

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 19.08.2024 14:26:57

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d79e5f1c11eabff77e947df4a4851f1b56cd989

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
« 8 » 08 2019 г.



ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Методические указания
по выполнению лабораторной работы
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
по дисциплине «Теория электрических цепей»

Курск 2019

УДК 681.325

Составители: А.Ф. Рыбочкин, Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор
кафедры космического приборостроения и систем связи

В.Г. Андронов

Исследование линейных цепей при гармоническом воздействии: методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория электрических цепей» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.Ф. Рыбочкин, Д.С. Коптев. – Курск, 2019. – 31 с.: ил. 24, табл. 1. – Библиогр.: с. 31.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат описание алгоритма анализа линейных цепей методом комплексных амплитуд. Показан способ исследования цепей в системе компьютерного моделирования Multisim. Указывается порядок выполнения лабораторной работы.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Теория электрических цепей», и учебного плана по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплине «Теория электрических цепей» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *8.02.19*. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 1,8. Уч.-изд. л. 1,63. Тираж 100 экз. Заказ *43* Бесплатно
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	4
3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
3. 1. Комплексные числа. Формы представления.....	4
3. 2. Комплексное представление гармонических функций	6
3. 3. Символический метод комплексных амплитуд.....	11
3. 4. Идеальные пассивные элементы при гармоническом воздействии.....	16
3. 5. Примеры расчета простейших последовательных цепей при гармоническом воздействии	21
4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	24
4. 1. Анализ последовательной RL-цепи	24
4. 2. Анализ последовательной RC-цепи	28
5. ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.....	30
6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	31
7. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	31

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение символического метода комплексных амплитуд применительно к анализу линейных цепей при гармоническом воздействии:

- построение комплексных схем замещения и векторных диаграмм для простейших линейных цепей;
- расчет комплексных напряжений и токов в цепях.

2. Построение графиков токов и напряжений в линейных цепях в системе компьютерного моделирования Multisim с использованием функции Transient Analysis.

2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к выполнению лабораторной работы следует:

- изучить теоретический материал, содержащийся в методических указаниях;
- ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

При подготовке к защите лабораторной работы необходимо:

- оформить отчет в соответствии с разделом 5;
- ознакомиться с соответствующими разделами конспекта лекций и рекомендованной литературой;
- устно подготовить ответы на контрольные вопросы.

3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1. Комплексные числа. Формы представления

3.1.1. Понятие комплексного числа. Алгебраическая форма записи комплексных чисел. Комплексное число в алгебраической записи – это выражение вида

$$A = A' + jA'', \quad (1)$$

где $A' = \operatorname{Re}[A]$ – действительная составляющая,

$A'' = \operatorname{Im}[A]$ – мнимая составляющая комплексного числа.

$j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

3. 1. 2. Геометрическое представление комплексных чисел. Наряду с алгебраической формой записи комплексных чисел (1), используют их геометрическое представление на *комплексной плоскости* (см. рис. 1, а), ось абсцисс которой называется вещественной осью, ось ординат – мнимой.

В этом случае комплексное число изображается в виде вектора, проведенного из начала координат в точку A с абсциссой $\text{Re}[A]$ и ординатой $\text{Im}[A]$.

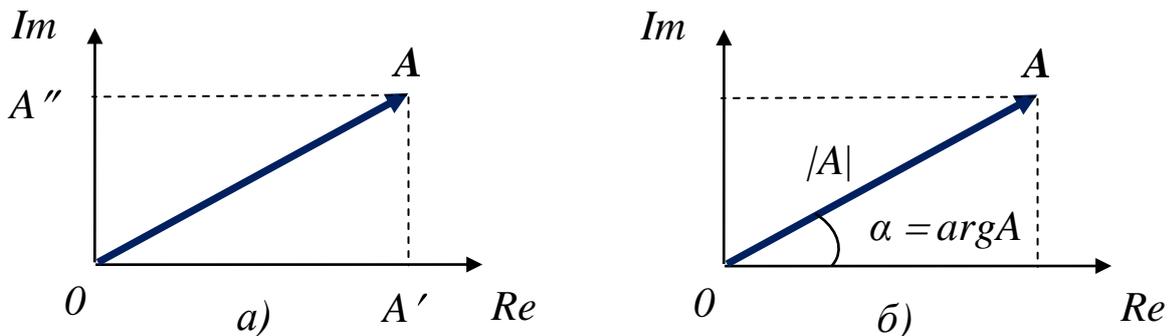


Рисунок 1

Длину изображающего вектора называют *модулем* числа A , угол между этим вектором и положительным направлением вещественной оси – *аргументом* числа A (см. рис. 1, б).

Модуль и аргумент комплексного числа определяются по его действительной и мнимой составляющим следующим образом:

$$\begin{aligned} |A| &= \sqrt{(A')^2 + (A'')^2}; \\ \alpha = \arg A &= \arctg \frac{A''}{A'}. \end{aligned} \quad (2)$$

3. 1. 3. Тригонометрическая форма записи комплексных чисел. Выражение действительной и мнимой составляющих комплексных чисел через их модуль и аргумент также не представляет сложности:

$$A' = \text{Re}[A] = |A| \cdot \cos \alpha; \quad A'' = \text{Im}[A] = |A| \cdot \sin \alpha. \quad (3)$$

Из (3) следует *тригонометрическая* форма записи комплексных чисел:

$$A = |A| \cdot \cos \alpha + j |A| \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

3. 1. 4. Показательная форма записи комплексных чисел.
Вспомнив *формулу Эйлера*:

$$e^{j\alpha} = \cos\alpha + j \sin\alpha, \quad (5)$$

легко из выражения (4) перейти к *показательной* форме записи комплексного числа:

$$A = |A| \cdot e^{j\alpha}. \quad (6)$$

Именно выражение (6) используется для представления гармонических функций времени.

3. 2. Комплексное представление гармонических функций

3. 2. 1. Понятие гармонической функции. Функция времени называется гармонической, если её значения подчиняются синусоидальному или косинусоидальному закону:

$$a(t) = A_m \sin(\omega t + \psi'), \quad (7)$$

$$a(t) = A_m \cos(\omega t + \psi). \quad (8)$$

В электротехнике принята форма записи (7), в радиотехнике и теории цепей – (8). Обе они эквивалентны при условии

$$\psi' = \frac{\pi}{2} + \psi.$$

В (8) A_m – амплитуда функции (её максимальное значение);

$\theta = \omega t + \psi$ – мгновенная фаза (или просто фаза);

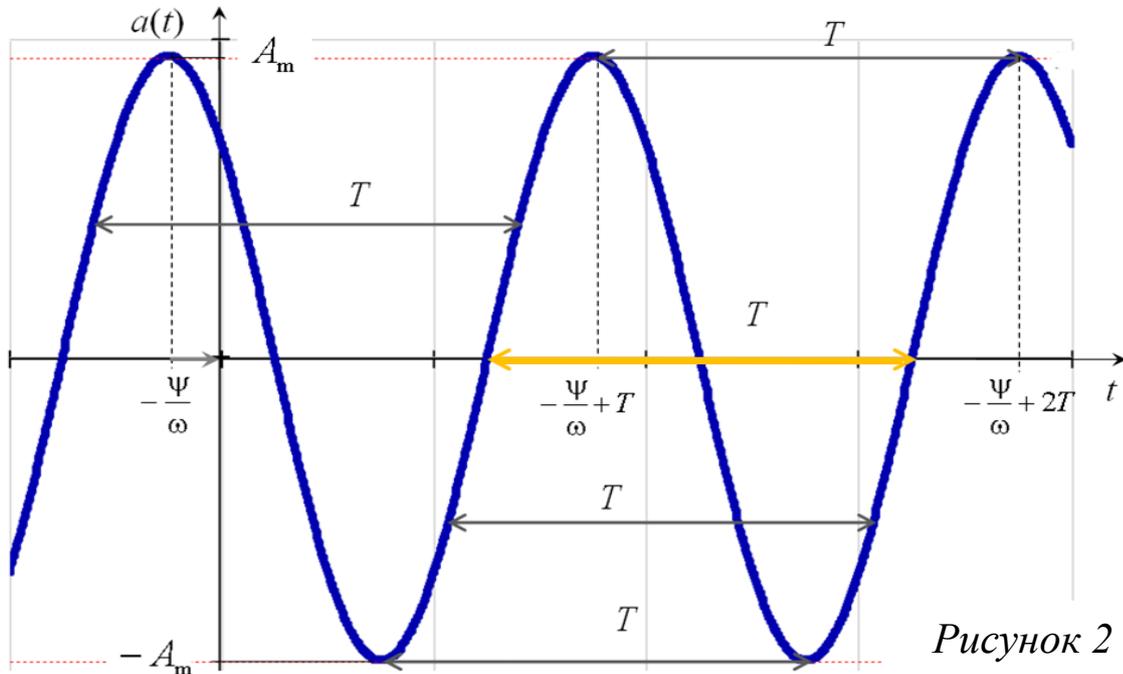
ω – угловая (круговая) частота;

ψ – начальная фаза.

Начальная и мгновенная фазы измеряются в радианах (рад).
Угловая частота – в радианах в секунду (рад/с).

3. 2. 2. Графическое изображение гармонической функции во временной области. График гармонической функции (8) показан на рис. 2. По оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат – значения функции $a(t)$ в единицах изменяющейся вели-

чины. Амплитуда функции A_m равна по модулю её минимальному значению ($-A_m$).



Как видно из графика, гармонические функции являются периодическими – любые их значения повторяются через некоторые равные промежутки времени T , называемые *периодом функции*:

$$a(t) = a(t+T) = a(t+2T) = \dots = a(t+nT), \quad (9)$$

где n – произвольное целое число.

Частотой периодической функции называется величина, обратная её периоду.

$$f = \frac{1}{T}. \quad (10)$$

Частота f измеряется в герцах (Гц): $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$, и связана с круговой частотой ω следующим соотношением:

$$\omega = 2\pi f. \quad (11)$$

Отсюда следует

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (12)$$

Если начальная фаза гармонической функции *положительная* ($\psi > 0$), то точка ближайшего максимума смещена относительно начала координат *влево*, если *отрицательная* – то *вправо*. С учетом знака получаем, что абсцисса t_m точки ближайшего максимума будет равна $t_m = -\psi/\omega$ ($\omega t_m + \psi = 0$).

Гармоническая функция, показанная на рис. 2, очевидно имеет положительную начальную фазу. У функции $a_2(t)$ (см. рис. 3) начальная фаза отрицательная.

3. 2. 3. Определение сдвига фаз двух гармонических функций одинаковой частоты. Рассмотрим две гармонические функции $a_1(t)$ и $a_2(t)$, имеющие одинаковую круговую частоты ω , но различные амплитуды A_{m1} и A_{m2} , и начальные фазы ψ_1 и ψ_2 (см. рисунок 3):

$$\begin{aligned} a_1(t) &= A_{m1} \cos(\omega t + \psi_1); \\ a_2(t) &= A_{m2} \cos(\omega t + \psi_2). \end{aligned} \tag{13}$$

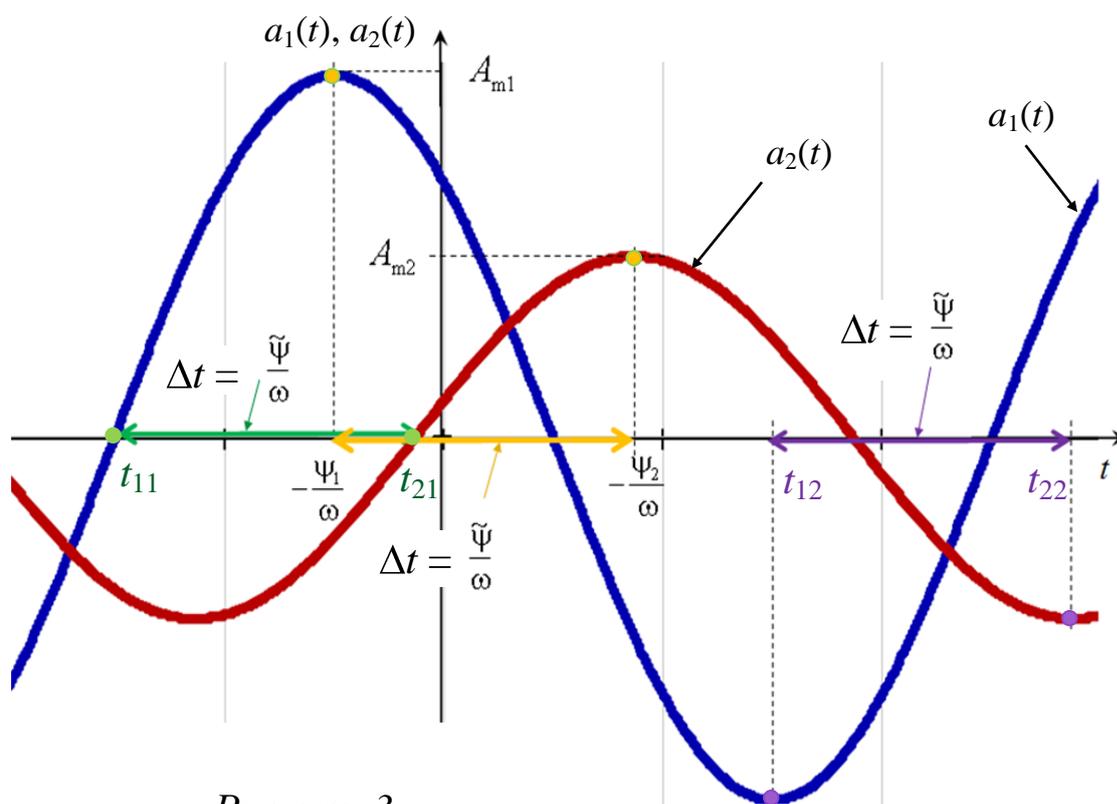


Рисунок 3

Для определения сдвига фаз $\tilde{\psi}$:

$$\tilde{\psi} = (\omega t + \psi_1) - (\omega t + \psi_2) = \psi_1 - \psi_2 \quad (14)$$

двух гармонических функций (8д) необходимо:

1) определить абсциссы *любых* двух точек этих функций, находящихся в *одной* фазе.

На рис. 1 точки с абсциссами $-\psi_1/\omega$ и $-\psi_2/\omega$ (выделены оранжевым цветом) находятся в нулевой фазе: $A_m \cos 0 = A_m$.

Точки с абсциссами t_{11} и t_{21} (выделены зеленым цветом) находятся в фазе, равной $\pi/2$: $A_m \cos(\pi/2) = 0$.

Точки с абсциссами t_{12} и t_{22} (выделены фиолетовым цветом) находятся в фазе, равной $3\pi/2$: $A_m \cos(3\pi/2) = -A_m$.

