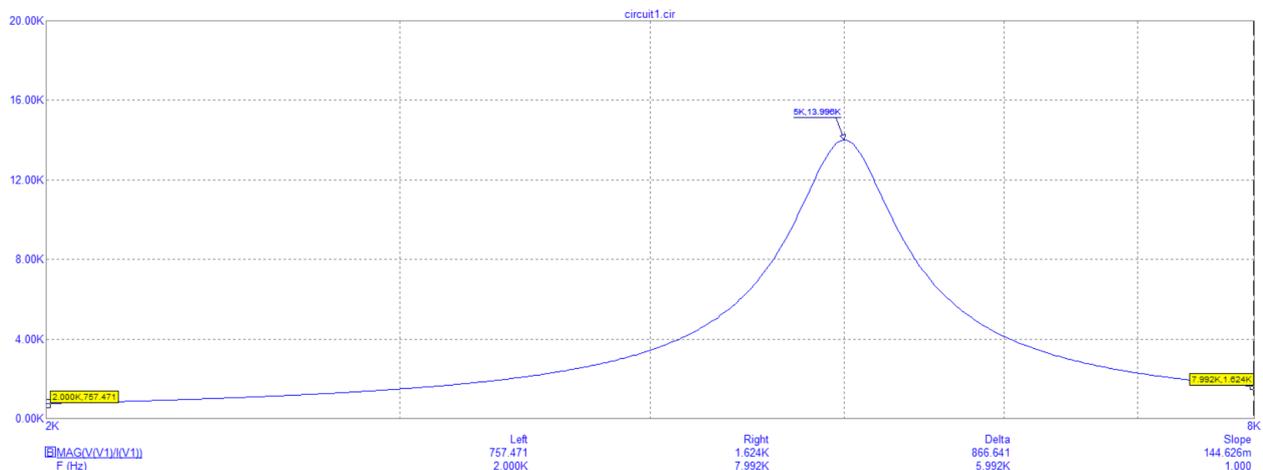


Рисунок 4 – График зависимостей модуля входного сопротивления от частоты

На резонансной частоте при параллельном соединении (где напряжение на ветвях одинаковое)  
 $X_c = X_L \rightarrow$  максимальное общее сопротивление

На рисунке 5 представлен график фазы входного сопротивления от частоты.

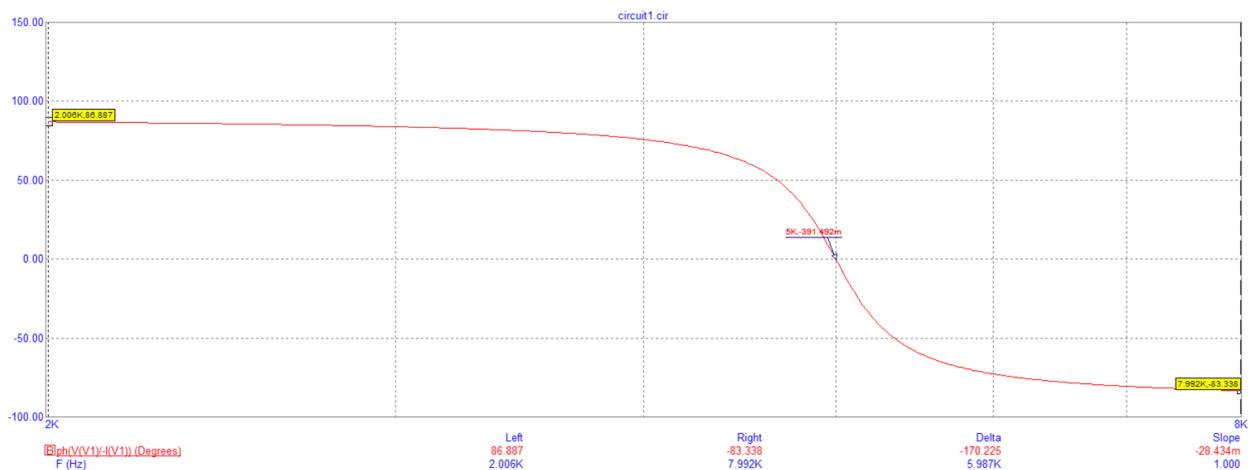


Рисунок 5 – График зависимости фазы входного сопротивления от частоты

На рисунке 6 представлены графики зависимостей модуля входного тока, модуля тока в резисторе, модуля тока в катушке и модуля тока в конденсаторе от частоты.

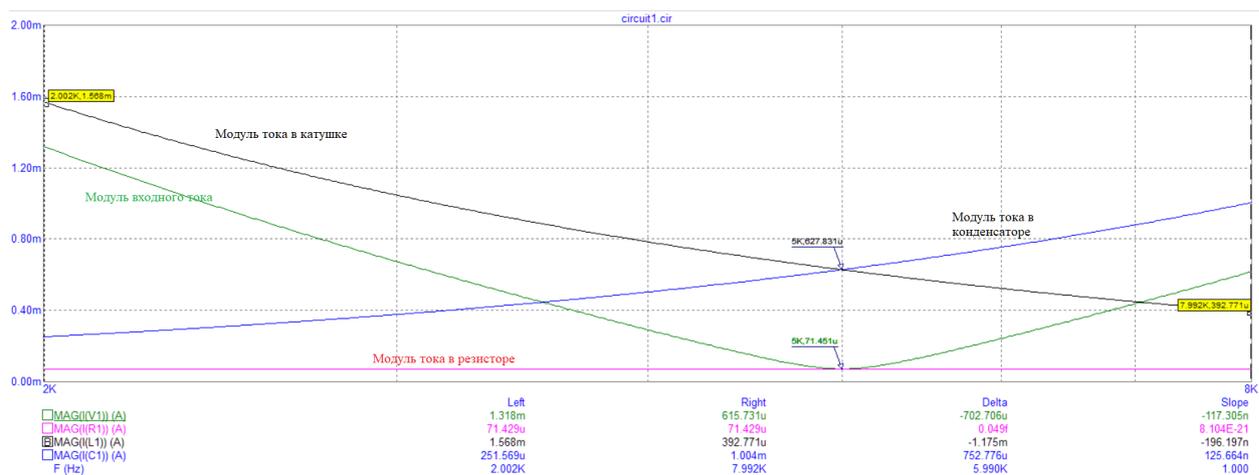


Рисунок 6 – Графики зависимостей модуля входного тока, модуля тока в резисторе, модуля тока в катушке и модуля тока в конденсаторе от частоты

$\underline{I} = , , ,$  – комплексные токи

## Схема 2

На рисунке 7 представлена схема параллельного колебательного контура первого типа

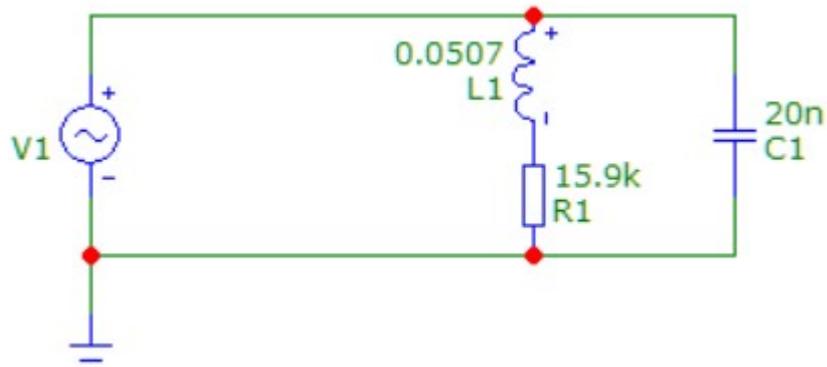


Рисунок 7 – Схема параллельного колебательного контура первого типа

По предварительному расчету				Экспериментально	
Q	R, Ом	$f_{p1}$ , кГц	$Z(f_p)$ , кОм	$f_{p1}$ , кГц	$Z(f_p)$ , кОм
2	796,08	5,001	3,184	5,000	3,00
100	15,92	5,001	159,217	5,000	1,60

На рисунках 8 и 9 представлены графики зависимости модуля входного сопротивления при двух значениях добротности.

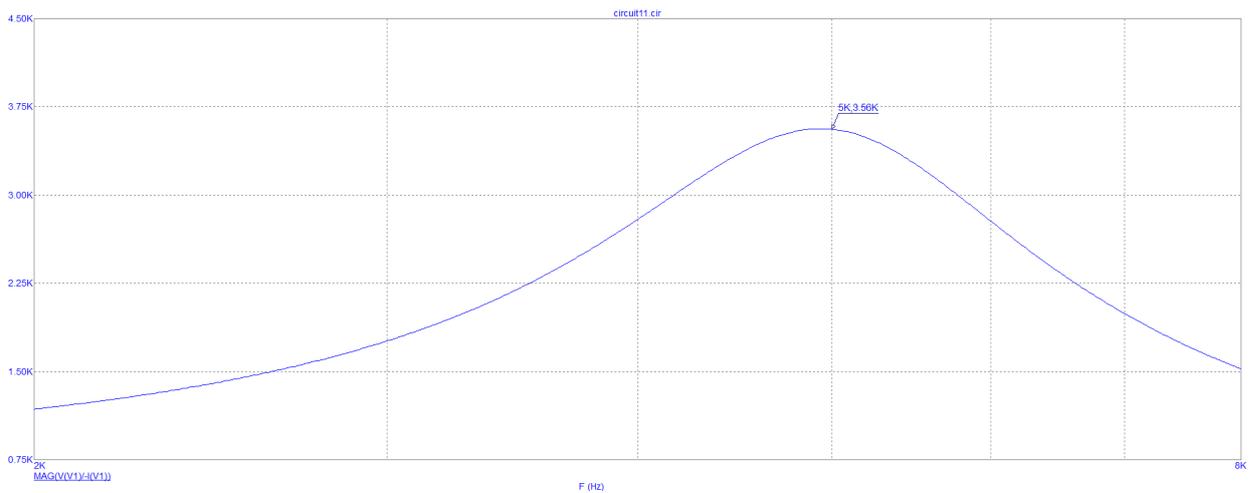


Рисунок 3 – График зависимости модуля входного сопротивления при первом значении добротности

– модуль входного сопротивления при резонансе

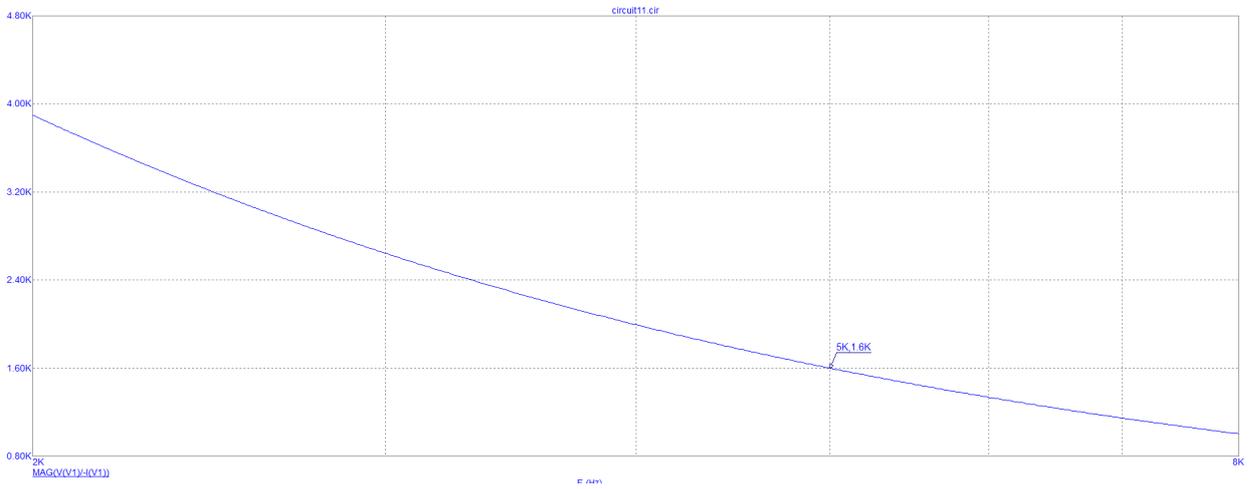


Рисунок 4 – График зависимости модуля входного сопротивления пи втором значении добротности

На рисунках 10 и 11 представлены графики зависимости фазы входного сопротивления от частоты при двух добротностях.