2) рассчитать разность между этими абсциссами:

$$\Delta t = t_{21} - t_{11} = t_{22} - t_{12} = -\frac{\psi_1}{\omega} + \frac{\psi_2}{\omega}. \quad (15)$$

3) умножить полученный временной интервал на круговую частоту:

$$\tilde{\psi} = \Delta t \cdot \omega. \quad (16)$$

Очевидно, функция $a_1(t)$ опережает по фазе функцию $a_2(t)$. Поскольку частота этих функций одинакова, разность их фаз постоянна и равна разности начальных фаз.

Две гармонические функции одинаковой частоты *совпадают по фазе* (являются синфазными), если разность их начальных фаз $\tilde{\psi} = 0$ (см. рис. 4, а), и находятся в *противофазе*, если $\tilde{\psi} = \pm\pi$ (см. рис. 4, б).

3.2.2. Мгновенный комплекс гармонической функции. Любой функции, заданной в форме (8), можно поставить в соответствие комплексное число

$$\underline{a} = A_m e^{j(\omega t + \psi)}. \quad (17)$$

Число \underline{a} , называемое *мгновенным (текущим) комплексом* гармонической функции $a(t)$, имеет модуль, равный её амплитуде, и аргумент, равный её фазе.

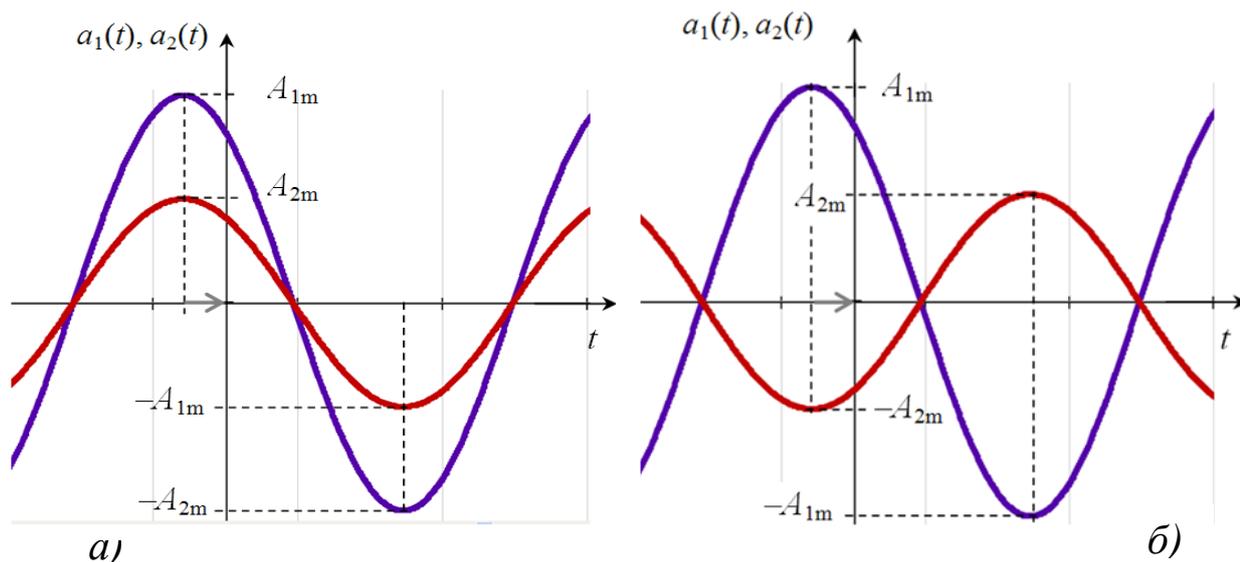


Рисунок 4

Воспользуемся формулой Эйлера (5) и представим мгновенный комплекс (9) в виде:

$$\underline{a} = A_m [\cos(\omega t + \psi) + j \sin(\omega t + \psi)]. \quad (18)$$

Из (18) с очевидностью следует, что действительная составляющая мгновенного комплекса \underline{a} как раз и равна исходной функции $a(t)$:

$$a(t) = A_m \cos(\omega t + \psi) = \operatorname{Re}[\underline{a}]. \quad (19)$$

3. 2. 3. Комплексная амплитуда гармонической функции.

По определению, комплексная амплитуда \dot{A}_m гармонической функции времени (8) – это комплексное число, модуль которого равен амплитуде этой функции, а аргумент – её начальной фазе [1]:

$$\dot{A}_m = \underline{a}|_{t=0} = A_m e^{j\psi}. \quad (20)$$

Геометрическая интерпретация комплексной амплитуды приведена на рис (5, а).

3. 2. 4. Выражение гармонической функции через её комплексную амплитуду. Перепишем мгновенный комплекс (17) в форме:

$$\underline{a} = A_m e^{j(\omega t + \psi)} = A_m e^{j\omega t} e^{j\psi} = \dot{A}_m e^{j\omega t}. \quad (21)$$

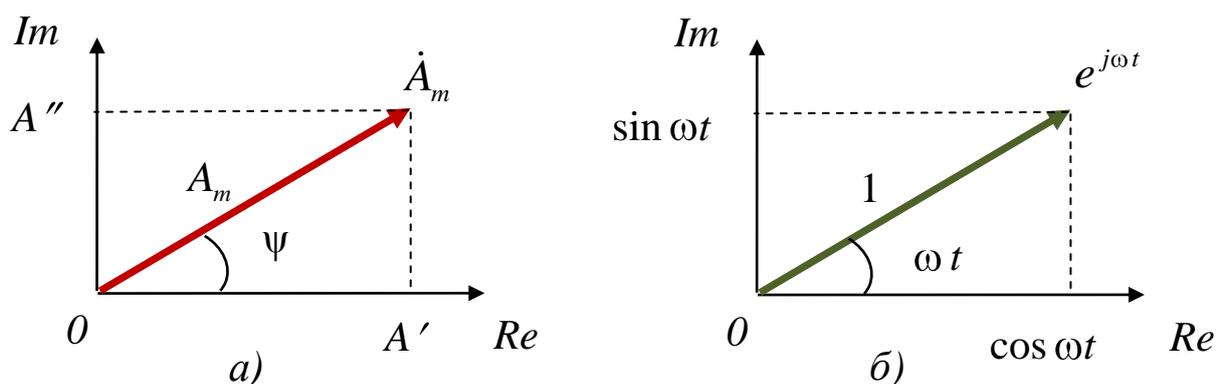


Рисунок 5

Отсюда с учетом (19) следует:

$$a(t) = \operatorname{Re}[\underline{a}] = \operatorname{Re}[\dot{A}_m e^{j\omega t}]. \quad (22)$$

Второй сомножитель в квадратных скобках $e^{j\omega t}$ – *оператор вращения*. Это вектор, имеющий единичную длину и «вращающийся» в комплексной плоскости против часовой стрелки с угловой скоростью ω (см. рис. 5, б).

Комплексную амплитуду \dot{A}_m рассматривают как *изображение гармонической функции* времени $a(t)$ на комплексной плоскости. Сама функция $a(t)$ называется *оригиналом*.

3.3. Символический метод комплексных амплитуд

Символический метод комплексных амплитуд (иногда называемый просто комплексным методом) базируется на представлении гармонических функций времени в символической форме с помощью комплексных чисел [1].

Тем самым исходная функция из временной области (области вещественного аргумента t) смещается в частотную область (область мнимого аргумента $j\omega$).

3.3.1. Математическая модель процессов в электрической цепи. Режим работы, при котором все токи и напряжения электрической цепи являются периодическими функциями времени, называется *установившимся*.

При этом постоянные токи и напряжения, рассматриваются как частный случай периодических функций, с частотой $f=0$ и периодом $T=\infty$.

Режим работы цепи, при котором токи и напряжения не меняются по периодическому закону, называется *неустановившимся*. Частным случаем такого процесса является *переходный процесс* – процесс перехода от одного установившегося режима к другому.

Процессы в реальных цепях можно описать периодическими функциями лишь приближенно, поскольку реальные переходные процессы затухают бесконечно медленно.

Поэтому представление токов и напряжений в виде периодических (в частном случае, гармонических) функций времени является приближенной *математической моделью* (описанием на языке математики) реальных процессов в электрической цепи [1].

3.3.2. Комплексные изображения токов и напряжений.

Токи и напряжения различных ветвей электрической цепи, находящейся под гармоническим воздействием, в установившемся режиме являются функциями гармоническими времени одной частоты и отличаются лишь своими амплитудами.

Следовательно, оператор вращения $e^{j\omega t}$ (см. 22) для комплексных изображений этих функций будет общим, а вся специфическая информация будет содержаться только в их комплексных амплитудах \dot{U}_m и \dot{I}_m :

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_U}, \quad \dot{I}_m = I_m e^{j\psi_I}, \quad (23)$$

определяемых по вещественным амплитудам U_m и I_m и начальным фазам ψ_U и ψ_I .

3.3.3. Комплексное сопротивление. Идеализированный пассивный двухполюсник – это участок цепи без источников энергии, имеющий два внешних зажима (см. далее рис. 4, а).

Комплексным сопротивлением Z (комплексным входным сопротивлением) такого участка цепи называется отношение комплексной амплитуды напряжения на зажимах к комплексной амплитуде тока.

Таким образом,

$$Z = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m}. \quad (24)$$

Из (24) следует:

$$Z = \frac{U_m e^{j\psi_U}}{I_m e^{j\psi_I}} = \frac{U_m}{I_m} e^{j(\psi_U - \psi_I)}. \quad (25)$$

Поскольку, как и любое комплексное число, комплексное сопротивление можно представить в показательной форме:

$$Z = z \cdot e^{j\varphi}, \quad (26)$$

из (25) получаем:

$$z = |Z| = \frac{U_m}{I_m}, \quad \varphi = \arg Z = \psi_U - \psi_I. \quad (27)$$

Аргумент φ определяет сдвиг фаз между током в цепи и напряжением источника питания (см. п. 3.2.3) и показывает характер сопротивления цепи.

Если φ положителен ($0 < \varphi < \pi/2$), ток отстает по фазе от напряжения и сопротивление цепи имеет *резистивно-индуктивный* характер (при $\varphi = \pi/2$ сопротивление чисто индуктивное).

Если аргумент φ отрицателен ($-\pi/2 < \varphi < 0$), ток опережает по фазе напряжение и сопротивление цепи имеет *резистивно-ёмкостный* характер (при $\varphi = -\pi/2$ сопротивление чисто ёмкостное).

И, наконец, если аргумент $\varphi = 0$ цепь имеет только *активное (резистивное)* сопротивление.

Модуль комплексного входного сопротивления участка цепи z носит название *полного входного сопротивления*.

3.3.4. Комплексная проводимость. *Комплексной проводимостью* (комплексной входной проводимостью) участка цепи называется величина, обратная его комплексному входному сопротивлению:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{\dot{I}_m}{\dot{U}_m}. \quad (28)$$

Комплексная проводимость в показательной форме.

$$Y = y e^{-j\vartheta}. \quad (29)$$

Из определения (28) следует:

$$y = |Y| = \frac{1}{|Z|} = \frac{1}{z} = \frac{I_m}{U_m}, \quad (30)$$

$$\vartheta = \arg Y = -\arg Z = -\varphi. \quad (31)$$

Аналогично полному входному сопротивлению, модуль комплексной входной проводимости y называется *полной входной проводимостью*.

3.3.5. Изображение комплексных сопротивлений и проводимости на комплексной плоскости. Представим комплексные сопротивление и проводимость в алгебраической форме:

$$Z = r + jx, \quad Y = g + jb. \quad (32)$$

Величины r и g представляют собой вещественные (*резистивные*) составляющие, а величины x и b – мнимые (*реактивные*) составляющие комплексного сопротивления и комплексной проводимости.

Изображение Z и Y на комплексной плоскости показано на рис. 6, а и б.

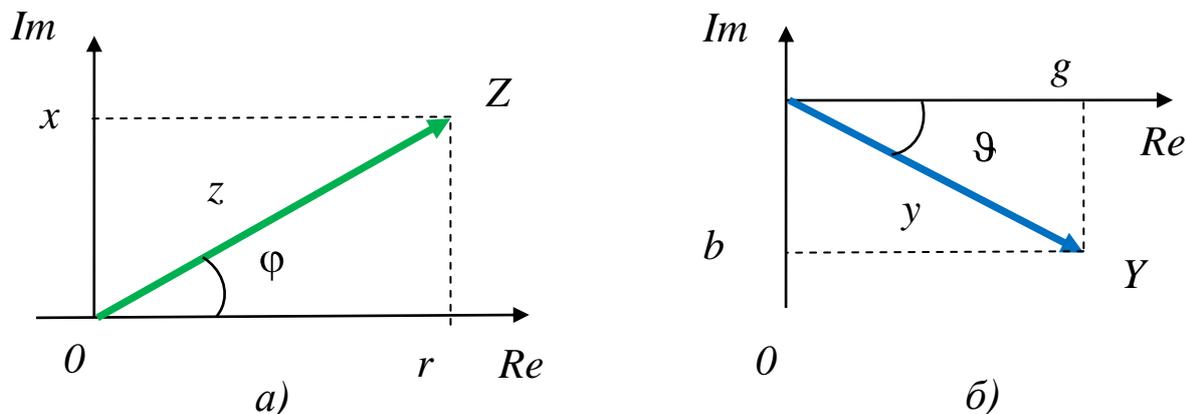


Рисунок 6

3.3.6. Комплексная схема замещения цепи. Любому изолированному пассивному двухполюснику (рис. 7, а) (в том числе и любому идеализированному пассивному элементу – сопротивлению, ёмкости и индуктивности) можно поставить в соответствие комплексную схему замещения.

В этой схеме участок цепи будет представлен комплексным сопротивлением или проводимостью, а токи и напряжения – комплексными амплитудами (см. рис. 7, б).

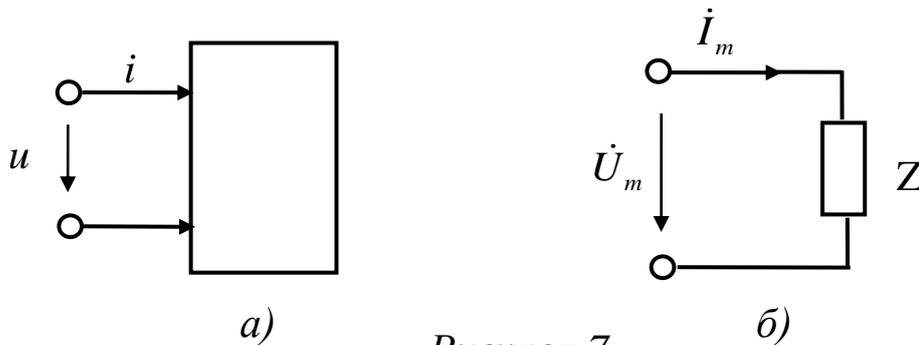


Рисунок 7

3.3.7. Закон Ома в комплексной форме. Зная комплексное сопротивление (или комплексную проводимость) участка цепи, можно по известному току найти приложенное к зажимам напряжение, или по известному напряжению определить ток в цепи:

$$\dot{U}_m = Z \dot{I}_m, \quad \dot{I}_m = Y \dot{U}_m. \quad (33)$$

Зависимости (33) представляют собой запись *закона Ома в комплексной форме*.

Закон Ома в комплексной форме выполняется также и для комплексных действующих значений тока и напряжения.

3.3.8. Законы Кирхгофа в комплексной форме. От законов Кирхгофа, выражающих зависимости между мгновенными значениями токов и напряжений цепи, можно перейти к зависимостям для их изображений, называемым *законами Кирхгофа в комплексной форме*.

Первый закон Кирхгофа: сумма комплексных амплитуд токов всех ветвей, подключенных к каждому из узлов цепи, равна нулю:

$$\sum_k^n \dot{I}_{mk} = 0, \quad (34)$$

где k – номер ветви, n – количество ветвей.

Второй закон Кирхгофа: сумма комплексных амплитуд напряжений всех ветвей, входящих в любой контур рассматриваемой цепи, равна нулю:

$$\sum_l^s \dot{U}_{ml} = 0, \quad (35)$$

где l – номер ветви, s – количество ветвей.

Законы Кирхгофа (также как и закон Ома) выполняются и для комплексных действующих значений напряжений и токов \dot{U} и \dot{I} :

$$\dot{U} = \frac{\dot{U}_m}{\sqrt{2}}; \quad \dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}}. \quad (36)$$

3.3.9. Алгоритм анализа цепи методом комплексных амплитуд:

- 1) замена всех гармонических токов и напряжений (оригиналов) их комплексными изображениями;
- 2) составление комплексной схемы замещения;
- 3) составление и решение уравнений равновесия цепи в комплексной форме с использованием выражений (33) – (35));
- 4) обратный переход от комплексных изображений к оригиналам.

3.4. Идеальные пассивные элементы при гармоническом воздействии

3.4.1. Резистивный элемент. При гармоническом воздействии ток, протекающий через идеализированный линейный резистор сопротивлением R , *совпадает по фазе* с напряжением:

$$\psi_I = \psi_U = \psi. \quad (37)$$

Мгновенные значения тока и напряжения выражаются зависимостями (см. рис. 8):

$$u_R = U_{mR} \cos(\omega t + \psi);$$

$$i_R = I_{mR} \cos(\omega t + \psi) = \frac{U_{mR}}{R} \cos(\omega t + \psi).$$
(38)

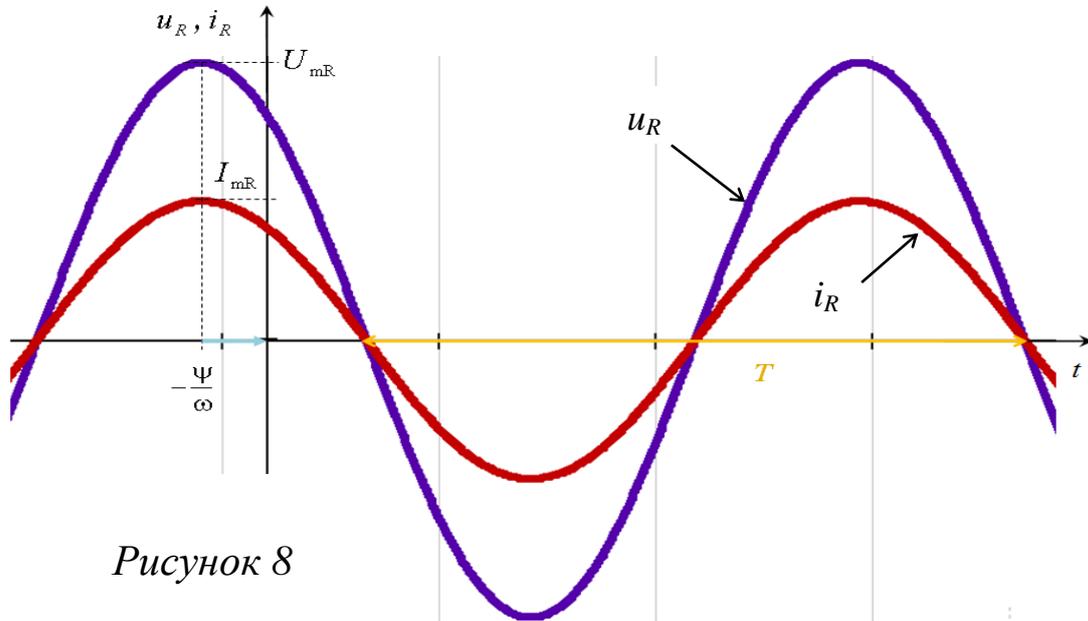


Рисунок 8

Комплексные амплитуды напряжения и тока резистивного элемента имеют одинаковые аргументы и отличающиеся в R раз модули (см. рис. 9, а):

$$\dot{U}_{mR} = U_{mR} e^{j\psi}, \quad \dot{I}_{mR} = I_{mR} e^{j\psi} = \frac{U_{mR}}{R} e^{j\psi}.$$
(39)

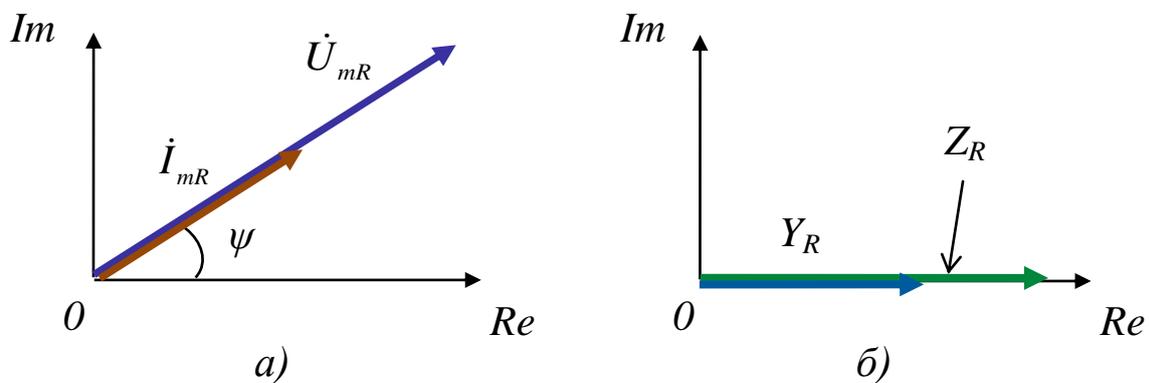


Рисунок 9

Комплексное сопротивление идеального резистора содержит только действительную составляющую R (см. рис. 9, б):

$$Z_R = R, \quad Y_R = \frac{1}{R}. \quad (40)$$

3.4.2. Ёмкостный элемент. При гармоническом воздействии ток идеальной ёмкости *опережает по фазе* напряжение на 90° :

$$\psi_I = \psi_U + \frac{\pi}{2}. \quad (41)$$

Мгновенные значения тока и напряжения выражаются зависимостями (см. рис. 10):

$$u_C = U_{mC} \cos(\omega t + \psi_{UC}); \quad (42)$$

$$i_C = I_{mC} \cos(\omega t + \psi_{IC}) = \omega C U_{mC} \cos(\omega t + \psi_{UC} + \pi/2).$$

Комплексные амплитуды напряжения и тока идеальной ёмкости задаются выражениями (43) (см. также рис. 11, а):

$$\dot{U}_{mC} = U_{mC} e^{j\psi_{UC}},$$

$$\dot{I}_{mC} = I_{mC} e^{j\psi_{IC}} = \omega C U_{mC} e^{j(\psi_{UC} + \pi/2)}. \quad (43)$$

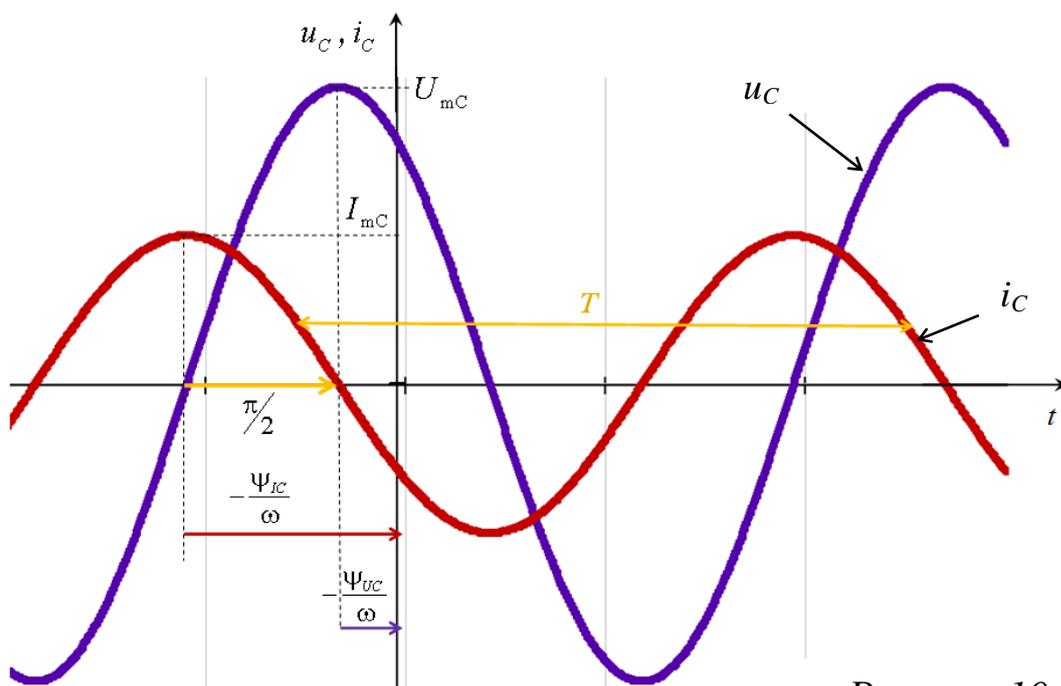


Рисунок 10

Комплексное сопротивление и проводимость емкости, задаваемые выражениями

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}, \quad Y_C = j\omega C, \quad (44)$$

показаны на комплексной плоскости на рис. 11, б).

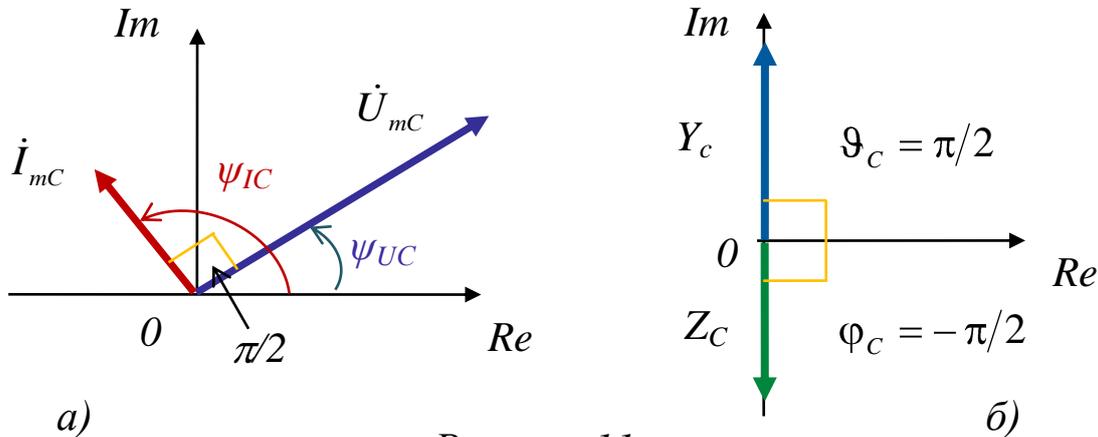


Рисунок 11

3.4.3. Индуктивный элемент. При гармоническом воздействии ток идеальной катушки индуктивности *отстает по фазе* от напряжения на 90° :

$$\psi_U = \psi_I + \frac{\pi}{2}. \quad (45)$$

Поскольку ёмкость и индуктивность (также как и сопротивление и проводимость) являются попарно дуальными элементами, процессы, происходящие в них при гармонических воздействиях описываются подобными по структуре выражениями. Мгновенные значения тока и напряжения выражаются зависимостями (см. рис. 12):

$$i_L = I_{mL} \cos(\omega t + \psi_{IL}); \quad (46)$$

$$u_L = U_{mL} \cos(\omega t + \psi_{UL}) = \omega L I_{mL} \cos(\omega t + \psi_{IL} + \pi/2).$$

Комплексные амплитуды напряжения и тока идеального конденсатора задаются выражениями (47) (см. также рис. 13, а):

$$\begin{aligned}\dot{U}_{mL} &= U_{mL} e^{j\psi_{UL}}, \\ \dot{I}_{mL} &= I_{mL} e^{j\psi_{IL}} = \frac{U_{mL}}{\omega L} e^{j(\psi_{UL} - \pi/2)}.\end{aligned}\quad (47)$$

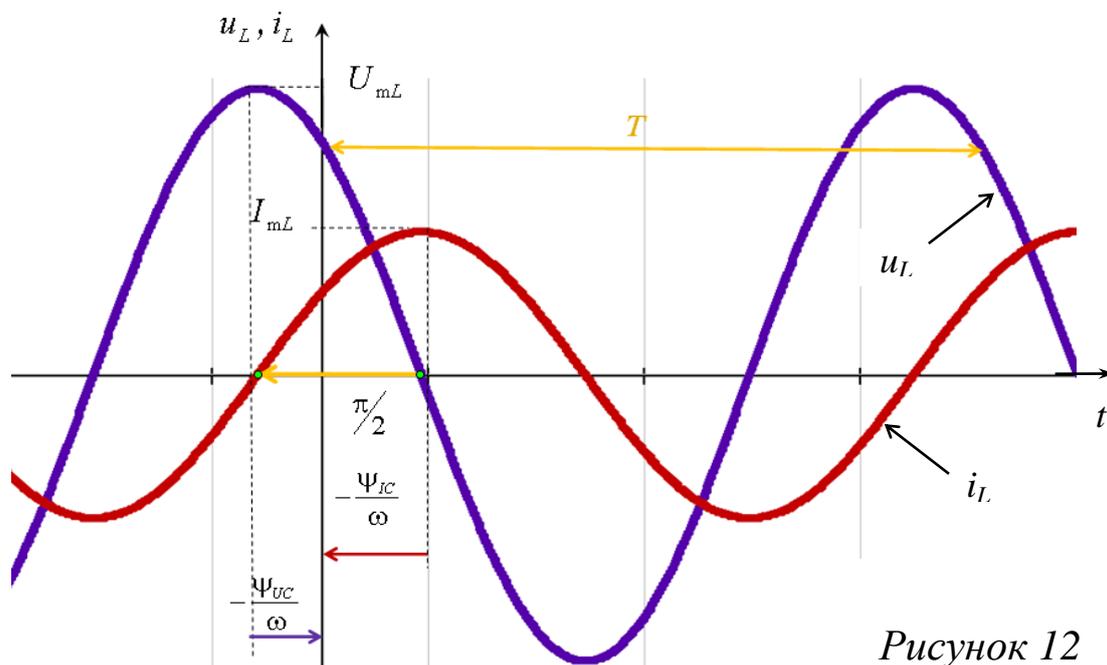


Рисунок 12

Комплексные сопротивление и проводимость индуктивности можно определить следующим образом (см. также рис. 13, б):

$$Z_L = j\omega L, \quad Y_L = \frac{1}{j\omega L} = -\frac{j}{\omega L}.\quad (48)$$