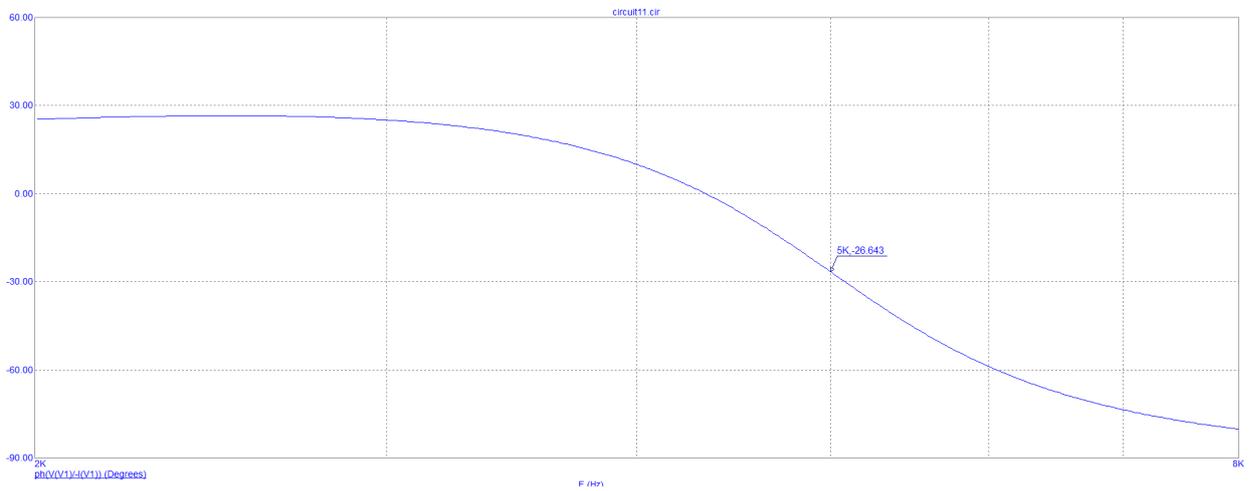


Рисунок 5 – График зависимости фазы входного сопротивления от частоты при первом значении добротности

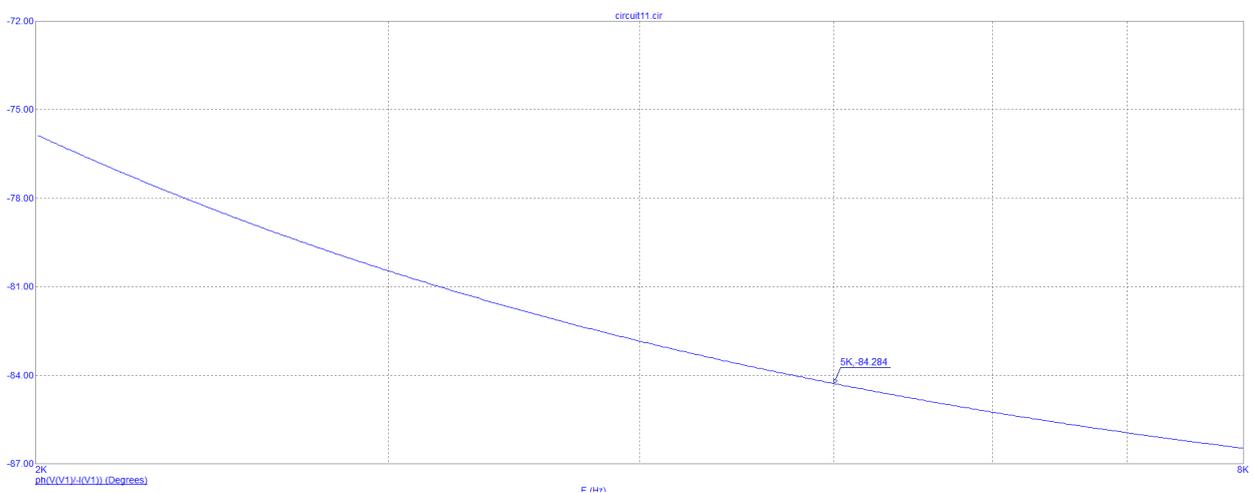


Рисунок 6 – График зависимости фазы входного сопротивления от частоты при первом значении добротности

На рисунках 12 и 13 представлены графики зависимостей модуля входного тока, модуля тока в катушке и модуля тока в конденсаторе от частоты при двух добротностях.

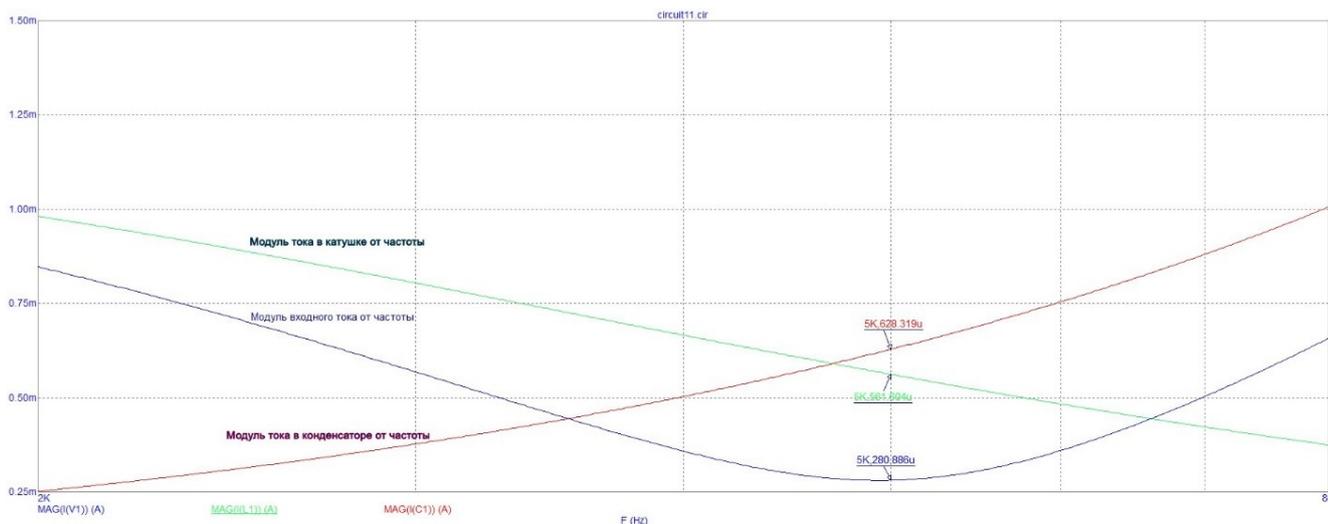


Рисунок 7 - График зависимостей модуля входного тока, модуля тока в катушке и модуля тока в конденсаторе от частоты при первом значении добротности

$\underline{I} = , , , -$  комплексные токи 0,8ком и 15ком

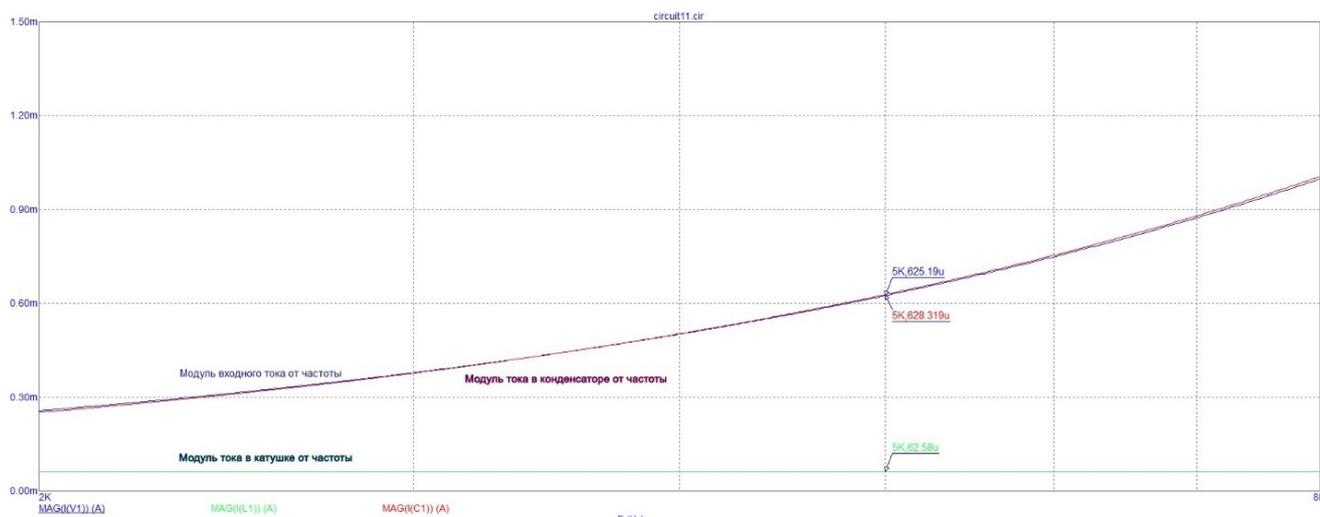


Рисунок 8 – График зависимостей модуля входного тока, модуля тока в катушке и модуля тока в конденсаторе от частоты при втором значении добротности

### 3.Вывод

С помощью программы Micro-Cap были исследованы входные и передаточные характеристики одиночного параллельного колебательного контура при различных добротностях.

### 4.Ответы на вопросы

#### 1. Почему резонанс в параллельном пассивном колебательном контуре называется резонансом токов?

Резонанс токов — резонанс, происходящий в параллельном колебательном контуре при его подключении к источнику напряжения, частота которого совпадает с собственной частотой контура. Резонанс токов возникает в цепях переменного тока состоящих из источника колебаний и

параллельного колебательного контура. Резонанс тока — это увеличение тока проходящего через элементы контура, при этом увеличение потребление тока от источника не происходит.

**2. Как рассчитывается резонансная частота параллельного колебательного контура?**

$$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$$

**3. Что такое добротность параллельного пассивного колебательного контура?**

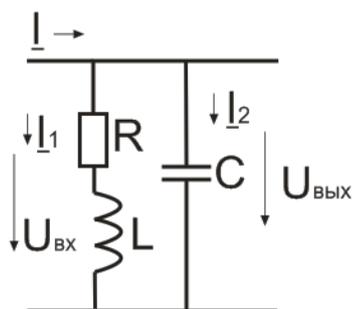
Добротность – характеристика колебательной системы, определяющая полосу резонанса и показывающая, во сколько раз запасы энергии в системе больше, чем потери энергии за один период колебаний.

**4. Что такое полоса пропускания параллельного пассивного колебательного контура? Какие существуют способы расчета полосы пропускания?**

Полоса пропускания параллельного пассивного колебательного контура – это диапазон частот, который определяют по резонансной кривой на уровне 0,7 от максимального значения напряжения, соответствующей резонансной частоте. Способы расчета:

1. Графический способ – полосу пропускания определяют непосредственно по графику.
2. Аналитический способ – способ, при котором рассчитывают нижнюю и верхнюю граничные частоты, а потом из верхней вычитают нижнюю.