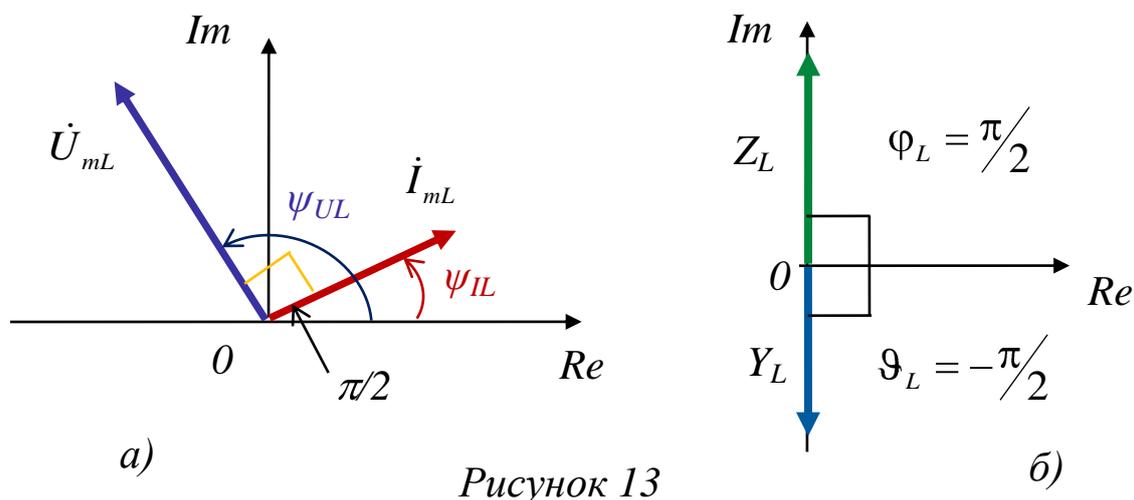


Рисунок 13

3. 5. Примеры расчета простейших последовательных цепей при гармоническом воздействии

3. 5. 1. Последовательная RL-цепь. Рассмотрим цепь, изображенную на рис. 14, а, представляющую собой последовательное соединение сопротивления и индуктивности.

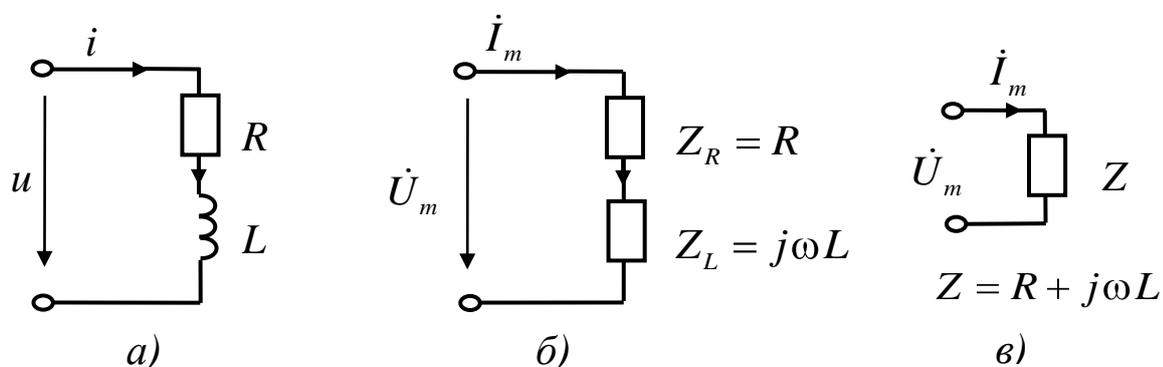


Рисунок 14

Перейдя от мгновенных значений тока и напряжения к их изображениям и представив сопротивление и индуктивность их комплексными схемами замещения, получаем схему, изображенную на рис. 14, б.

Дальнейшее упрощение (с учетом того, что для последовательной цепи комплексное сопротивление равно сумме комплексных сопротивлений компонентов) приводит к рис. 14, в.

Комплексное сопротивление цепи находим с помощью представления вектора Z на комплексной плоскости как суммы векторов Z_R и Z_L (см. рис. 15, а).

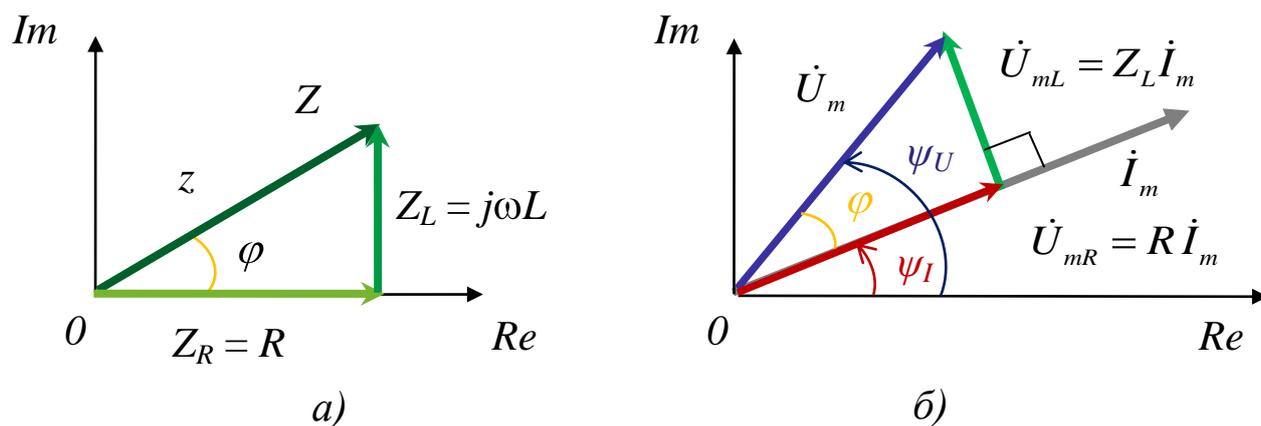


Рисунок 15

Модуль комплексного сопротивления рассчитывается как гипотенуза прямоугольного треугольника сопротивлений с катетами R и ωL :

$$z = |Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (49)$$

Аргумент находится из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}. \quad (50)$$

Тогда

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}. \quad (51)$$

Векторная диаграмма для комплексных амплитуд тока и напряжений на элементах цепи представлена рис. 15, б. Очевидно, что треугольник напряжений \dot{U}_m, \dot{U}_{mR} и \dot{U}_{mL} подобен треугольнику сопротивлений Z, Z_R и Z_L .

Напряжение на резисторе совпадает по фазе с током в цепи, вектор напряжения на катушке индуктивности повернут относительно вектора тока на 90° против часовой стрелки.

Таким образом, получаем, что вектор комплексной амплитуды тока \dot{I}_m повернут относительно вектора комплексной амплитуды напряжения \dot{U}_m на угол $\varphi = \arg Z$ по часовой стрелке (ток отстает от напряжения на угол φ).

Комплексная амплитуда тока

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{Z} = \frac{U_m e^{j\psi_U}}{z e^{j\varphi}} = \frac{U_m}{z} e^{j(\psi_U - \varphi)}. \quad (52)$$

Комплексные амплитуды напряжения на индуктивности и сопротивлении находятся по формулам:

$$\dot{U}_{mL} = Z_L \dot{I}_m = Z_L \dot{I}_m = \omega L e^{j90^\circ} \frac{U_m}{z} e^{j(\psi_U - \varphi)} = \frac{\omega L U_m}{z} e^{j(90^\circ + \psi_U - \varphi)} \quad (53)$$

$$\dot{U}_{mR} = Z_R \dot{I}_m = Z_R \dot{I}_m = R \frac{U_m}{z} e^{j(\psi_U - \varphi)} = \frac{R U_m}{z} e^{j(\psi_U - \varphi)}. \quad (54)$$

Замечание: при выводе (53) была использована вытекающая из формулы Эйлера (5) зависимость:

$$e^{j90^\circ} = \cos 90^\circ + j \sin 90^\circ = 0 + 1 \cdot j = j, \quad (55)$$

а также условия равенства протекающего через все элементы последовательной цепи тока:

$$\dot{I}_{mR} = \dot{I}_{mL} = \dot{I}_m. \quad (56)$$

3.5.2. Последовательная RC-цепь. Схема последовательной RC-цепи и её комплексные схемы замещения показаны на рис. 16.

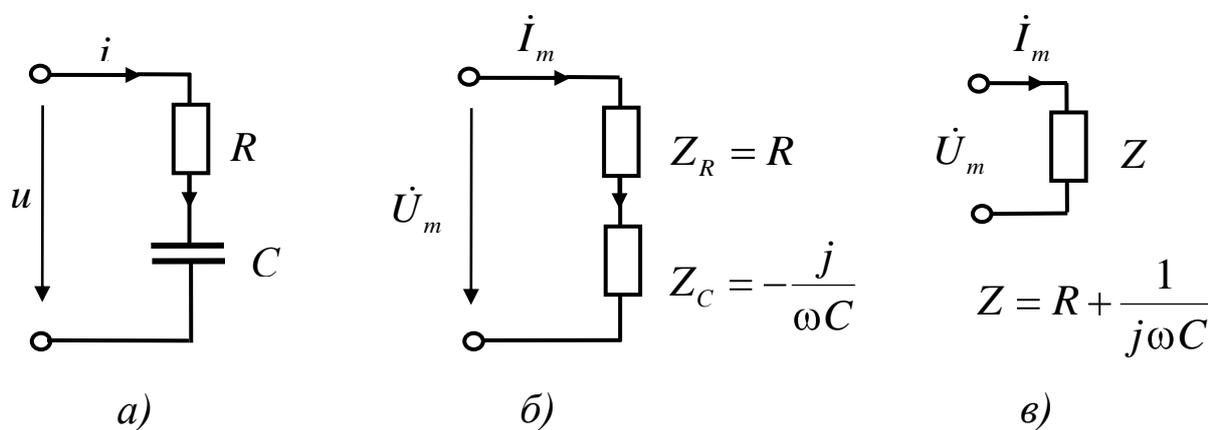


Рисунок 16

Векторные диаграммы для сопротивлений, напряжений и токов представлены на рис. 17.

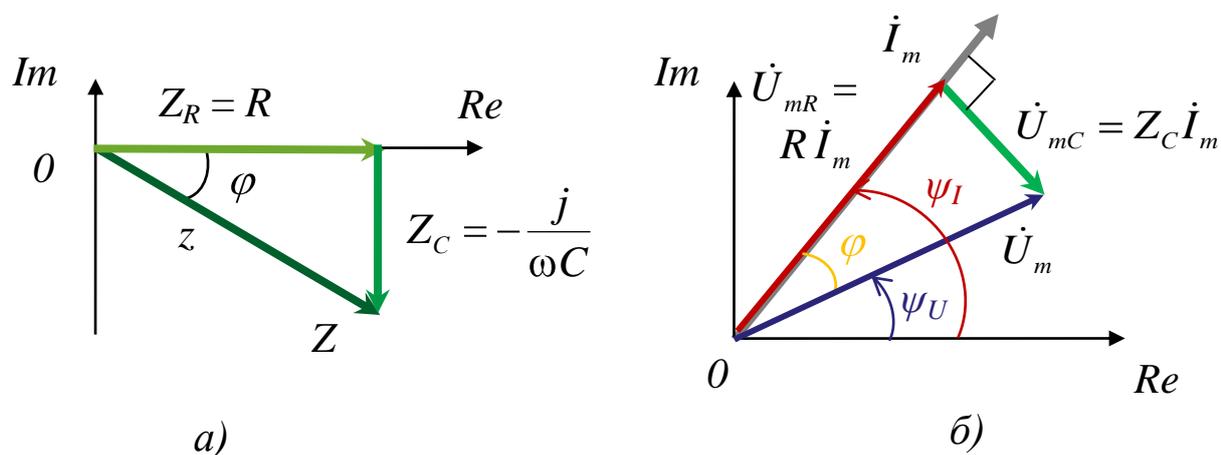


Рисунок 17

Модуль комплексного сопротивления:

$$z = |Z| = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}. \quad (57)$$

Аргумент комплексного сопротивления

$$\varphi = -\operatorname{arctg} \frac{1}{\omega CR}, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq 0. \quad (58)$$

Комплексная амплитуда тока с учетом (57) и (58) находится по формуле (52). Выражения для комплексной амплитуды напряжения на ёмкости может быть получено аналогично выражениям (53):

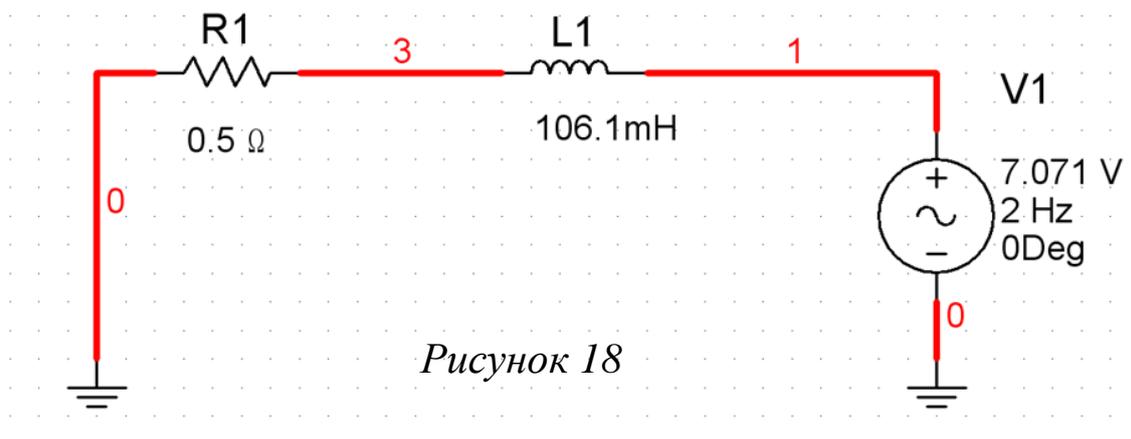
$$\dot{U}_{mC} = Z_C \dot{I}_{mC} = Z_C \dot{I}_m = \frac{U_m}{z \cdot \omega C} e^{j(-90^\circ + \psi_U - \varphi)}. \quad (59)$$

Для определения комплексной амплитуды напряжения на сопротивлении можно использовать формулу (54).