**5. Выведите уравнения, с помощью которых рассчитывают входные**



**АЧХ контура.**

77

**и ФЧХ параллельного пассивного колебательного**

$$Z_1 = R + jX_L = R + j\omega L$$

$$Z_2 = -jX_C = -j \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z_{вх} = a + jb = R_{экв} + jX_{экв}$$

АЧХ:

$$\underline{Z}_{вх} = \frac{Z_1 * Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(R + j\omega L) * \frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega L - j \frac{1}{\omega C}} = \frac{\frac{L}{C}}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} = \frac{\rho^2}{R + jX} = \frac{Q\rho}{1 + j\xi} = \frac{Q\rho}{1 + \xi^2} - j \frac{Q\rho\xi}{1 + \xi^2} = R_{вх} - jX_{вх}$$

$$Z_{BX} = \sqrt{R_{BX}^2 + X_{BX}^2} = \frac{Q\rho}{\sqrt{1 + \xi^2}}$$

• ФЧХ:

$$\xi = 0 \quad \varphi_{Z_{BX}} = 0 \quad \xi = \pm 1 \quad \varphi_{Z_{BX}} = \mp 45^\circ \quad \xi = \pm \infty \quad \varphi_{Z_{BX}} = \arctg(-\xi)$$

### Список использованных источников

1. ГОСТ 7.32-2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. - URL: <https://files.stroyinf.ru/Index/655/65555.htm>
2. Фриск В.В., Логвинов В.В. Основы теории цепей, основы схемотехники, радиоприемные устройства. Лабораторный практикум на персональном компьютере. – М.: СОЛОН-ПРЕСС 2008, 609 с.

### Лабораторная работа № 6

#### «Переходные процессы в электрических цепях с одним реактивным элементом»

Цель работы:

- исследование переходных процессов в электрических цепях с одним реактивным элементом;
- исследовать реакцию формирующих цепей при различных условиях.

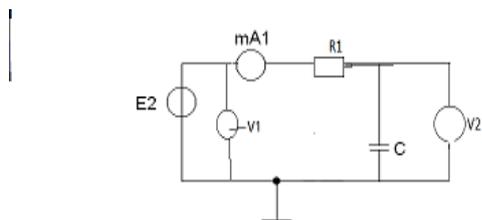


Рисунок 1.

### 1. ИНТЕГРИРУЮЩИЕ ЦЕПИ

78

Частота исследования рекомендуемая: 330, 500, 800 Гц.

**В течении занятия частоту не изменять.**

2. Выбрать элементы R и C таким образом, чтобы постоянная времени  $\tau = R \cdot C$  была равна  $\tau \approx 0,5 t_{\text{имп}}$ .

**ВНИМАНИЕ:** Возможные значения емкости конденсатора: 0,15 мкф, 0,22 мкф, 0,33 мкф, 0,47 мкф, 2,2 мкф, 3,3 мкф, 4,7 мкф.

Возможные значения величины номинала резистора >220 Ом–10,0 кОм.

**Резистор номиналом менее 200 ом НЕ ПРИМЕНЯТЬ!!!**

3. На панели управления выбрать источник E2. включить режим «меандр» (прямоугольные импульсы со скважностью 2).

Установить амплитуду 1,0 В, постоянную составляющую 0 В.

#### 4. Задание к работе.

1. Собрать схему (рис.1). Пригласить преподавателя проверить схему

5. Получить осциллограммы входных импульсов V1, импульсов на конденсаторе V2 и тока в цепи (рис.2).

По осциллограммам определить постоянную времени  $\tau$ , RC-цепи (время от начала импульса до момента, когда  $V_2$  станет равным  $0,63 V_{2_{\max}}$ ).

Сохранить изображение экрана (осциллограмму) с визирными линиями, положение которых соответствует определению « $\tau$ ».

Для сохранения изображения экрана осциллографа, необходимо на поле экрана нажать левую кнопку мыши и выбрать пункт «сохранить». Затем сохраненные файлы необходимо использовать при подготовке отчета по работе.

В связи с тем, что одновременно можно получить сигналы только двух величин, например тока и напряжения на входе или напряжения на входе и напряжения на выходе, надо делать сохранение двух осциллограмм. Первая, где выбраны, например, сигналы для каналов  $V_1$  и  $V_2$ , и вторая, где выбраны  $V_1$  и  $I$ .

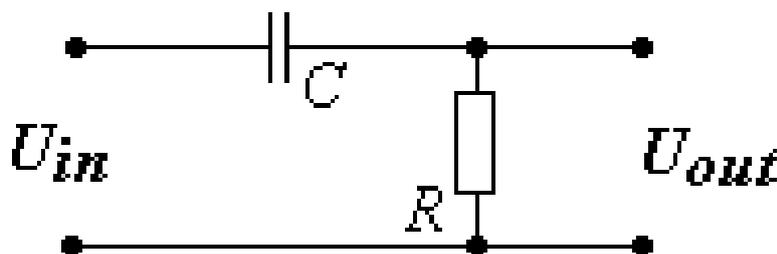
6. повторить пп.3,4 для другого резистора (не менее 220 ом, отличающегося от первого на 50-100% в любую сторону), при неизменном конденсаторе. Сохранить изображение на экране (осциллограммы) с визирными линиями, положение которых соответствует определению « $\tau$ ».

7. Повторить пп.3,4 для другого конденсатора (отличающегося от первого на 50- 100% в любую сторону), при неизменном резисторе.

8. Выбрать  $\tau \gg t_{\text{имп}}$ . Для этого выбрать величину резистора(конденсатора) в 2-5 раз больше). Получить осциллограммы входных импульсов и импульсов на конденсаторе  $C$ . Сохранить изображение на экране (осциллограммы) с визирными линиями, положение которых соответствует определению « $\tau$ ».

## 2. ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЕ ЦЕПИ

Собрать схему (рис.2)



79

Провести исследование, аналогично предыдущему при условиях:

1.  $\tau \gg t_{\text{имп}}$ ; (10-20 раз)
2.  $\tau = t_{\text{имп}}$
3.  $\tau < t_{\text{имп}}$  (2-5 раз)
4.  $\tau \ll t_{\text{имп}}$  (10-20 раз)

## 3. Контрольные вопросы:

1. Понятие переходных процессов.
2. Законы коммутации.
3. Методы расчета переходных процессов.
3. Влияние параметров элементов схемы на характеристики переходных процессов.
4. Определение  $t_{\text{и}}$ ,  $\tau$  цепи по графику ПП
5. Практическое применение дифференцирующих и интегрирующих цепей

## Лабораторная работа №7

### «Исследование входных частотных характеристик в RL-цепи»

#### 1.Задание

##### Цель лабораторной работы

С помощью программы Micro-Cap исследовать входные амплитудно-частотные (АЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики RL-цепи. Сравнить АЧХ и ФЧХ, полученные с помощью программы Micro-Cap, с аналогичными характеристиками, полученными расчетным путем.

#### 2.Ход выполнения лабораторной работы

##### 2.1 Предварительный расчет

Я рассчитала граничную частоту  $f_{gr}$  для RL-цепи (рис. 1), если  $R_1=100$  Ом, а  $L_1=45$  мГн, а также отношение  $f/f_{gr}$ , значения индуктивного сопротивления  $X_L$ , модули входного сопротивления  $Z_{вх}$ , аргумента входного сопротивления  $\varphi_z$ , модули тока в цепи  $I$ , падения напряжения на резисторе  $U_R$  и модули напряжения на катушке  $U_L$ , на частотах  $f=2, 4, 6, 8, 10, 12, 14$  кГц,  $E=0,9$  В в цепи, изображенной на рисунке 1. Полученные величины я занесла в таблицу 1.

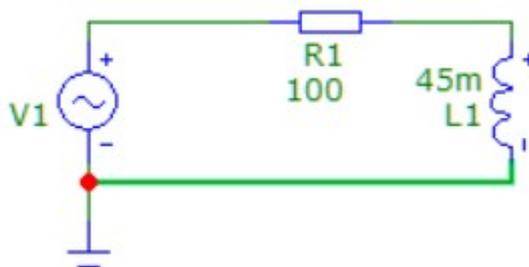


Рисунок 1 – Электрическая цепь

Расчет производился с помощью следующих формул:

$$Z_{вх} = \frac{U_{вх}}{I} = Z(\omega)e^{j\varphi_z(\omega)} = Z(2\pi f)e^{j\varphi_z(2\pi f)}, \text{ где}$$

$U_{вх}$  – комплексное входное напряжение;

$$I = \frac{U_{вх}}{Z_{вх}} \text{ – комплексный входной ток;}$$

80

$U_R = R * I$  – комплексное напряжение на резисторе;

$j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица;

$\omega = 2\pi f$  – угловая частота;

$f$  – частота

$U_L = j\omega L * I$  – комплексное напряжение на катушке;

$|Z_{вх}| = Z(2\pi f)$  – модуль комплексного входного сопротивления (АЧХ);

$\arg(Z_{вх}) = \varphi_z(2\pi f)$  – аргумент (фаза) комплексного входного сопротивления (ФЧХ).

$$Z_{вх} = \operatorname{Re}(Z_{вх}) + j\operatorname{Im}(Z_{вх}) = R_1 + jX_L = \sqrt{R_1^2 + X_L^2} * e^{-j\arctg\left(\frac{X_L}{R_1}\right)}$$

$$= R_1 \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{гр}}\right)^2} * e^{-j \arctg\left(\frac{f}{f_{гр}}\right)};$$

$Re(Z_{вх}) = R_1$  – резистивное входное сопротивление,

$Im(Z_{вх}) = X_L$  – реактивное входное сопротивление,

$X_L = \omega L$  - индуктивное сопротивление катушки L1

$f_{гр} = \frac{R_1}{2\pi L_1}$  – Граничная частота RL-цепи.

Таблица 1 – Результаты, полученные по предварительным расчетам

По предварительным расчетам							
f, кГц	f/f <sub>гр</sub>	X <sub>L</sub> , Ом	Z <sub>вх</sub> , Ом	φz(f), град	I, mA	U <sub>R</sub> , В	U <sub>L</sub> , В
2	5,65	565,2	573,98	80,0	1,568	0,157	0,886
4	11,30	1130,4	1134,81	85,0	0,793	0,079	0,896
6	16,96	1695,6	1698,55	86,7	0,530	0,053	0,898
8	22,61	2260,8	2263,01	87,5	0,398	0,040	0,899
10	28,26	2826	2827,77	88,0	0,318	0,032	0,899
12	33,91	3391,2	3392,67	88,4	0,265	0,027	0,900
14	39,56	3956,4	3957,66	88,6	0,227	0,023	0,900

Таблица 2 – Результаты, полученные экспериментально

Получено экспериментально							
f, кГц	f/f <sub>гр</sub>	X <sub>L</sub> , Ом	Z <sub>вх</sub> , Ом	φz(f), град	I, mA	U <sub>R</sub> , В	U <sub>L</sub> , В
2	5,65	565,2	573,98	80,0	1,568	0,157	0,886
4	11,30	1130,4	1134,81	85,0	0,793	0,079	0,896
6	16,96	1695,6	1698,55	86,7	0,530	0,053	0,898
8	22,61	2260,8	2263,01	87,5	0,398	0,040	0,899
10	28,26	2826	2827,77	88,0	0,318	0,032	0,899
12	33,91	3391,2	3392,67	88,4	0,265	0,027	0,900
14	39,56	3956,4	3957,66	88,6	0,227	0,023	0,900

На рисунке 2 представлен график зависимости модуля входного сопротивления от частоты.

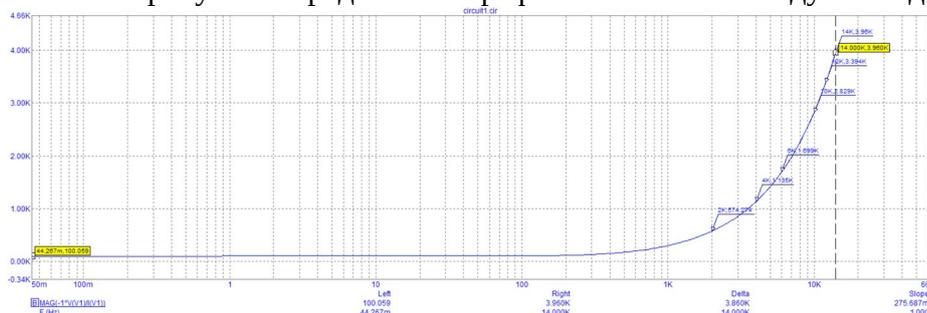


Рисунок 2 – График зависимости модуля входного сопротивления от частоты

Вывод: при увеличении частоты модуль входного сопротивления увеличивается.

На рисунке 3 представлен график зависимости фазы входного сопротивления от частоты.