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4. 1. Анализ последовательной RL-цепи

Соберите схему последовательной RL-цепи, с параметрами, показанными на рис. 18. Используемый источник переменного напряжения AC Power находится в библиотеке Sources.



Замечание: для источника AC Power Sources в окне редактирования компонента указывается действующее значение напряжения (Voltage RMS).

Для имеющего аналогичное условное обозначение источник сигнала переменного напряжения AC Signal Voltage Sources задается амплитуда напряжения (Voltage Pk).

4. 1. 1. Настройка функции Transient Analysis. Выберем в меню Simulate (Моделирование) вкладки Analysis → Transient Analysis (Анализ → Анализ переходных процессов).

В открывшемся окне Analysis Parameters (Параметры анализа), установим:

- начальное время (Start Time TSTART) – 50 с;
- конечное время (End Time TSTOP) – 51 с;
- максимальный шаг моделирования (maximum time step TMAX) – 0,0001 с.

Моделирование с большим значением начального времени позволит отсечь переходные процессы.

На вкладке Output (выходные переменные) выберем для анализа (см. рис. 19):

- значения тока ($-I1\#branch$);
- напряжение источника \$1;
- напряжение на катушке индуктивности: \$1–\$3;
- напряжение на резисторе \$3.

Замечание: значение тока в ветви программа Multisim считает положительным, если он втекает в положительный полюс источника. В отечественной электротехнике принято противоположное направление тока. Поэтому перед выходной переменной $I1\#branch$ стоит знак « \rightarrow ».

Замечание: для того, чтобы внести в список выходных переменных какое-либо выражение, необходимо воспользоваться кнопкой Add Expression (Добавить выражение).

В появившемся окне Analysis Expression следует выбрать необходимые переменные и необходимые знаки из коллекции Function (Функции) (см. рис. 20).

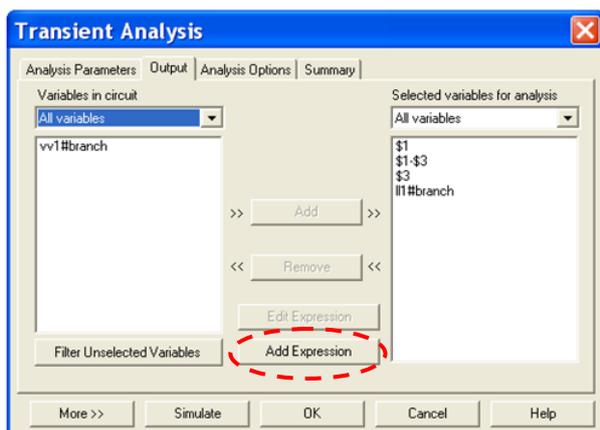


Рисунок 19

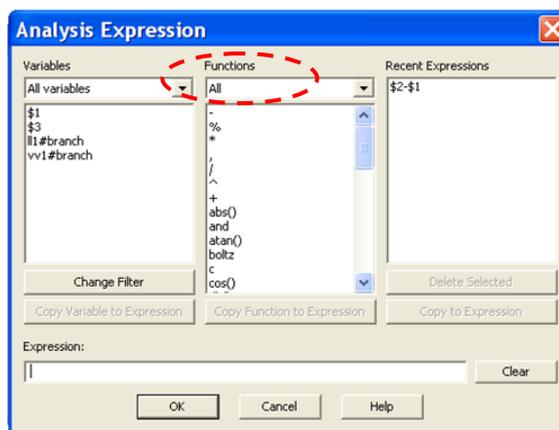


Рисунок 20

Запускаем моделирование, нажав кнопку Simulate (Моделировать).

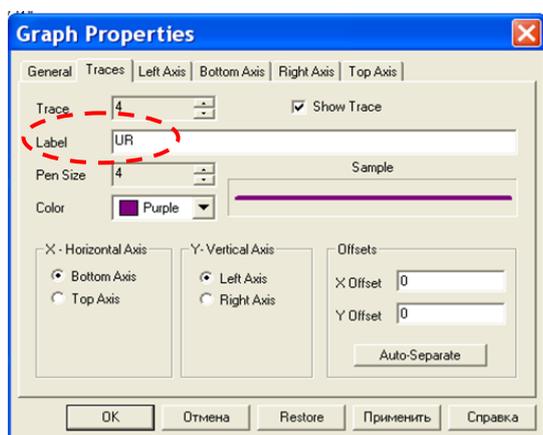


Рисунок 21

4. 1. 2. Редактирование графиков. После окончания процесса моделирования отредактируем открывшиеся графики.

Поскольку в одной системе координат построено четыре графика, для более удобной работы рекомендуется поменять названия линий, данные программой по умолчанию на более информативные (см. рис. 21):

- 1) $-I_{11\#branch}$ → I;
- 2) $\$1$ → Uin;
- 3) $\$1-\3 → UL;
- 4) $\$3$ → UR.

Новые названия будут отображаться в окне курсоров.

Замечание: Multisim не во всех версиях корректно отображает кириллические символы. Поэтому все названия следует записывать латиницей.

Графики тока, входного напряжения и напряжений на компонентах схемы представлены на рис. 22.

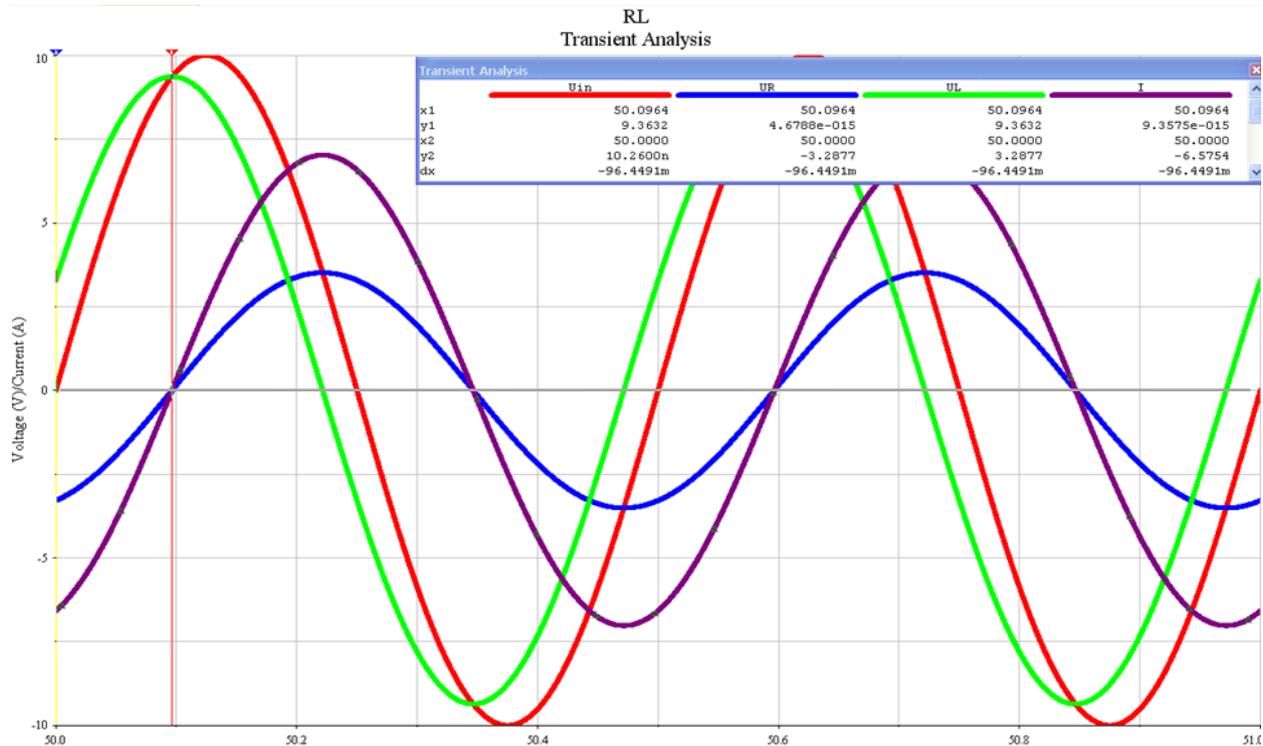


Рисунок 22

4. 1. 3. Анализ полученных графиков. С помощью опций поиска альтернативного меню курсоров определим амплитуды токов и напряжений в цепи и фазовые сдвиги (принимая начальную фазу входного напряжения равной 0).

Ток в цепи. Определим интервал $\Delta t_{U_{in} \rightarrow I}$ между точками на графиках входного напряжения U_{in} и тока I , находящимися в одной фазе: $\Delta t_{U_{in} \rightarrow I} = 0,0964$ с.

Фазовый сдвиг $\tilde{\psi}_{U_{in} \rightarrow I}$ гармонических функций U_{in} и I можно рассчитать по формуле (16), определив предварительно по графику период T этих функций.

Поскольку $T = 0,5$ с (что полностью соответствует частоте входных колебаний $f = 2$ Гц):

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 12,566;$$

и, следовательно,

$$\psi_{U_{in} \rightarrow I} = 1,211 \text{ рад} \quad \text{или} \quad \psi_{U_{in} \rightarrow I} = 69,408^\circ.$$

Замечание: при переводе радианной меры в градусную была использована зависимость

$$1 \text{ рад} = \frac{180}{\pi} = 57,296^\circ.$$

Значение $\tilde{\psi}_{U_{in} \rightarrow I}$ практически совпадает с результатом расчета аргумента комплексного сопротивления φ рассматриваемой цепи, выполненному по формуле (51):

$$\varphi = \text{arctg} \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 106,1 \cdot 10^{-3}}{0,5} = 69,443^\circ.$$

Амплитуда тока равна $I_m = 7,0226 \text{ А}$ тоже практически равна расчетному значению (см. (52)).

Напряжение на резисторе UR по фазе совпадает с током в цепи. Амплитуда $UR_m = 3,5313 \text{ В}$, что также подтверждается расчетами (см. (54)).

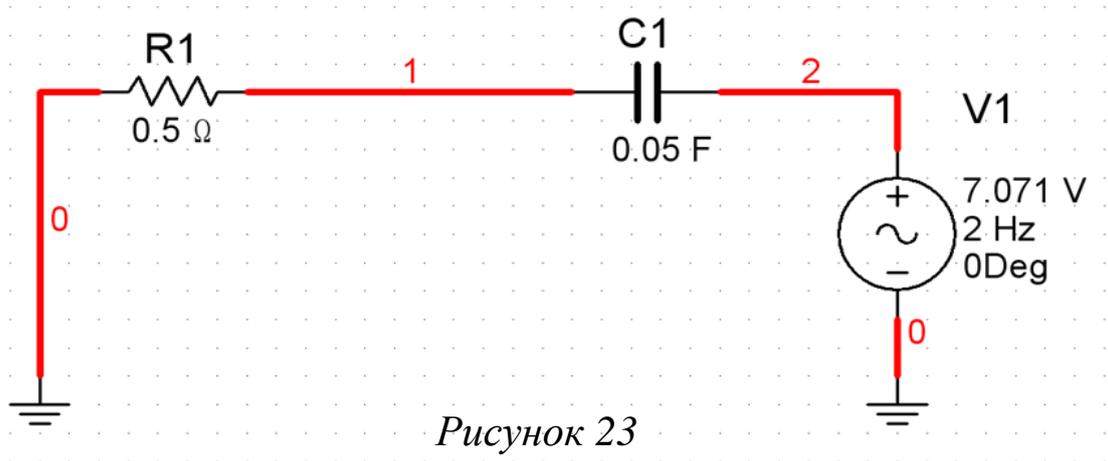
Напряжение на индуктивности. Временной интервал между точками на графиках тока в цепи и напряжения на индуктивности $\Delta t_{I \rightarrow UL} = 0,1251 \text{ с}$, что дает фазовый сдвиг, равный 90° .

Амплитуда напряжения $UL_m = 9,3632 \text{ В}$, что совпадает с расчетным значением (см. (53)).

Задание: векторные диаграммы в комплексной плоскости, соответствующие рис. 22, изобразите самостоятельно.

4. 2. Анализ последовательной RC-цепи

Проведем анализ цепи, содержащей последовательное соединение идеальной емкости и сопротивления (см. рис. 23). Настройку Transient Analysis проведем аналогично п. 4. 1.



Полученные по итогам моделирования графики показаны на рис. 18.

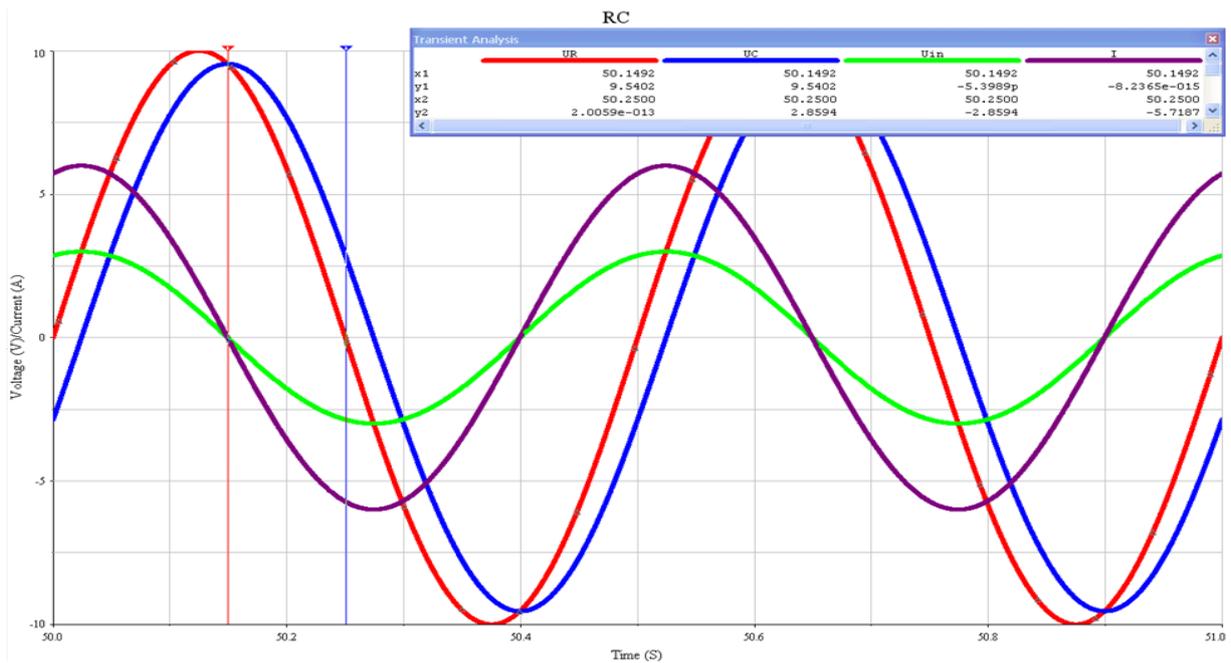


Рисунок 18

Задание: самостоятельно определите комплексные амплитуды всех тока в цепи и напряжений на всех компонентах. Сравните результаты моделирования с расчетными значениями.

5. ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Соберите схемы (см. рис. 18 и 24), сохранив действующее значение напряжения U , частоту f и фазу ψ_0 источника питания:

$$U = 7,071 \text{ В}; \quad f = 2 \text{ Гц}; \quad \psi_0 = 0.$$

Замечание: система Multisim осуществляет моделирование гармонических процессов согласно формуле (7), Фаза источника при этом задается в градусах.

Параметры используемых компонентов указаны в табл. 1. Вариант задания для каждого студента соответствует его номеру в списке подгруппы/группы в журнале преподавателя.

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6
Ёмкость C , мФ	100	500	700	350	250	650
Индуктивность L , мГн	20	100	50	150	250	20
Сопротивление R , Ом	0,75	2,00	3,00	2,00	4,00	0,50
№ варианта	7	8	9	10	11	12
Ёмкость C , мФ	150	900	100	750	200	800
Индуктивность L , мГн	250	50	75	100	25	110
Сопротивление R , Ом	4,00	0,75	1,50	2,00	1,50	0,50

Выполните анализ последовательных RL- и RC -цепей.

Найдите расчетным путем комплексные изображения тока и напряжений на всех компонентах цепей и соответствующие им оригиналы.

Постройте векторные диаграммы комплексного сопротивления и совмещенные векторные диаграммы для комплексных амплитуд токов и напряжений.

Воспользовавшись результатами Transient Analysis, проверьте соответствие теоретических результатов экспериментальным. (Временные параметры моделирования выбирайте с учетом необходимости отсечения переходных процессов).

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Основные формулы, используемые при расчетах.
3. Подробная запись всех этапов проведенных расчетов и их результаты.
4. Скриншоты графиков, полученных в результате проведения Transient Analysis, с открытыми окнами курсоров.
5. Сопоставление расчетных данных с результатами моделирования.
6. Векторные диаграммы в комплексной плоскости, соответствующие графикам токов и напряжений во временной области. Векторные диаграммы для сопротивлений.
7. Выводы.

7. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Попов, В. П. Основы теории цепей / В. П. Попов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2000 – 575 с.
2. Исследование свободных колебаний в замкнутом контуре : методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория электрических цепей» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Л. А. Большевцева, А. Ф. Рыбочкин. Курск, 2013. 22 с

УДК 681.325

Составители: А.Ф. Рыбочкин, Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор
кафедры космического приборостроения и систем связи

В.Г. Андронов

Измерение полного комплексного сопротивления электрической цепи: методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория электрических цепей» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.Ф. Рыбочкин, Д.С. Коптев. – Курск, 2019. – 10 с.: ил. 7. – Библиогр.: с. 10.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат сведения о методике исследования цепей, содержащих резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности в системе компьютерного моделирования Multisim с помощью функций AC-Sweep. Указывается порядок выполнения лабораторной работы.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Теория электрических цепей», и учебного плана по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплине «Теория электрических цепей» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *8.02.19*. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 0,58. Уч.-изд. л. 0,526. Тираж 100 экз. Заказ *74* Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.....	4
3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	4
3. 1. Измерение активного сопротивления с помощью мультиметра	4
3. 2. Измерение сопротивления с помощью анализа SPICE.....	5
4. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	8
5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	9
6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	10

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Измерение полного комплексного сопротивления в RLC-цепях на переменном токе.
2. Построение амплитудно- и фазочастотных характеристик комплексного сопротивления RLC-цепей.

2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в методических указаниях;
- ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

При подготовке к защите лабораторной работы необходимо:

- оформить отчет в соответствии с разделом 5;
- изучить соответствующие разделы конспекта лекций по дисциплине и ознакомиться с рекомендованной литературой;
- устно подготовить ответы на контрольные вопросы.

3. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В процессе лабораторной работы необходимо выявить зависимость амплитуды и фазы полного комплексного сопротивления от частоты.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

3.1. Измерение активного сопротивления с помощью мультиметра

✓ **Соберем** схему, подробный анализ которой был проведен в лабораторной работе 1 (см. рисунок 1), установив заданные названия и значения компонентов.

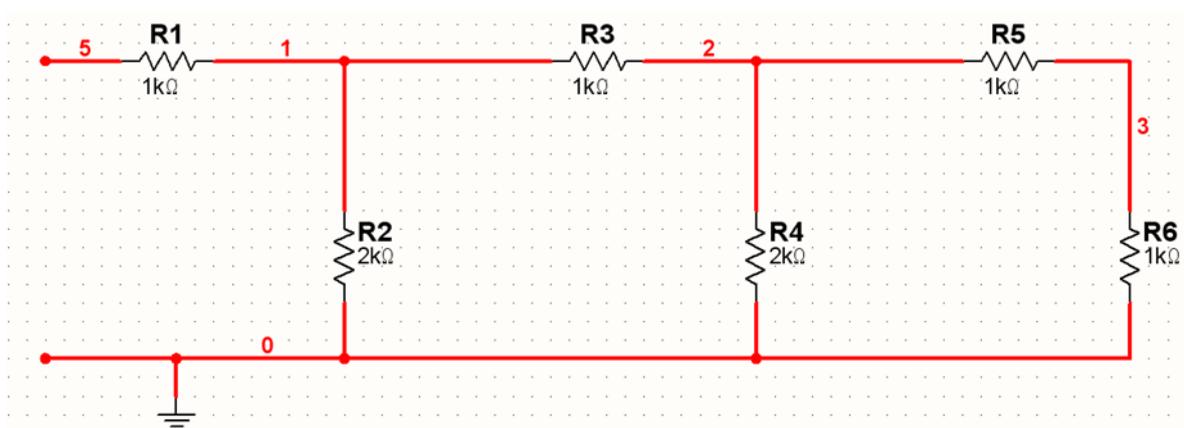


Рисунок 1

Примечание 1. Обратите внимание, что в Multisim все схемы должны быть заземлены.

✓ **Добавим в схему Multimeter**, настроив его на измерение сопротивления.

Примечание 2. По умолчанию мультиметр измеряет напряжение между двумя полюсами.

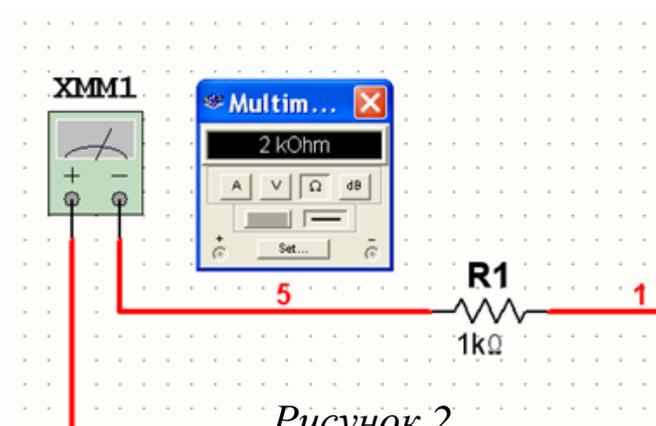


Рисунок 2

✓ **Проведем моделирование.** Результаты показаны на рисунке 2. Они полностью совпадают с расчетными.

Примечание 3. Измерение сопротивления с помощью мультиметра возможно провести только для резисторных схем (для схем, содержащих только активные сопротивления)!

3. 2. Измерение сопротивления с помощью анализа SPICE

Применим новую методику для измерения сопротивления той же схемы.

✓ **Добавим в схему источник переменного тока AC Current (Place – Component – Sources – Signal Current Sources) – см. рис. 3.**

По умолчанию ток источника равен 1 А. Оставим это значение.

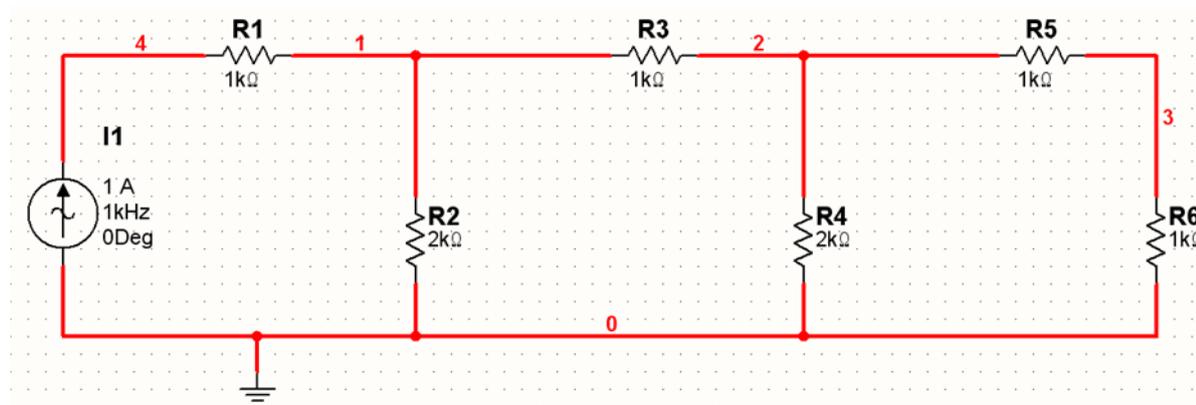


Рисунок 3

✓ **Настроим функцию AC Analysis.**

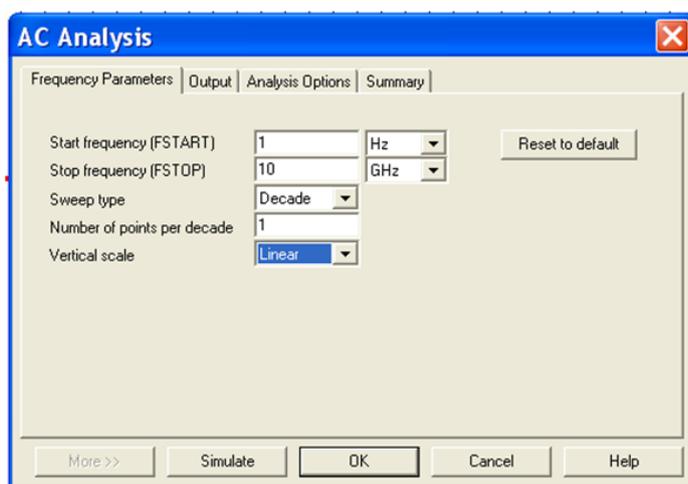


Рисунок 4

Выберем в меню пункты Simulate – Analysis – AC Analysis. Поскольку сопротивление с частотой не изменяется, в появившемся окне изменим единственным параметр: выберем Linear Vertical scale (по умолчанию Logarifmic) – см. рис. 4.

Примечание 4. Сопротивление схемы вычисляется путем деления

напряжения между узлом 4 и заземлением на амплитуду источника тока:

$$Z = \frac{V(4)}{I(I1)} . \quad (1)$$

Поскольку ток источника равен 1 А, это означает, что сопротивление схемы численно равно напряжению на узле 4.

✓ **Выберем выходные переменные для AC Analysis.**

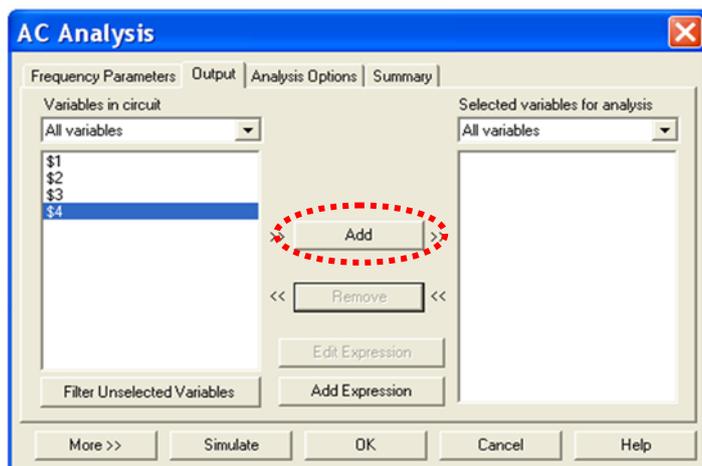


Рисунок 5

На вкладке Output (Output variables) добавим переменную \$4 (напряжение в узле 4) – см. рис. 5.

✓ **Проведем моделирование.** Результаты показаны на рис. 6. Графики позволяют убедиться, что сопротивление схемы от частоты не зависит.

Примечание 5. Для

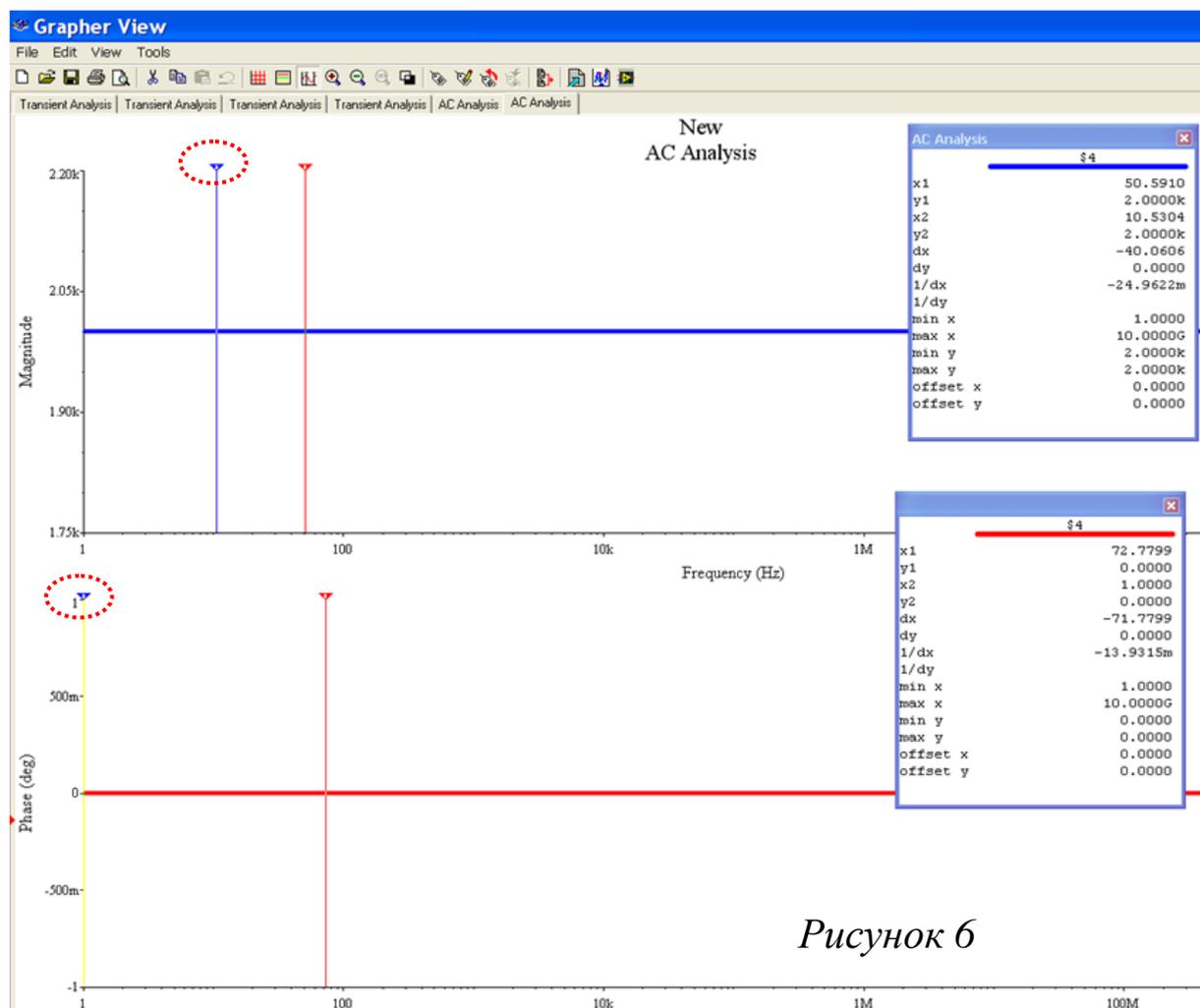


Рисунок 6

уточнения значения сопротивления необходимо *воспользоваться курсорами*, «спрятанными» около оси ординат.