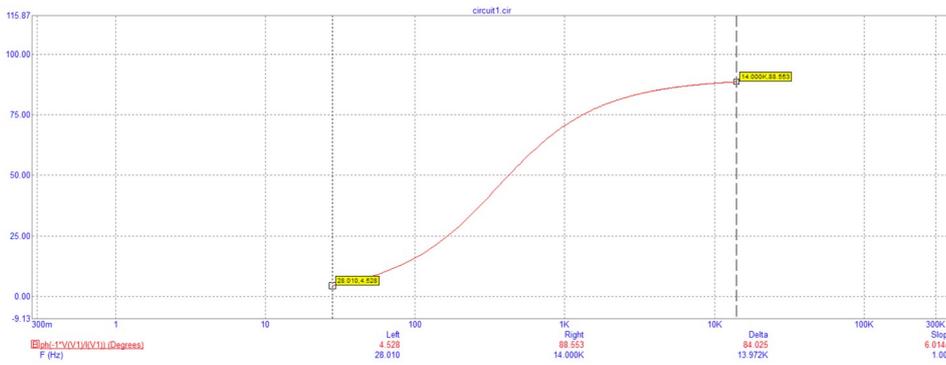


Рисунок 3 – График зависимости фазы входного сопротивления от частоты  
 Вывод: при увеличении частоты фаза входного сопротивления увеличивается  
 На рисунке 4 представлен график зависимости модуля тока от частоты.

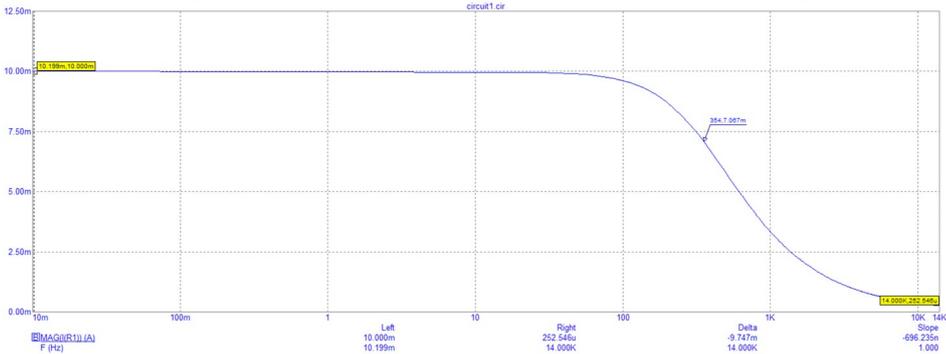


Рисунок 4 – График зависимости модуля тока от частоты  
 Вывод: при увеличении частоты модуль тока уменьшается.

На рисунке 5 представлен график зависимости напряжения на резисторе от частоты.

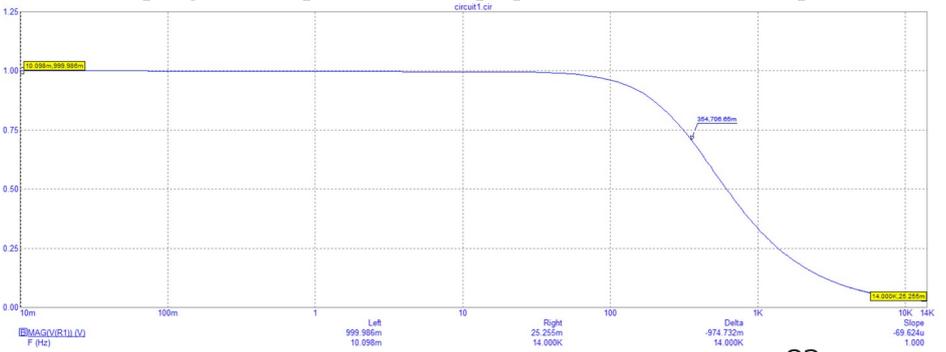


Рисунок 5 – График зависимости напряжения на резисторе от частоты  
 Вывод: при увеличении частоты напряжение на резисторе уменьшается.

На рисунке 6 представлен график зависимости резистивного сопротивления от частоты.

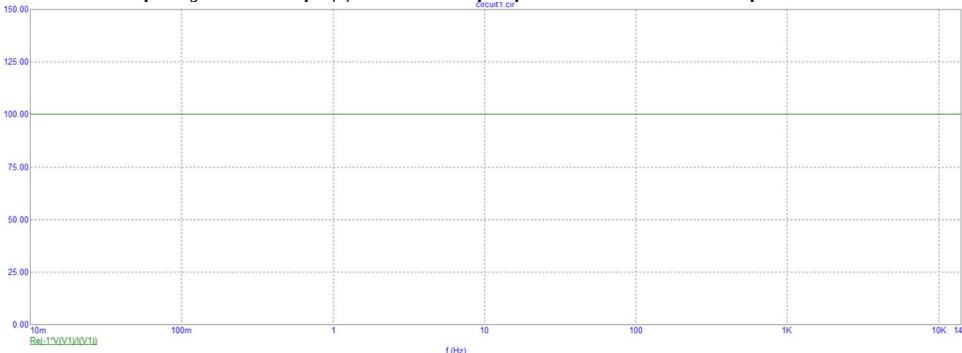


Рисунок 6 – График зависимости резистивного сопротивления от частоты  
 Вывод: при изменении частоты резистивное сопротивление не изменяется и равно сопротивлению R1  
 На рисунке 7 представлен график зависимости индуктивного сопротивления от частоты.

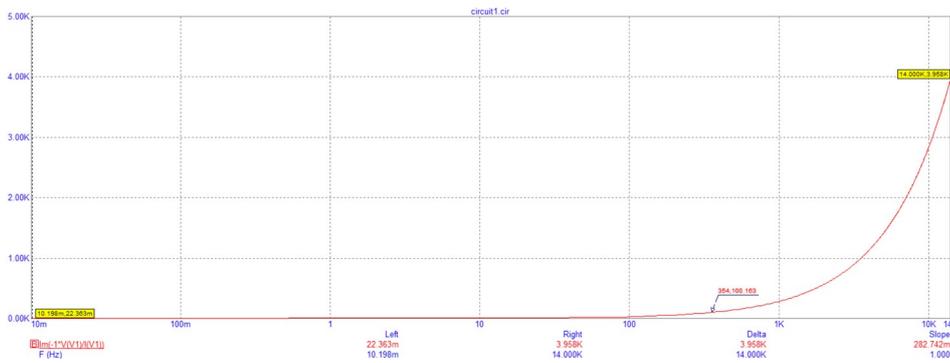


Рисунок 7 – График зависимости индуктивного сопротивления от частоты

Вывод: при увеличении частоты индуктивное сопротивление увеличивается.

На рисунке 8 представлен график зависимости модуля напряжения на катушке от частоты.

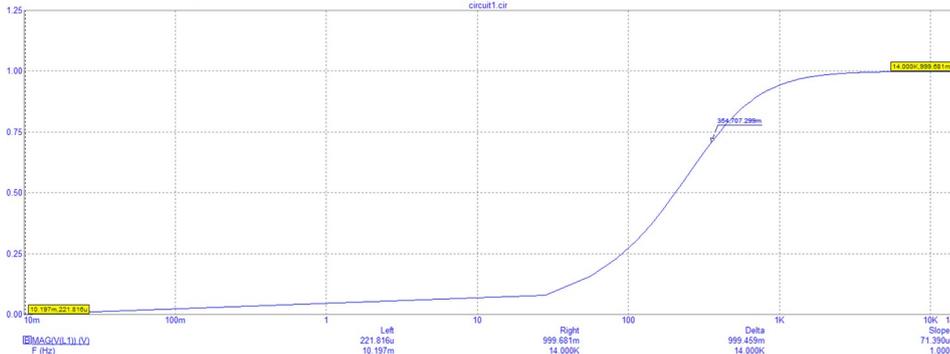


Рисунок 8 – График зависимости модуля напряжения на катушке от частоты

Вывод: при увеличении частоты модуль напряжения на катушке увеличивается.

### 3. Вывод

С помощью программы Micro-Cap я исследовала входные амплитудно-частотные (АЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики RL-цепи. Сравнила АЧХ и ФЧХ, полученные с помощью программы Micro-Cap, с аналогичными характеристиками, полученными расчетным путем.

### 4. Ответы на вопросы

1) Какая частота называется граничной для RL цепи?

Ответ:

Граничной называется частота, при которой модуль реактивного сопротивления равен резистивному сопротивлению

2) Каково значение модуля входного сопротивления RL-цепи на граничной частоте?

Ответ:

Модуль реактивного сопротивления равен резистивному сопротивлению.

На граничной частоте, модуль:  $|Z_{вх}| = R\sqrt{2}$

3) Каково значение аргумента входного сопротивления RL-цепи на граничной частоте?

Ответ: Аргумент входного сопротивления RL-цепи на граничной частоте равен  $\arg|Z_{вх}| = |\varphi_{вх}| = 45^\circ$

4) К чему стремится модуль тока RL-цепи при увеличении частоты?

Ответ: С ростом частоты входное сопротивление цепи RL возрастает, а модуль тока уменьшается.

5) Чему равен модуль входного сопротивления RL-цепи при частоте, равной нулю?

Ответ: Модуль входного сопротивления RL-цепи при частоте равной нулю равен R.

### Список использованных источников

1. ГОСТ 7.32-2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. - URL: <https://files.stroyinf.ru/Index/655/65555.htm>

### 6. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) Результаты предварительного расчёта;
- 2) Таблицы предварительного расчёта;

- 3) Схемы измерений;
- 4) Все осциллограммы напряжений на элементах цепи;
- 5) Краткие выводы о проделанной работе.

## 7. Контрольные вопросы

1. Чем обусловлены переходные процессы в электрических цепях?
2. Какие виды коммутации Вы знаете? Дайте определение термину "коммутация".
3. Каким образом осуществляется коммутация в данной работе?
4. Как формулируется первый закон коммутации? Как он доказывается?
5. Какой физический смысл постоянной времени  $\tau$ ? Почему она так называется? Какие параметры определяют  $\tau$ ?
6. Каким образом по осциллограмме переходного процесса можно определить  $\tau$ ?
7. Зависит ли постоянная времени цепи от воздействующего на цепь напряжения?
8. Как по схеме определить начальные условия? Чем отличаются друг от друга зависимые и независимые начальные условия?
9. Чем отличаются принужденная и свободная составляющие переходного процесса? Как они определяются?
10. Какова зависимость напряжения на резисторе от времени в последовательной RL-цепи при включении на постоянное напряжение?
11. Как влияет на  $u_L(t)$  изменение  $R$ ,  $L$ ,  $E$  в неразветвленной RL-цепи, включаемой на постоянное напряжение?
12. От чего зависит порядок дифференциального уравнения цепи?
13. Выведите соотношения (1.1) и (1.2).
14. Выведите соотношения (1.3) и (1.4).

## Лабораторная работа № 8

### «Исследование входных частотных характеристик в RC-цепи»

#### 1. Цель лабораторной работы

С помощью программы Micro-Cap исследовать входные амплитудно-частотные (АЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики RC-цепи. Сравнить АЧХ и ФЧХ, полученные с помощью программы Micro-Cap, с аналогичными характеристиками, полученными расчетным путем.

#### 2. Ход выполнения лабораторной работы

##### 2.1 Предварительный расчет

##### Исследование частотных характеристик RC-цепи 84

Я рассчитала граничную частоту  $f_{гр}$  для RC-цепи (рис. 1), при  $R_1=100$  Ом, а  $C_1=219$ нФ, а также отношение  $f/f_{гр}$ , значения индуктивного сопротивления  $X_C$ , модули входного сопротивления  $Z_{вх}$ , аргумента входного сопротивления  $\varphi_Z$ , модули тока в цепи  $I$ , падения напряжения на резисторе  $U_R$  и модули напряжения на конденсаторе  $U_C$ , на частотах  $f=2, 4, 6, 8, 10, 12, 14$  кГц,  $E=0,9$  В в цепи, изображенной на рисунке 1. Полученные величины я занесла в таблицу 1.

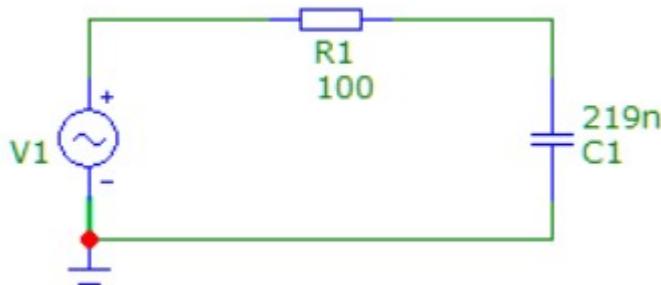


Рисунок 1 – Электрическая цепь

Расчет производился с помощью следующих формул:

$$Z_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I} = Z(\omega)e^{j\varphi_z(\omega)} = Z(2\pi f)e^{j\varphi_z(2\pi f)}, \text{ где}$$

$U_{ВХ}$  – комплексное входное напряжение;

$$I = \frac{U_{ВХ}}{Z_{ВХ}} \text{ – комплексный входной ток;}$$

$U_R = R * I$  – комплексное напряжение на резисторе;

$j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица;

$\omega = 2\pi f$  – угловая частота;

$f$  – частота

$|Z_{ВХ}| = Z(2\pi f)$  – модуль комплексного входного сопротивления (АЧХ);

$\arg(Z_{ВХ}) = \varphi_z(2\pi f)$  – аргумент (фаза) комплексного входного сопротивления (ФЧХ).

$$Z_{ВХ} = \operatorname{Re}(Z_{ВХ}) + j\operatorname{Im}(Z_{ВХ}) = R_1 + jX_C = \sqrt{R_1^2 + X_C^2} * e^{-j\arctg\left(\frac{X_C}{R_1}\right)} =$$

$$= R_1 \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{гр}}\right)^2} * e^{-j\arctg\left(\frac{f}{f_{гр}}\right)};$$

$\operatorname{Re}(Z_{ВХ}) = R_1$  – резистивное входное сопротивление,

$\operatorname{Im}(Z_{ВХ}) = -X_C$  – реактивное входное сопротивление,

$X_C = \frac{1}{\omega C}$  – индуктивное сопротивление катушки L1

$f_{гр} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$  – Граничная частота RL-цепи.

85

Для нагруженной RC-цепи

$$f_m = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \sqrt{1 + \frac{R_2}{R_1}}, \quad \varphi_m^0 = \frac{180^\circ}{\pi} \arctg \left[ \frac{1}{2 \sqrt{\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 + \frac{R_1}{R_2}}} \right],$$

где  $R_2 = 320 \text{ Ом}$  – сопротивление нагрузки.

Таблица 1 – Результаты, полученные по предварительным расчетам

f, кГц	f/f <sub>гр</sub>	X <sub>C</sub> , Ом	Z <sub>вх</sub> , Ом	Phi(f), град.	I, мА	U <sub>R</sub> , В	U <sub>C</sub> , В
4	0,55	181,68	207,39	-28,83	0,00482	0,482	0,876
6	0,83	121,12	157,07	-39,54	0,00637	0,637	0,771
8	1,10	90,84	135,10	-47,75	0,00740	0,740	0,672
10	1,38	72,67	123,62	-53,99	0,00809	0,809	0,588
12	1,65	60,56	116,91	-58,80	0,00855	0,855	0,518
14	1,93	51,91	112,67	-62,57	0,00888	0,888	0,461

Таблица 2 – Результаты, полученные экспериментально

f, кГц	f/f <sub>гр</sub>	X <sub>C</sub> , Ом	Z <sub>вх</sub> , Ом	Phi(f), град.	I, мА	U <sub>R</sub> , В	U <sub>C</sub> , В
4	0,55	181,68	207,39	-28,83	0,00482	0,482	0,876
6	0,83	121,12	157,07	-39,54	0,00637	0,637	0,771
8	1,10	90,84	135,10	-47,75	0,00740	0,740	0,672
10	1,38	72,67	123,62	-53,99	0,00809	0,809	0,588
12	1,65	60,56	116,91	-58,80	0,00855	0,855	0,518
14	1,93	51,91	112,67	-62,57	0,00888	0,888	0,461

На рисунке 2 представлен график зависимости модуля входного сопротивления от частоты.

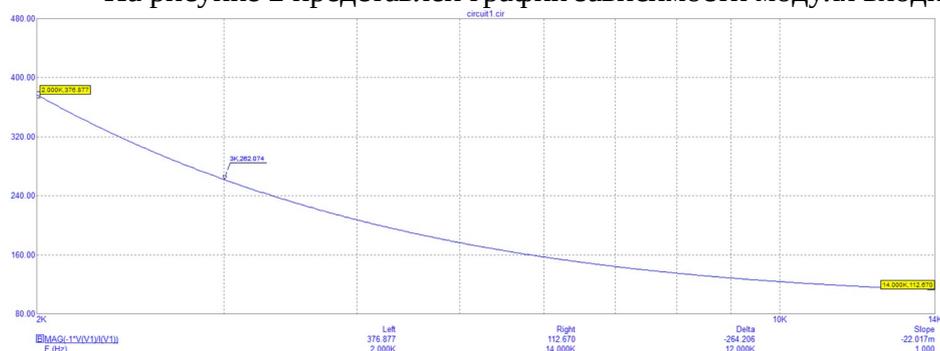


Рисунок 2 – График зависимости модуля входного сопротивления от частоты

Вывод: при увеличении частоты модуль входного сопротивления уменьшается.

На рисунке 3 представлен график зависимости фазы входного сопротивления от частоты.

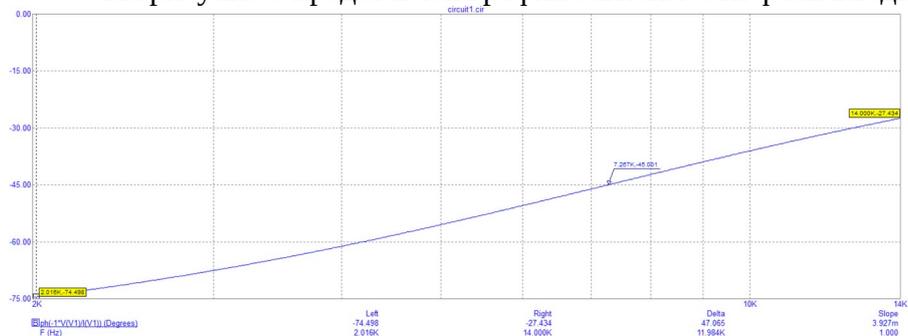


Рисунок 3 – График зависимости фазы входного сопротивления от частоты

Вывод: при увеличении частоты фаза входного сопротивления увеличивается

На рисунке 4 представлен график зависимости модуля тока от частоты.

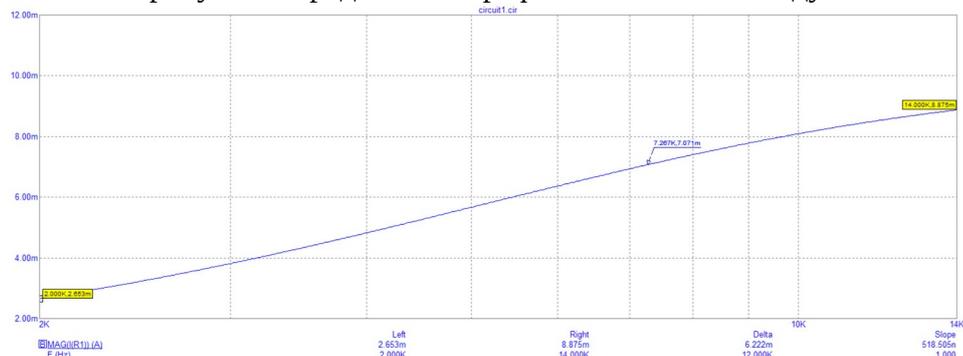


Рисунок 4 – График зависимости модуля тока от частоты

Вывод: при увеличении частоты модуль тока увеличивается.

На рисунке 5 представлен график зависимости напряжения на резисторе от частоты.

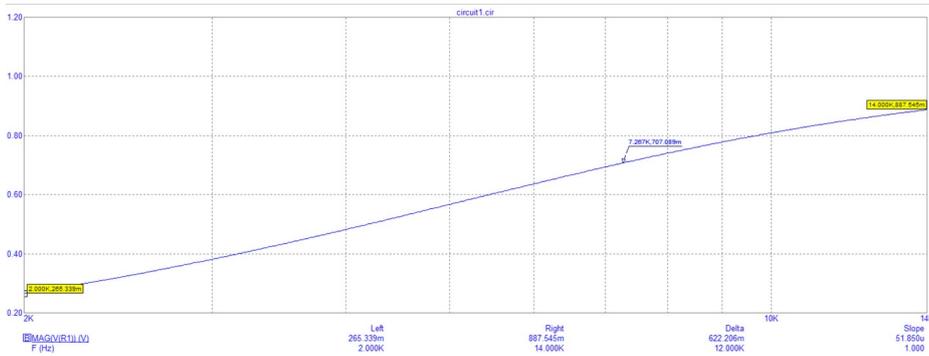


Рисунок 5 – График зависимости напряжения на резисторе от частоты

Вывод: при увеличении частоты напряжение на резисторе увеличивается.

На рисунке 6 представлен график зависимости реактивного сопротивления от частоты.

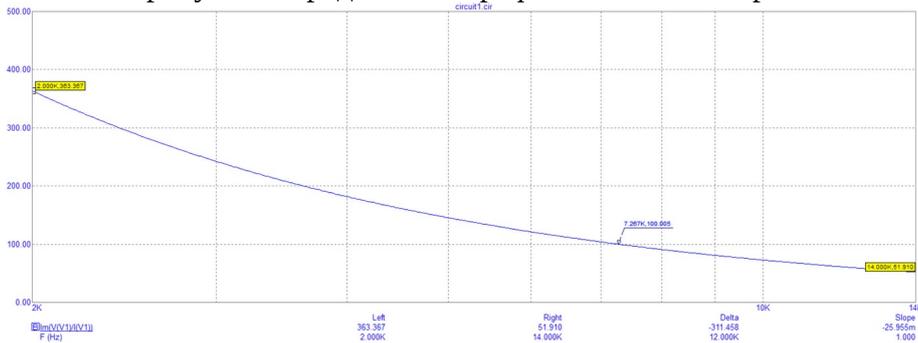


Рисунок 6 – График зависимости реактивного сопротивления от частоты

Вывод: при изменении частоты реактивное сопротивление уменьшается.

### Исследование частотных характеристик нагруженной RC-цепи

Схема нагруженной RC-цепи представлена на рисунке 7.

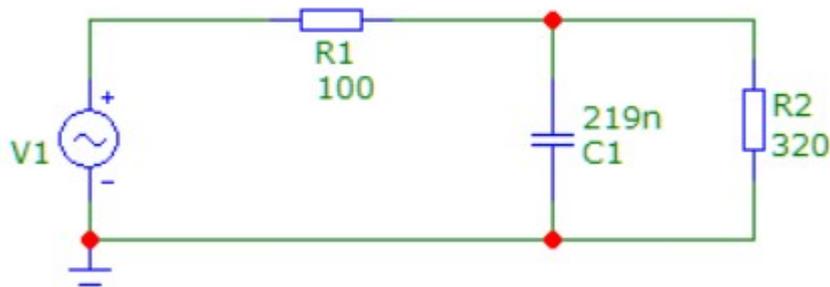


Рисунок 7 – Схема нагруженной RC-цепи

На рисунке 8 представлен график зависимости модуля входного сопротивления от частоты.