Окно курсоров открывается из меню View – Show/Hide Cursors.

Примечание 6. Настройка вида графика (редактирование название, осей, линий, сетки) проводится аналогично [1], п. 3.4 (см. с. 7).

Примечание 7. Анализ SPICE позволяет провести исследование комплексного сопротивления схемы, содержащей также и реактивные компоненты (катушки, конденсаторы).

4. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

4. 1. Постройте с помощью программы SPICE (AC Analysis) амплитудно- и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) комплексного сопротивления для схем 1-12 рисунка 7 (значения активного сопротивления, емкости и индуктивности задаются преподавателем).

Примечание 8. При редактировании графиков обратите внимание на необходимость задания линейного масштаба по обеим осям.

4. 2. Для схем, в которых наблюдается явление резонанса, рассчитайте частоту резонанса и проверьте соответствие расчетов результатам моделирования.

4. 2. Изобразите для каждой схемы её векторную диаграмму.

4. 3. Выведите формулы для действующего значения сопротивления и фазового сдвига.

4. 4. Покажите, что расчетные зависимости подтверждаются экспериментально (проведите исследование и построение соответствующих графиков в программе Mathcad).

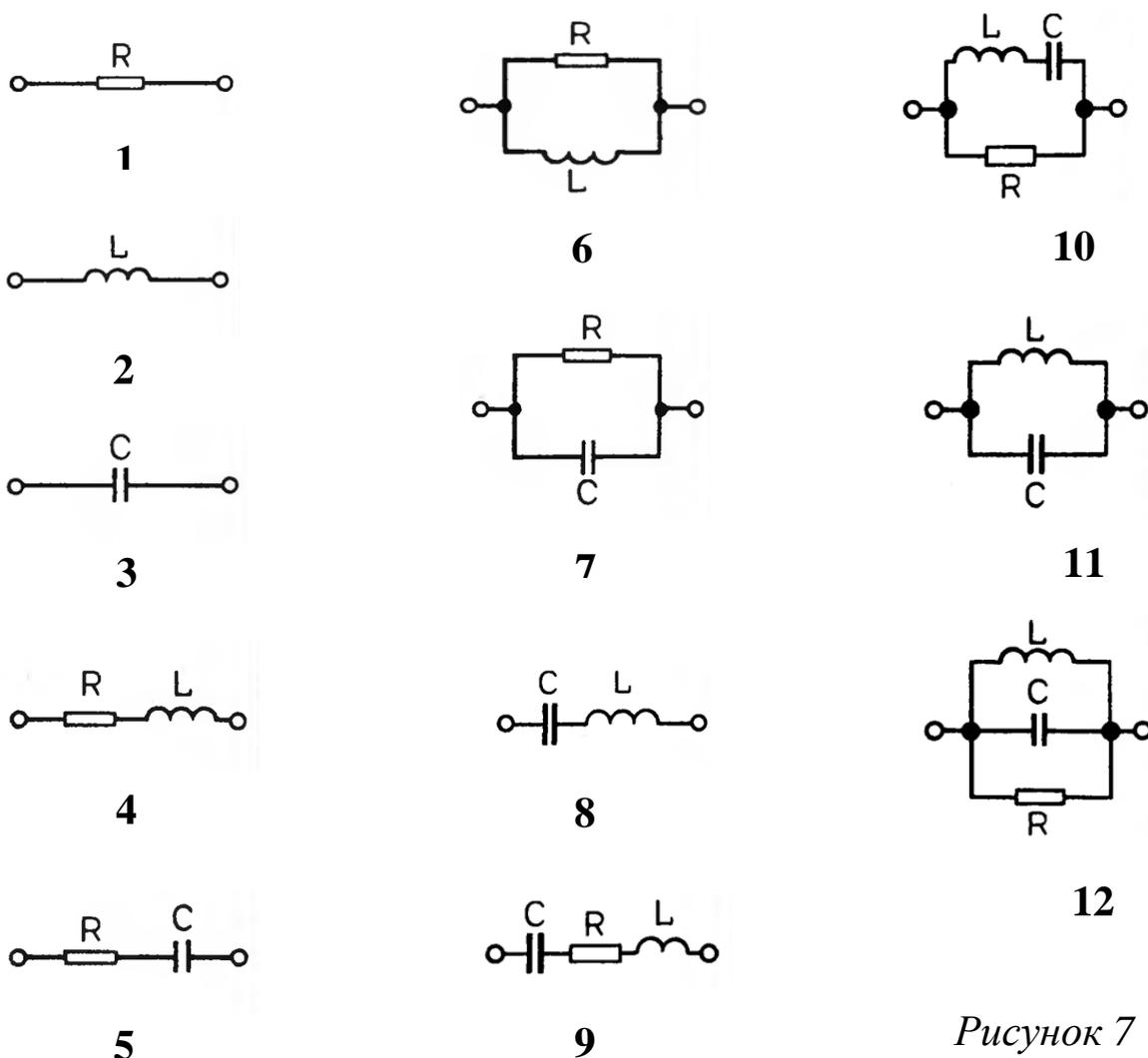


Рисунок 7

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Скриншоты схем.
3. Скриншоты графиков АЧХ и ФЧХ.
4. Все необходимые согласно п. 4. 3 расчеты
5. Анализ соответствия теоретических зависимостей экспериментальным результатам.
6. Выводы

6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование резистивных схемных соединений в цепях постоянного тока : методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория электрических цепей» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Л. А. Большевцева, А. Ф. Рыбочкин. Курск, 2013. 22 с

2. Попов, В. П. Основы теории цепей / В. П. Попов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2000 – 575 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи


УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г.Локтионова
« 8 » 02 2019 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОГО КОМПЛЕКСНОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

Методические указания
по выполнению лабораторной работы
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
по дисциплине «Теория электрических цепей»

Курск 2019

УДК 681.325

Составители: А.Ф. Рыбочкин, Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор
кафедры космического приборостроения и систем связи

В.Г. Андронов

Исследование полного комплексного сопротивления электрической цепи: методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория электрических цепей» /Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.Ф. Рыбочкин, Д.С. Коптев. – Курск, 2019. – 10 с.: ил. 7. – Библиогр.: с. 10.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат сведения о методике исследования цепей, содержащих резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности в системе компьютерного моделирования Multisim с помощью функций AC-Sweep. Указывается порядок выполнения лабораторной работы.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Теория электрических цепей», и учебного плана по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплине «Теория электрических цепей» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *8.02.19*. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 0,58. Уч.-изд. л. 0,526. Тираж 100 экз. Заказ. *69* Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.....	4
3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	4
3. 1. Измерение активного сопротивления с помощью мультиметра	4
3. 2. Измерение сопротивления с помощью анализа SPICE.....	5
4. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	8
5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	9
6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	10

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Измерение полного комплексного сопротивления в RLC-цепях на переменном токе.
2. Построение амплитудно- и фазочастотных характеристик комплексного сопротивления RLC-цепей.

2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в методических указаниях;
- ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

При подготовке к защите лабораторной работы необходимо:

- оформить отчет в соответствии с разделом 5;
- изучить соответствующие разделы конспекта лекций по дисциплине и ознакомиться с рекомендованной литературой;
- устно подготовить ответы на контрольные вопросы.

3. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В процессе лабораторной работы необходимо выявить зависимость амплитуды и фазы полного комплексного сопротивления от частоты.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

3.1. Измерение активного сопротивления с помощью мультиметра

✓ **Соберем** схему, подробный анализ которой был проведен в лабораторной работе 1 (см. рисунок 1), установив заданные названия и значения компонентов.

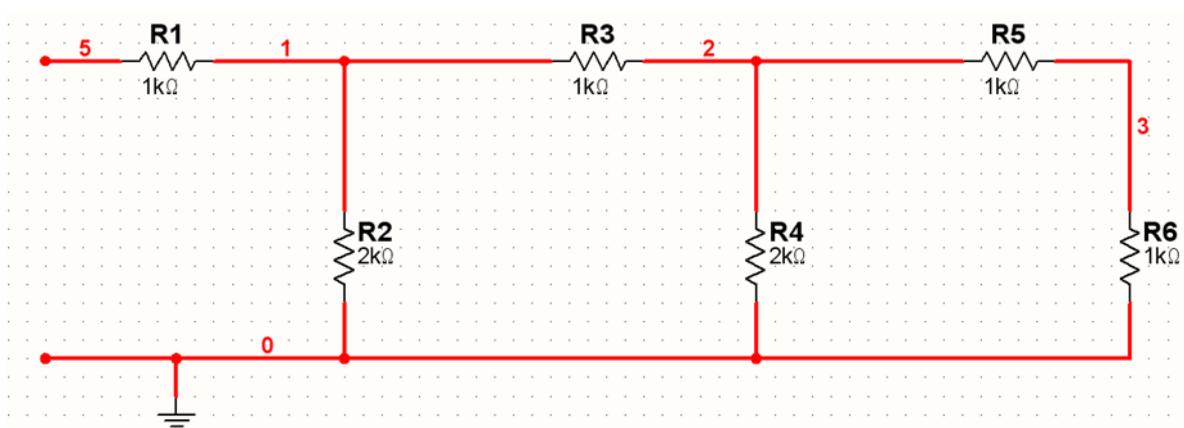


Рисунок 1

Примечание 1. Обратите внимание, что в Multisim все схемы должны быть заземлены.

✓ Добавим в схему **Multimeter**, настроив его на измерение сопротивления.

Примечание 2. По умолчанию мультиметр измеряет напряжение между двумя полюсами.

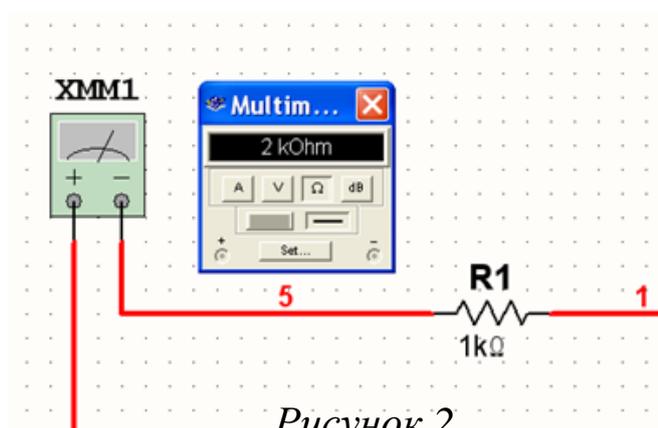


Рисунок 2

✓ Проведем моделирование. Результаты показаны на рисунке 2. Они полностью совпадают с расчетными.

Примечание 3. Измерение сопротивления с помощью мультиметра возможно провести только для резисторных схем (для схем, содержащих только активные сопротивления)!

3. 2. Измерение сопротивления с помощью анализа SPICE

Применим новую методику для измерения сопротивления той же схемы.

✓ **Добавим в схему источник переменного тока AC Current (Place – Component – Sources – Signal Current Sources) – см. рис. 3.**

По умолчанию ток источника равен 1 А. Оставим это значение.

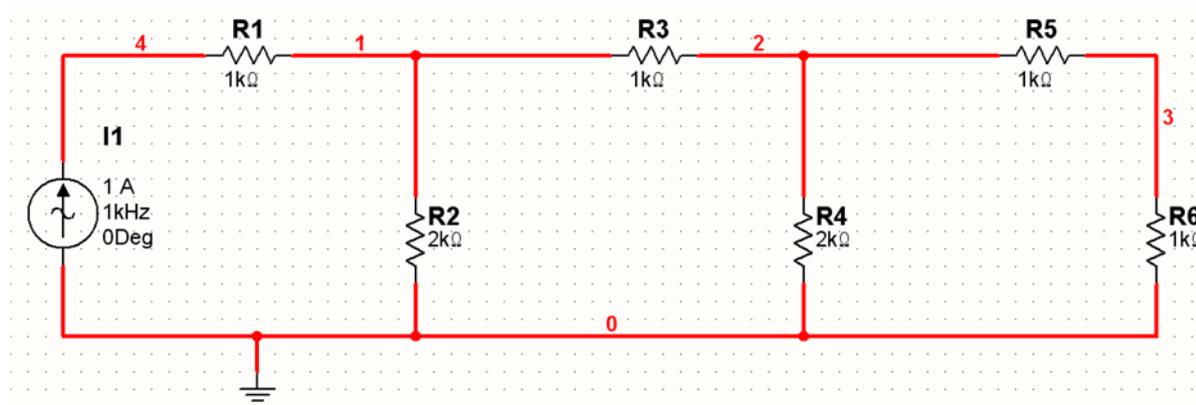


Рисунок 3

✓ **Настроим функцию AC Analysis.**

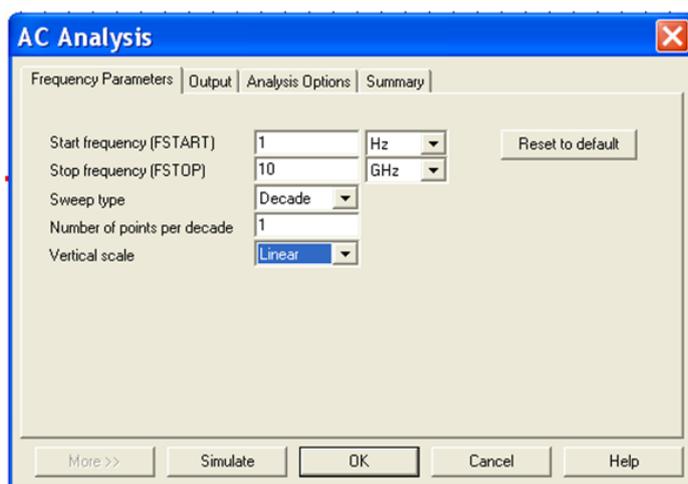


Рисунок 4

Выберем в меню пункты Simulate – Analysis – AC Analysis. Поскольку сопротивление с частотой не изменяется, в появившемся окне изменим единственным параметр: выберем Linear Vertical scale (по умолчанию Logarifmic) – см. рис. 4.