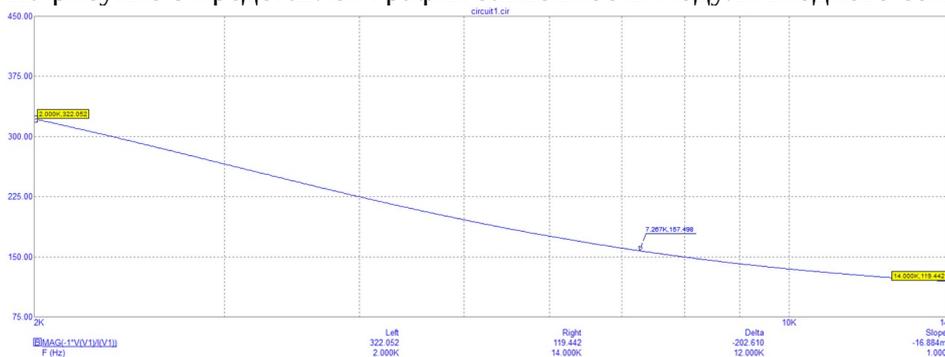


Рисунок 8 – График зависимости модуля входного сопротивления от частоты

Вывод: при увеличении частоты индуктивное сопротивление уменьшается.  
 На рисунке 9 представлен график зависимости фазы входного сопротивления от частоты.

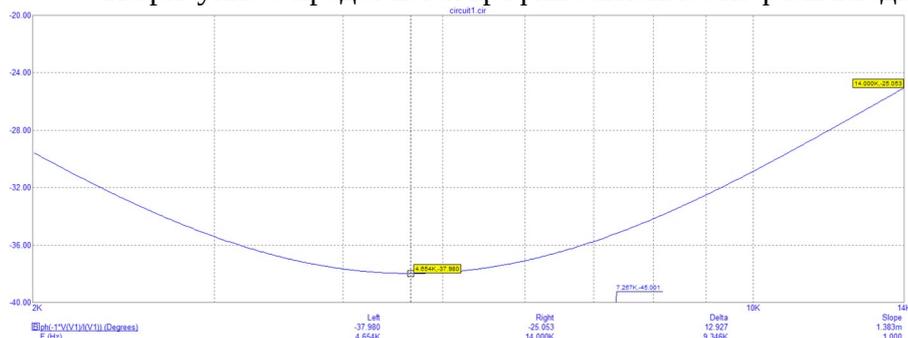


Рисунок 9 – График зависимости фазы входного сопротивления от частоты  
 Данные, полученные расчётным путём, а также посредством эксперимента, представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Данные для нагруженной RC-цепи

Нагруженная RC-цепь	Предварительный расчет	ЭВМ
$f_m$ , Гц	4654,260463	4654,26
$\Phi_{im}$ , град	37,98	37,98

### 3. Вывод

С помощью программы Micro-Cap я исследовала входные амплитудно-частотные (АЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики RC-цепи. Сравнила АЧХ и ФЧХ, полученные с помощью программы Micro-Cap, с аналогичными характеристиками, полученными расчетным путем.

### 4. Ответы на вопросы

1) Какая частота называется граничной для RC цепи?

Ответ:

Граничной называется частота, при которой модуль реактивного сопротивления равен резистивному сопротивлению

2) Какая частота называется граничной для RL цепи?

Ответ:

Граничной называется частота, при которой модуль реактивного сопротивления равен резистивному сопротивлению

88

3) Каково значение модуля входного сопротивления RC-цепи на граничной частоте?

Ответ:

Модуль реактивного сопротивления равен резистивному сопротивлению.

На граничной частоте, модуль:  $|Z_{вх}| = R\sqrt{2}$

4) Каково значение аргумента входного сопротивления RC-цепи на граничной частоте?

Ответ: Аргумент входного сопротивления RL-цепи на граничной частоте равен  $\arg(Z_{вх}) = \phi_{вх} = -45^\circ$

5) К чему стремится модуль входного сопротивления нагруженной RC-цепи при увеличении частоты?

Ответ: Модуль входного сопротивления нагруженной RC-цепи при увеличении частоты стремится к R.

6) Чему равен модуль входного сопротивления нагруженной RC-цепи при частоте, равной нулю?

Ответ: модуль входного сопротивления нагруженной RC-цепи при частоте равной нулю стремится к бесконечности.

### Список использованных источников:

ГОСТ 7.32-2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. - URL: <https://files.stroyinf.ru/Index/655/65555.htm>

## 5. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) Результаты предварительного расчёта;
- 2) Таблицы предварительного расчёта;
- 3) Схемы измерений;
- 4) Все осциллограммы напряжений на элементах цепи;
- 5) Краткие выводы о проделанной работе.

## 6. Контрольные вопросы

1. Чем обусловлены переходные процессы в RC- цепях?
2. При каком условии переходный процесс называется свободным?
3. Как формулируется второй закон коммутации? Как он доказывается?
4. Дифференциальным уравнением какого порядка можно описать переходный процесс в последовательной RC-цепи? Запишите это уравнение.
5. Какой физический смысл постоянной времени  $\tau_c$ ? Почему она так называется? Какие параметры определяют  $\tau_c$ ?
6. Каким образом по осциллограмме переходного процесса можно определить  $\tau_c$ ?
7. Зависит ли постоянная времени цепи от воздействующего на цепь напряжения?
8. Как по схеме определить начальные условия? Чем отличаются друг от друга зависимые и независимые начальные условия?
9. Чем отличаются принуждённая и свободная составляющие переходного процесса? Как они определяются?
10. Какова зависимость напряжения на резисторе от времени в последовательной RC-цепи при включении на постоянное напряжение?
11. Как влияет на  $u_C(t)$  изменение  $R$ ,  $C$ ,  $E$  в неразветвлённой RC- цепи, включаемой на постоянное напряжение?
12. Дайте определение термину "коммутация". Какие виды коммутации в цепи Вы знаете?
13. Выведите соотношения (2.1) и (2.2).
14. Выведите соотношения (2.3) и (2.4).

## Лабораторная работа № 9 Переходные процессы в цепи R-L-C

**Цель работы:** получение навыков экспериментального исследования аperiodического и колебательного разрядов конденсатора.

### 2.1 Подготовка к работе

Повторить раздел курса ТОЭ «Переходные процессы в цепи R-L-C».

[Л.1] с.27-37.

[Л.3] с.244-250.

Ответить на вопросы и выполнить следующее:

- 1) Записать уравнение по второму закону Кирхгофа для свободных составляющих напряжений цепи R-L-C и соответствующее ему характеристическое уравнение.
- 2) При каких корнях характеристического уравнения в цепи R-L-C возникает аperiodический разряд конденсатора? Написать уравнения для  $u_C(t)$ ,  $i(t)$ ,  $u_L(t)$  при аperiodическом разряде конденсатора. Привести графики этих величин.
- 3) При каких корнях характеристического уравнения в цепи R-L-C возникает колебательный разряд конденсатора? Написать уравнения для  $u_C(t)$ ,  $i(t)$ ,  $u_L(t)$  при колебательном разряде конденсатора. Привести графики этих величин.
- 4) Что такое логарифмический декремент колебания?
- 5) Как определить коэффициент затухания  $\alpha$  и частоту собственных (свободных) колебаний  $\omega_{св}$  расчётным и опытным путём (по графику)? Как эти величины зависят от  $R$ ,  $L$  и  $C$ ?
- 6) Что такое критическое сопротивление цепи R-L-C? Что такое критический режим цепи R-L-C?

### 2.2 Порядок выполнения работы

#### 2.2.1 Собрать цепь (см. рисунок 2.1)

2.2.2 Установить значения R, L и C согласно варианту (см. таблицу 2.1). Измерить сопротивление катушки R<sub>к</sub>. Напряжение на входе U<sub>вх</sub> установить порядка 20-30В, R<sub>1</sub>=50-300 Ом.

2.2.3 На вход осциллографа подать напряжение с конденсатора.

2.2.4 Исследовать колебательный разряд конденсатора, срисовать в масштабе осциллограмму напряжения u<sub>с</sub>(t).

2.2.5 Срисовать осциллограммы тока i(t), u<sub>L</sub>(t) при колебательном разряде конденсатора.

2.2.6 Добиться критического режима в цепи, меняя сопротивление R. Записать величину полученного сопротивления R<sub>кр</sub> (эксп). Учесть сопротивление катушки R<sub>к</sub>. Зарисовать полученную осциллограмму напряжения u<sub>с</sub>(t).

2.2.7 Увеличить сопротивление цепи R в 2 раза по сравнению с критическим. Зарисовать осциллограммы тока i(t) и напряжений u<sub>с</sub>(t), u<sub>L</sub>(t) при апериодическом разряде конденсатора.

### 2.3 Оформление и анализ результатов работы

2.3.1 Рассчитать коэффициент затухания α<sub>(расч)</sub> и частоту собственных колебаний ω<sub>св(расч)</sub> по заданным значениям R<sub>конт</sub>= R+ R<sub>к</sub>, L, C (пункт 2.2.2). 2.3.2 По полученному изображению кривой напряжения u<sub>с</sub>(t) (пункт 2.2.4) рассчитать экспериментальные значения α<sub>(эксп)</sub> и ω<sub>св(эксп)</sub>.

2.3.3 Рассчитать критическое сопротивление R<sub>кр(расч)</sub> согласно варианту. 2.3.4 Сделать выводы по проделанной работе: сравнить расчётные значения α, ω<sub>св</sub>, R<sub>кр</sub> с экспериментальными, проанализировать влияние величины сопротивления R<sub>конт</sub> на характер разряда конденсатора.

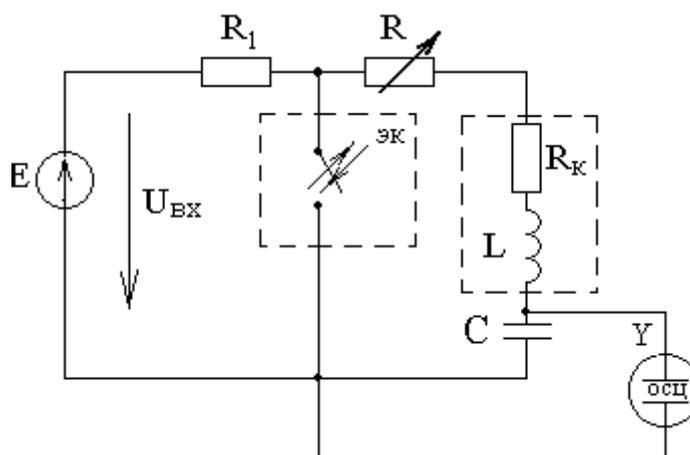


Рисунок 2.1 - Экспериментальная схема цепи RLC

Таблица 2.1-Параметры цепи RLC

№ варианта	R, Ом	L, мГн	C, мкФ 90
1	1	10	4
2	1	20	3
3	1	20	2
4	1	15	2
5	1	10	3

#### Методические указания

Коэффициент затухания α(расч), частота собственных (свободных) колебаний ω<sub>св(расч)</sub> и критическое сопротивление R<sub>кр(расч)</sub> определяется по формулам

$$\alpha(\text{расч}) = \frac{R_{\text{конт}}}{2L}; \quad \omega_{\text{св(расч)}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_{\text{конт}}}{2L}\right)^2}; \quad R_{\text{кр(расч)}} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

Экспериментальные значения α(эксп.) и ω<sub>св(эксп.)</sub> определяются по полученной кривой напряжения u<sub>с</sub>(t).

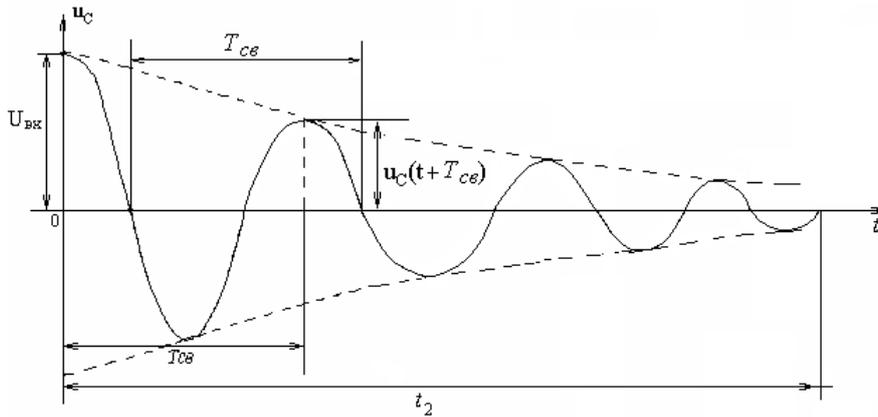


Рисунок 2.2 - Зависимость  $U_c(t)$  при колебательном конденсаторе

Частоту свободных колебаний  $\omega_{св(эксп)}$  можно рассчитать по формуле

$$\omega_{св} = 2\pi f_{св} = \frac{2\pi}{T_{св}},$$

где  $T_{св}$  определяется по осциллограмме, масштаб по оси времени находится так же, как и в лабораторной работе № 9;

$t_2$ - время, в течение которого ЭК замкнут.

Экспериментальное значение  $\alpha(эксп.)$  рассчитывается по логарифмическому декременту колебания

$$\alpha_{(эксп.)} = \frac{1}{T_{св}} \ln \frac{u_c(t)}{u_c(t + T_{св})};$$

$u_c(t)$  удобно взять для момента времени  $t = 0$ ,

где  $u_c(0) = U_{вк}$ .

## Лабораторная работа № 10 Исследование пассивных симметричных фильтров

Цель работы: получение навыков экспериментального исследования простейших низкочастотных (ФНЧ) и высокочастотных (ФВЧ) фильтров.

### 3.1 Подготовка к работе

91

Повторить разделы курса ТОЭ «Четырехполюсники» и «Фильтры».

[Л.1] с.165-170; 190-199.

[Л.3] с.132-142; 308-316.

Ответить на следующие вопросы:

- 1) Какие типы фильтров вы знаете?
- 2) Дайте понятия низкочастотного, высокочастотного, полосного и заграждающего фильтров.
- 3) Дайте определение вторичных параметров фильтров. В каких единицах они измеряются?
- 4) Что такое область пропускания и область затухания идеального фильтра?
- 5) Что такое согласованный режим работы фильтра?
- 6) Привести П-образную и Т-образную схемы ФНЧ?
- 7) Привести П-образную и Т-образную схемы ФВЧ?
- 8) Привести графики зависимостей для  $a(\omega)$  и  $b(\omega)$  ФНЧ.
- 9) Привести графики зависимостей для  $a(\omega)$  и  $b(\omega)$  ФВЧ.
- 10) Привести расчётные формулы  $f_{ср}$  и  $\rho$  для ФНЧ.
- 11) Привести расчётные формулы  $f_{ср}$  и  $\rho$  для ФВЧ.

### 3.2 Порядок выполнения работы

3.2.1 Собрать цепь (см. рисунок 3.1), включив в неё исследуемый фильтр согласно заданному варианту (см. рисунок 3.2). Величину сопротивления нагрузки  $R_n$  установить равной  $\rho$ .

3.2.2 Установить значения  $U_1$ ,  $L$  и  $C$  согласно варианту (см. таблицу 3.2). 3.3.3 Изменяя частоту звукового генератора, измерить напряжение  $U_2$  на выходе фильтра. Для ФНЧ изменять частоту в пределах от  $f=0,1f_{ср}$  до  $f=2f_{ср}$ .

Для ФВЧ изменять частоту в пределах от  $f=2f_{ср}$  до  $f=0,1f_{ср}$ . В зоне пропускания снять 5-6 точек, в зоне затухания – 5-6 точек. Напряжение на входе фильтра  $U_1$  поддерживать постоянным. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

3.2.4 Собрать схему для измерения коэффициента фазы  $b(f)$ . Для этого сигнал с входа подать на вертикальные пластины осциллографа, а выходной сигнал – на горизонтальные пластины, синхронизация “внешняя”. При этом на экране осциллографа появится эллипс, форма которого зависит от частоты  $f$  звукового генератора.

3.2.5 Измерить параметры эллипса ( $A$  и  $X_0$ ) или ( $B$  и  $Y_0$ ) при тех же частотах, что и в пункте 3.3.3.

### 3.3 Оформление и анализ результатов работы

3.3.1 Рассчитать  $f_{ср}$  и  $\rho$  согласно варианту (см. таблицу 3.2).

3.3.2 Рассчитать коэффициент затухания  $a(f)$  и коэффициент фазы  $b(f)$ , построить экспериментальные графики  $a(f)$  и  $b(f)$  по данным таблицы 3.1.

3.3.3 Построить теоретические графики  $a(f)$  и  $b(f)$  (см. таблицы 3.3 или 3.4).

3.3.4 Сделать выводы о проделанной работе: сравнить теоретические графики  $a(f)$  и  $b(f)$  с экспериментальными и объяснить их различие, проанализировать зависимость  $a(f)$  и  $b(f)$  в полосе пропускания и в полосе задерживания.

Таблица 3.1-Результаты измерений

$U_1 =$ $L =$		$C =$		$f_{ср} =$ $R_n = \rho =$	
$f$ , Гц	$U_2$ , В	$A(B)$	$X_0(Y_0)$	$a$ , Нп	$b$ , град
					92
$f_1$					
$f_2$					
$f_3$					
$f_4$					
$f_5$					
$f_6$					
$f_7$					
$f_8$					
$f_9$					
$f_{10}$					

Таблица 3.2-Параметры фильтров

№ варианта	Тип Фильтра	Схема фильтра	U <sub>1</sub> (В)	L(мГн)	C(мкФ)
1	ФНЧ	Т-схема	2	100	0,5
2	ФВЧ	Т-схема	3	70	0,5
3	ФНЧ	П-схема	3	20	0,5
4	ФВЧ	П-схема	2	15	0,5
5	ФНЧ	Т-схема	4	40	0,25

Таблица 3.3-Теоретические зависимости для ФНЧ

ФНЧ	f/f <sub>0</sub>	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
	а,Нп	0	0	0	0	0	0	0	0	0,90	1,26
	+в, град	23	47	60	74	90	106	130	180	180	180
ФНЧ	f/f <sub>0</sub>	1,3	1,5	1,6	2,0	3,0	4,0				
	а,Нп	1,52	1,94	2,30	2,74	3,60	4,16				
	+в, град	180	180	180	180	180	180				

Таблица 3.4-Теоретические зависимости для ФВЧ

ФВЧ	f/f <sub>0</sub>	0,25	0,5	0,67	0,83	0,9	1	1,25	1,43	1,67	2	2,5	5
	а,Нп	4,1	2,74	1,94	1,26	0,9	0	0	0	0	0	0	0
	-в, град	180	180	180	180	180	180	106	90	74	60	47	23

Методические указания по проведению работы

При согласовании фильтра с нагрузкой напряжения входа U<sub>1</sub> и выхода U<sub>2</sub> связаны соотношением

$$\frac{U_1}{U_2} = e^g = e^{\alpha} e^{jb},$$

откуда коэффициент затухания  $\alpha = \ln \frac{U_1}{U_2}$ ,

а коэффициент фазы  $b = \psi_1 - \psi_2$ ,

где  $\psi_1$  и  $\psi_2$  – начальные фазы соответственно входного и выходного напряжений.

При снятии характеристики a(f) напряжение на входе фильтра можно поддерживать одинаковым с помощью ручки «регулирование выходного напряжения» звукового генератора.

Для снятия характеристики b(f) используется осциллограф. После включения питания осциллографа и регулировки яркости и фокуса светящаяся точка устанавливается точно в центре экрана ручками горизонтального и вертикального перемещения луча. Для получения одинакового усиления по вертикали и по горизонтали одно и то же напряжение от звукового генератора, например, 1В, подаётся по очереди на отклоняющие по вертикали и отклоняющие по горизонтали пластины осциллографа, и соответствующими ручками “усиление” по вертикали, а затем по горизонтали устанавливается одинаковая длина светящейся линии на экране.

После такой регулировки для определения коэффициента фазы выходное напряжение  $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$  подаётся к отклоняющим по горизонтали пластинам, а входное  $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$  – к

отклоняющим по вертикали. На экране осциллографа будет виден эллипс (см. рисунок 3.3) или в частном случае – прямая.

Угол  $\psi_1$  определяется из выражения

$$\sin / \psi_1 / = \frac{X_0}{A} = \frac{Y_0}{B}.$$

Если большая ось эллипса расположена в 1-ой и 3-ей четвертях, то

$$/ b / = / \psi_1 / = \arcsin \frac{X_0}{A} = \arcsin \frac{Y_0}{B}.$$

Если большая ось эллипса расположена в 2-ой и 4-ой четвертях, то

$$/ b / = / \psi_1 / = \pi - \arcsin \frac{X_0}{A} = \pi - \arcsin \frac{Y_0}{B}.$$

Знак коэффициента фазы  $b$  определяется по векторной диаграмме, построенной для фильтра при согласованной нагрузке.

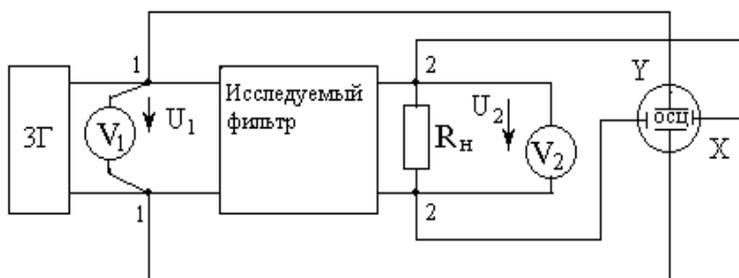


Рисунок 3.1 - Схема экспериментальной установки

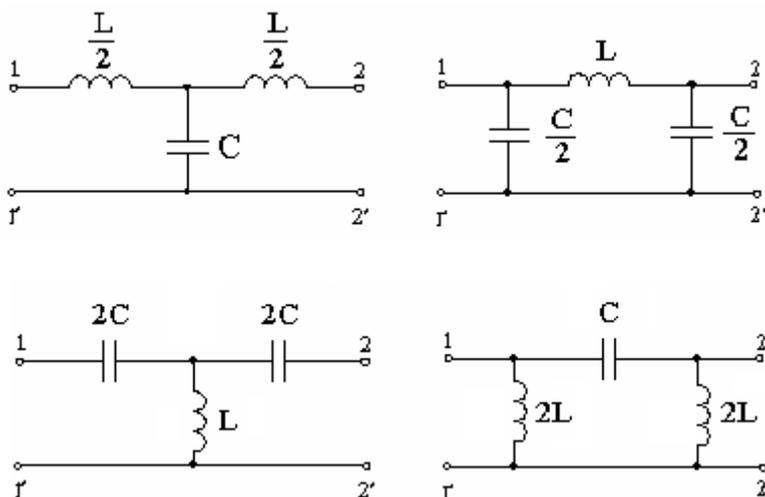


Рисунок 3.2 - Схемы Т и П-образных фильтров

Рисунок 3.3 - Экспериментальные осциллограммы

### Контрольные вопросы

1. Каковы причины возникновения переходных процессов в электрических цепях?
2. Как определяются свободные составляющие в цепях второго порядка?

3. Как формулируются первый и второй законы коммутации?
4. Что подразумевают под независимыми и зависимыми начальными условиями?
5. Как записывается свободная составляющая тока в последовательной **RLC**-цепи при апериодическом, критическом и колебательном переходном процессе?
6. Что такое частота свободных колебаний, как ее рассчитать?
7. Как влияют величины **L** и **C** на переходный процесс в последовательной **RLC**-цепи?
8. Как определить теоретически и экспериментально период свободных колебаний, декремент затухания?
9. Как получить формулу критического сопротивления в параллельной **RLC**-цепи?
10. Как определить переходные токи в индуктивности и емкости в параллельной **Ri, LC**-цепи?
11. Как влияет величина сопротивления в параллельной цепи на характер переходного процесса?

### Лабораторная работа №11

#### Тема: Исследование режимов работы однофазного трансформатора (XX, КЗ, под нагрузкой)

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, служащий для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения без изменения частоты.

Трансформатор был изобретен в 1876 году знаменитым русским электротехником П.Н. Яблочковым. Современные трансформаторы весьма разнообразны в своем исполнении и могут быть однофазными, трехфазными и специальными.

Трансформаторы получили распространение как устройства, позволяющие передавать электрическую энергию на большие расстояния без существенных энергетических потерь в линиях электропередач. С их помощью также осуществляется объединение источников электрической энергии переменного тока различных уровней напряжений в единую энергетическую систему.

Устройство трансформатора схематично показано на рис.1.

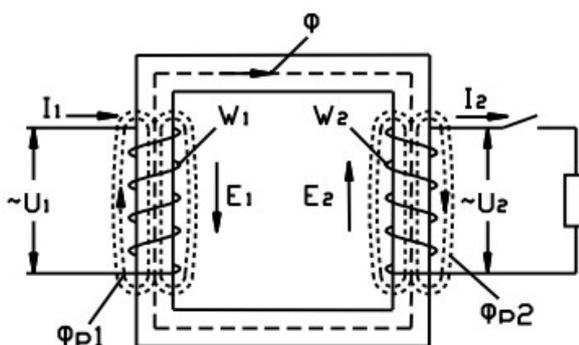


Рис.1

На замкнутом сердечнике, собранном из листовой стали, расположены две изолированные обмотки. К одной из них с числом витков  $W_1$  подводится электрическая энергия от источника переменного тока. Эта обмотка носит название первичной. От другой, вторичной обмотки с числом витков  $W_2$ , энергия отводится к нагрузке.

Передача электрической энергии от источника через трансформатор к нагрузке осуществляется посредством переменного магнитного потока  $\Phi$ , основная часть которого замыкается в стальном сердечнике, другая же часть его, проходя по воздуху, образует магнитные потоки рассеяния ( $\Phi_{р1}$ ,  $\Phi_{р2}$ ).

При включении первичной обмотки в сеть переменного тока в ней возникает переменный ток, который образует переменное магнитное поле. Это поле усиливается сердечником, и передается на вторичную обмотку трансформатора.

Под воздействием переменного магнитного потока в обеих обмотках, согласно принципу электромагнитной индукции возникает переменная ЭДС.

При этом ЭДС первичной обмотки называется ЭДС самоиндукции. Она ограничивает величину первичного тока трансформатора, так как направлена против приложенного напряжения. ЭДС вторичной обмотки называется ЭДС взаимоиндукции. Она является источником тока вторичной обмотки (тока нагрузки). Действующие значения ЭДС обмоток определяют формулами:

$$E_1 = 4,44 \cdot W_1 \cdot f \cdot \Phi_m \quad (1)$$

и

$$E_2 = 4,44 \cdot W_2 \cdot f \cdot \Phi_m, \quad (2)$$

где  $\Phi_m$  - амплитуда магнитного потока;  $W_1, W_2$  - число витков первичной и вторичной обмоток;  $f$  - частота переменного тока.

Трансформатор может работать только на переменном токе, так на постоянном токе ( $f = 0$ ) ЭДС в его обмотках не возникает.

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

### Режим холостого хода

Режим холостого тока проводится при разомкнутой цепи вторичной обмотки ( $I_{20} = 0$ ). Это условие приближенно соблюдается также при подключении к вторичной обмотке трансформатора вольтметра.

Уравнения электрического равновесия в исследуемом режиме могут быть записаны:

$$\vec{U}_{10} = (-E_1) + I_{10} \cdot Z_1 \quad \text{и} \quad \vec{U}_{20} = E_2 - I_{20} \cdot Z_2,$$

где  $I_{10}$  - ток первичной обмотки при холостом ходе, который не превышает 5-10%  $I_{1H}$  ( $I_{1H}$  - номинальное значение тока первичной обмотки).

Так как  $I_{10}$  мал, а  $I_{20} = 0$ , то можно считать, что  $U_1 \approx E_1$  и  $U_2 \approx E_2$ .

Важно отметить, что при режиме холостого хода значительно снижается  $\cos\phi$  электрических цепей, а, следовательно, этот режим является недопустимым при эксплуатации трансформаторов.

Помимо определения коэффициента трансформации определяется мощность холостого хода, которая фактически равна магнитным потерям трансформатора, так как ток первичной обмотки очень мал, потерями энергии на нагревание обмотки можно пренебречь. Мощность магнитных потерь пропорциональна  $U_1^2$ , а поскольку в опыте холостого хода  $U_{10} = U_{\text{ном}}$ , значит магнитные потери, определяемые в этом опыте равны номинальным магнитным потерям  $P_{\text{маг}}$ .

### Режим нагрузки трансформатора.

96

Данный режим работы определяется уравнениями электрического равновесия обмоток трансформатора, полученными на основе 1 закона Кирхгофа:

$$\vec{U}_1 = (-E_1) + I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot X_1 \quad \text{для 1-ой обмотки,}$$

$$\vec{U}_2 = E_2 - I_2 \cdot R_2 - I_2 \cdot X_2 \quad \text{для 2-ой обмотки,}$$

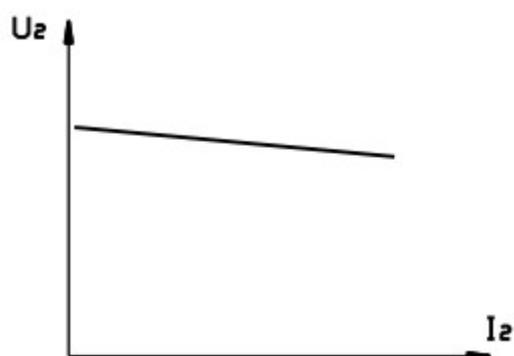


Рис.2

где:  $R_1, R_2$  – активные сопротивления обмоток;  
 $X_1, X_2$  – реактивные сопротивления обмоток.

В режиме нагрузки определяется внешняя характеристика трансформатора (рис.2):  $U_2 = f(I_2)$ , при  $U_1 = \text{const}$ ,  $\cos\phi = \text{const}$ , в основе которой лежит уравнение (6).

Процентное падение напряжения на вторичной обмотке:

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_2} \cdot 100$$

где:  $U_{20} \approx E_2$  при  $I_2 = 0$ .

При номинальной нагрузке оно обычно лежит в пределах 4-6%.

Связь между токами обмоток ( $I_1$  и  $I_2$ ) можно выявить из уравнения намагничивающих сил ( $I \cdot W$ ) трансформатора:

$$\vec{I}_1 \cdot W_1 + \vec{I}_2 \cdot W_2 = \vec{I}_{10} \cdot W_1$$

Из этого можно получить уравнение токов, деля его почленно на  $W_1$ , тогда:

$$\vec{I}_1 = (-I_2 \cdot W_2 / W_1) + I_{10} = I'_2 + I_{10} \quad (8)$$

где  $I_{10}$  - ток холостого хода 1-ой обмотки, а  $I'_2 = (-I_2 \cdot W_2 / W_1)$  – называется приведенным током вторичной обмотки. Обычно  $I_{10}$  очень мал, и можно считать приближенно  $I_1 \approx I'_2$ . С увеличением  $I_2$ , а, следовательно и  $I_2 \cdot W_2$ , возрастает и ток  $I_1$ . При этом размагничивающее действие тока  $I_2$  компенсируется намагничивающим действием тока  $I_1$ , в результате чего магнитный поток трансформатора остается при его работе практически постоянным (при  $U_1 = \text{const}$ ).

### Режим короткого замыкания

Опыт короткого замыкания нельзя путать с режимом короткого замыкания, который возникает при номинальном напряжении первичной обмотки. Режим короткого замыкания – аварийный режим работы трансформатора. Опыт же короткого замыкания проводится при очень небольшом напряжении  $U_{1к.з.}$ , которое подбирается таким образом, чтобы токи первичной и вторичной обмоток соответствовали номинальным токам обмоток (в диапазоне 3 – 10 % от  $U_{1ном.}$ ).

Опыт проводится при коротком замыкании вторичной обмотки (которая замыкается на амперметр, имеющий очень низкое сопротивление). Вся мощность, потребляемая трансформатором, практически идет на компенсацию электрических потерь при нагревании обмоток.

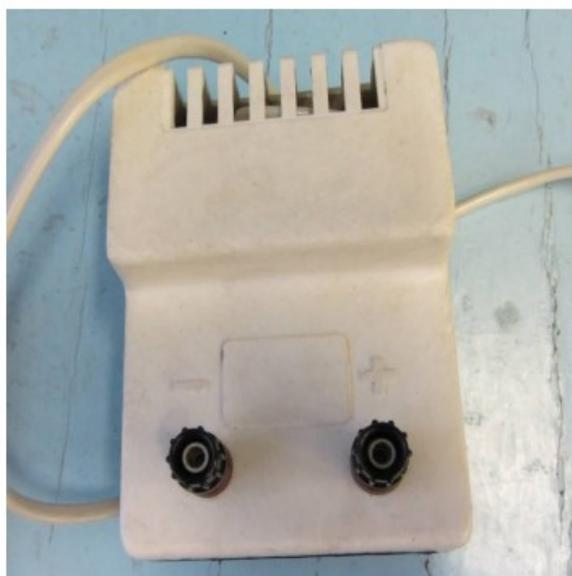
$$P_{к.з.} = P_{эл} = I_{1к.з.}^2 \cdot R_1 + I_{2к.з.}^2 \cdot R_2$$

На основании опытов холостого хода и короткого замыкания определяется КПД трансформатора  $\eta$ :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{маг} + P_{эл}}, \text{ где } P_{эл}, P_{маг} - \text{электрические и магнитные потери соответственно.}$$

### ОБОРУДОВАНИЕ

Трансформатор 36/4 В



Блок питания В-24 м



Мультиметры MY62

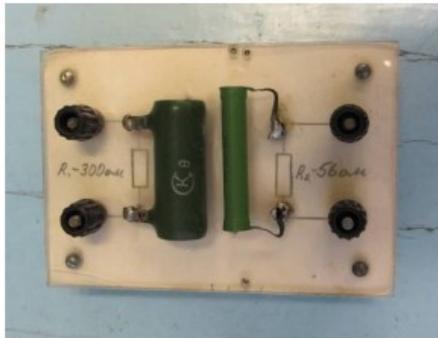


Реостат



98

Резистор ( R1)



Осциллограф



Ваттметр



99

Соединительные провода



## ХОД РАБОТЫ

1. Собрать измерительную схему (рис. 6).

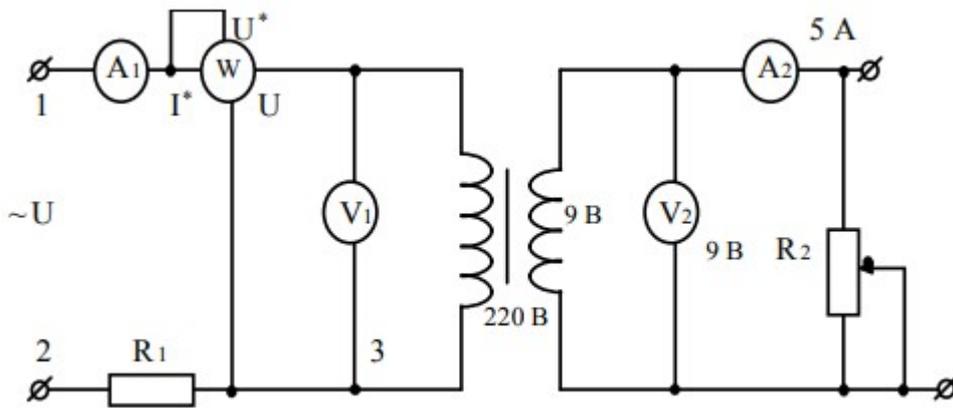


Рис. 6. Измерительная схема.

2. Осуществить режим холостого хода трансформатора при номинальном напряжении на первичной обмотке. Снять осциллограмму тока холостого хода и измерить его величину (Для снятия осциллограммы осциллограф подключить к клеммам 2 и.3).
3. Осуществить режим короткого замыкания при нормальном токе во вторичной обмотке трансформатора. Определить величину напряжения и тока в первичной обмотке трансформатора.
4. Снять нагрузочную характеристику трансформатора при номинальном напряжении на первичной обмотке, при изменении величины активной нагрузки R2.
5. Рассчитать коэффициент полезного действия.