Примечание 4. Сопротивление схемы вычисляется путем деления

напряжения между узлом 4 и заземлением на амплитуду источника тока:

$$Z = \frac{V(4)}{I(I1)} . \quad (1)$$

Поскольку ток источника равен 1 А, это означает, что сопротивление схемы численно равно напряжению на узле 4.

✓ **Выберем выходные переменные для AC Analysis.**

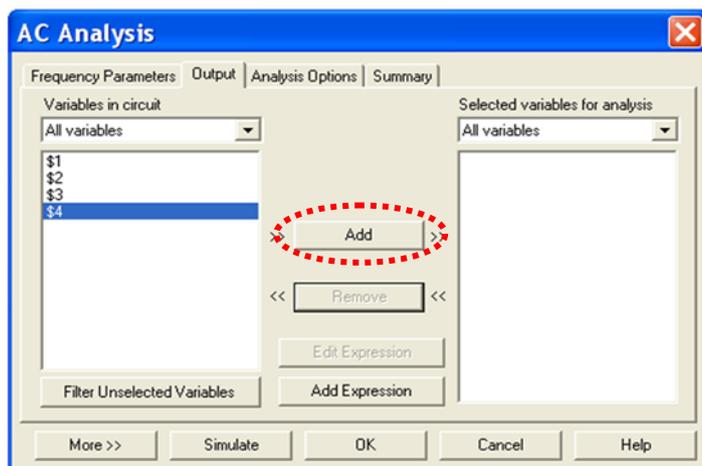


Рисунок 5

На вкладке Output (Output variables) добавим переменную \$4 (напряжение в узле 4) – см. рис. 5.

✓ **Проведем моделирование.** Результаты показаны на рис. 6. Графики позволяют убедиться, что сопротивление схемы от частоты не зависит.

Примечание 5. Для

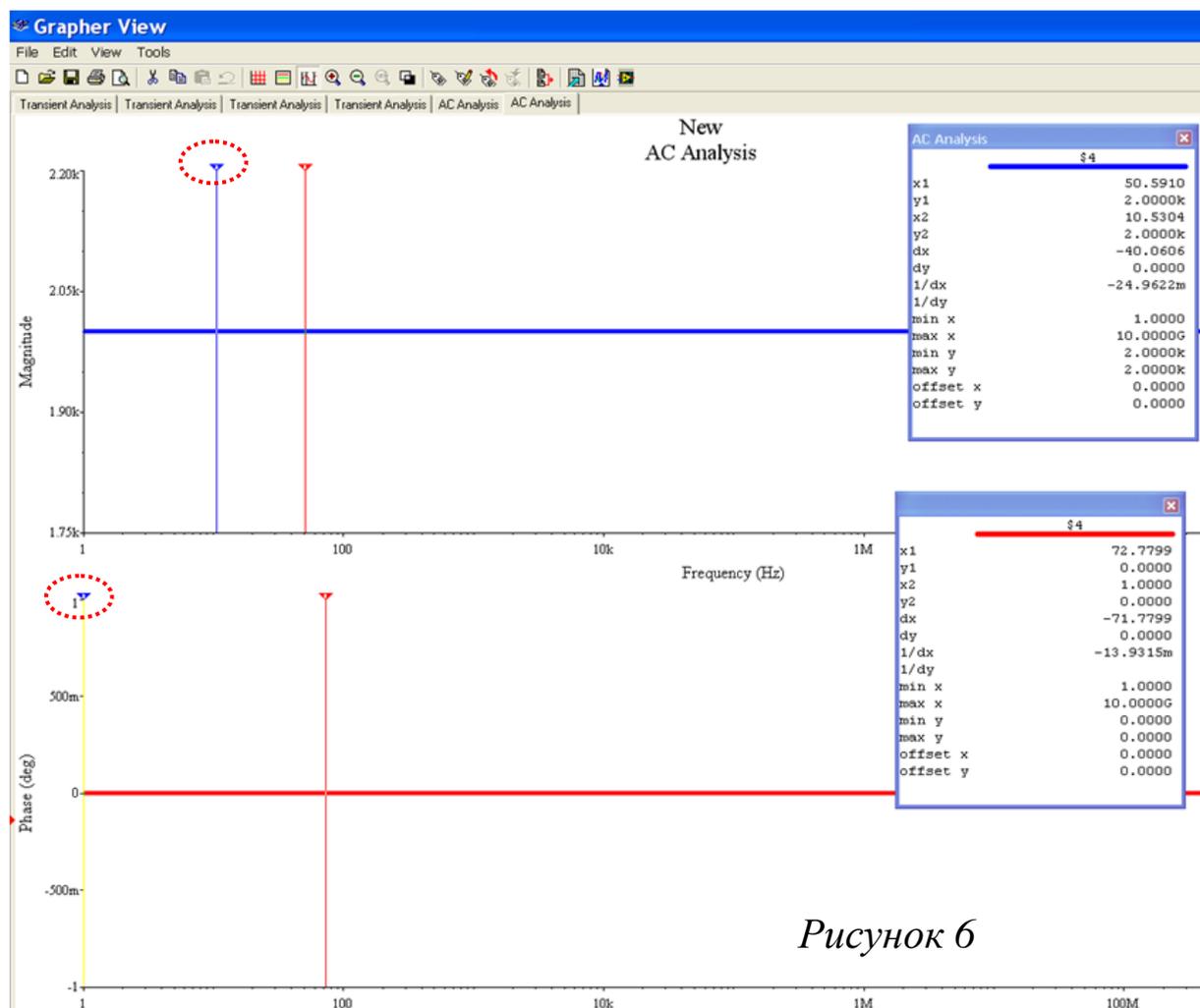


Рисунок 6

уточнения значения сопротивления необходимо *воспользоваться курсорами*, «спрятанными» около оси ординат.

Окно курсоров открывается из меню View – Show/Hide Cursors.

Примечание 6. Настройка вида графика (редактирование название, осей, линий, сетки) проводится аналогично [1], п. 3.4 (см. с. 7).

Примечание 7. Анализ SPICE позволяет провести исследование комплексного сопротивления схемы, содержащей также и реактивные компоненты (катушки, конденсаторы).

4. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

4. 1. Постройте с помощью программы SPICE (AC Analysis) амплитудно- и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) комплексного сопротивления для схем 1-12 рисунка 7 (значения активного сопротивления, емкости и индуктивности задаются преподавателем).

Примечание 8. При редактировании графиков обратите внимание на необходимость задания линейного масштаба по обеим осям.

4. 2. Для схем, в которых наблюдается явление резонанса, рассчитайте частоту резонанса и проверьте соответствие расчетов результатам моделирования.

4. 2. Изобразите для каждой схемы её векторную диаграмму.

4. 3. Выведите формулы для действующего значения сопротивления и фазового сдвига.

4. 4. Покажите, что расчетные зависимости подтверждаются экспериментально (проведите исследование и построение соответствующих графиков в программе Mathcad).

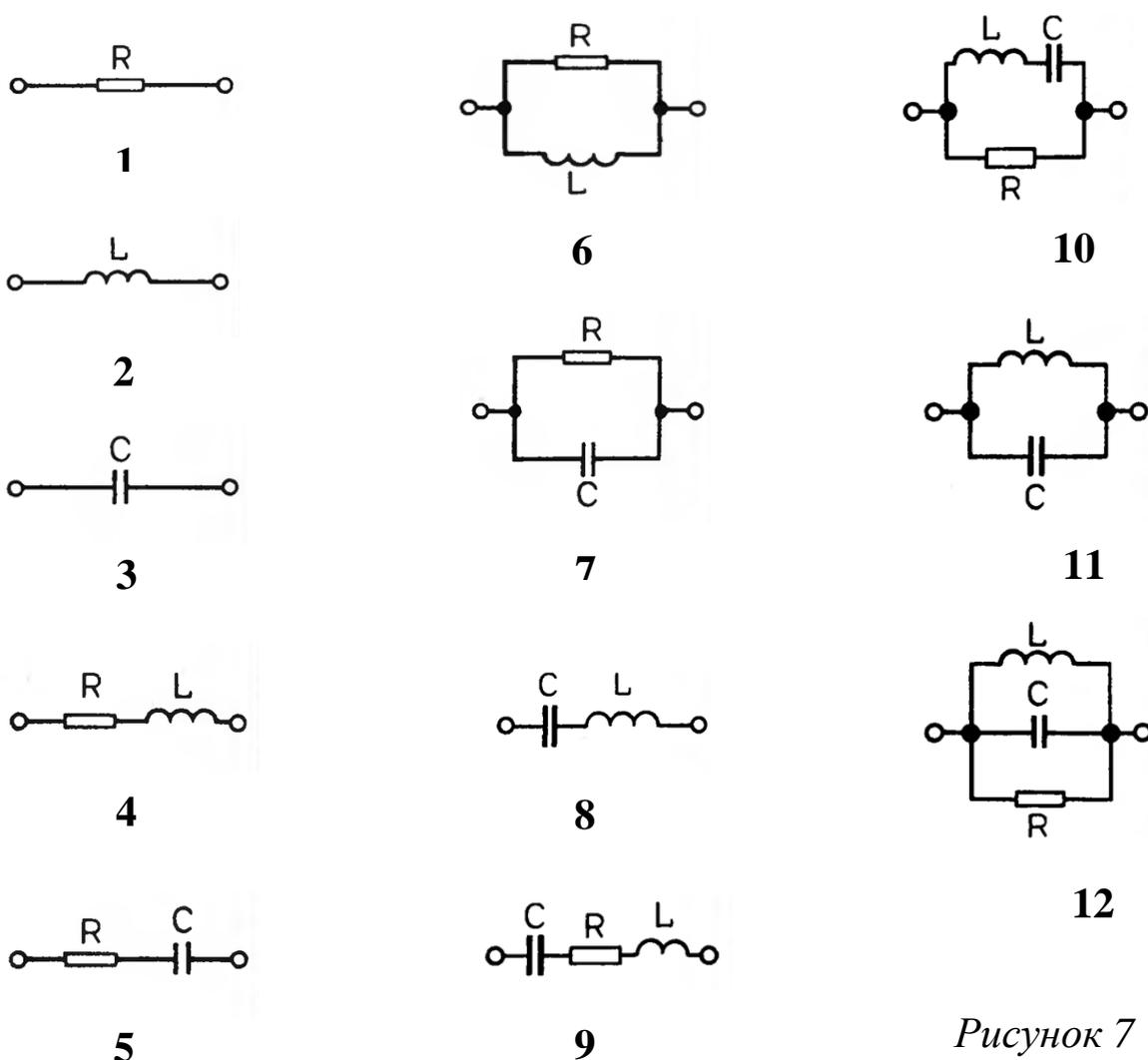


Рисунок 7

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Скриншоты схем.
3. Скриншоты графиков АЧХ и ФЧХ.
4. Все необходимые согласно п. 4. 3 расчеты
5. Анализ соответствия теоретических зависимостей экспериментальным результатам.
6. Выводы

6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование резистивных схемных соединений в цепях постоянного тока : методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория электрических цепей» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Л. А. Большевцева, А. Ф. Рыбочкин. Курск, 2013. 22 с

2. Попов, В. П. Основы теории цепей / В. П. Попов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2000 – 575 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
« 8 » 02 / 2019 г.



**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ
В ЗАМКНУТОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ**

Методические указания
по выполнению лабораторной работы
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
по дисциплине «Теория электрических цепей»

Курск 2019

УДК 681.325

Составители: А.Ф. Рыбочкин, Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор
кафедры космического приборостроения и систем связи

В.Г. Андронов

Исследование вынужденных колебаний в замкнутом последовательном контуре: методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория электрических цепей» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.Ф. Рыбочкин, Д.С. Коптев. –Курск, 2019. – 15 с.: ил. 9. – Библиогр.: с. 15.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат теоретические сведения о вынужденных колебаниях в последовательных в RLC-контурх, методике расчета полосы пропускания и об основных способах исследования колебательных контуров в системе компьютерного моделирования Multisim. Указывается порядок выполнения лабораторной работы.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Теория электрических цепей», и учебного плана по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплине «Теория электрических цепей» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *8.02.19* . Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 0,79. Тираж 100 экз. Заказ. *71* Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	4
3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
3. 1. Вынужденные колебания в колебательном контуре.....	4
3. 2. Условия резонанса в последовательном колебательном контуре	5
3. 3. Зависимость характера сопротивления контура от частоты генератора	6
3. 4. Резонансные кривые	7
3. 5. Полоса пропускания контура.....	9
4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	10
4. 1. Создание схемы последовательного колебательного контура	10
4. 2. Анализ колебаний в контуре с помощью функции Transient Analysis	10
4. 3. Анализ колебаний с помощью функции AC-Sweep. Определение полосы пропускания контура.....	13
6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	15
7. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	15

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение вынужденных колебаний в последовательном колебательном контуре.

2. Построение и анализ графиков токов и напряжений в контуре в системе компьютерного моделирования Multisim с использованием функции Transient Analysis.

3. Построение и анализ АЧХ и ФЧХ контура в системе компьютерного моделирования Multisim с использованием функции AC-Sweep.

2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в методических указаниях;
- ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

При подготовке к защите лабораторной работы необходимо:

- оформить отчет в соответствии с разделом 5;
- ознакомиться с соответствующими разделами конспекта лекций и рекомендованной литературой;
- устно подготовить ответы на контрольные вопросы.

3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1. Вынужденные колебания в колебательном контуре

Свободные колебания в любом реальном колебательном контуре являются затухающими: наличие активного сопротивления ведет к тому, что энергия контура необратимо расходуется на тепловыделение.

В радиотехнике используются в основном незатухающие колебания, при которых запас энергии контура непрерывно пополняется. Для пополнения энергии контур подключают к источнику переменного напряжения.

Вынужденными колебаниями называют незатухающие колебания в контуре, частота которых определяется частотой генератора, питающего контур.

При включении генератора в разрыв контура колебательный контур называется *последовательным* (см. рис. 1, а), при подключении генератора извне контура – *параллельным* (см. рис. 1, б).

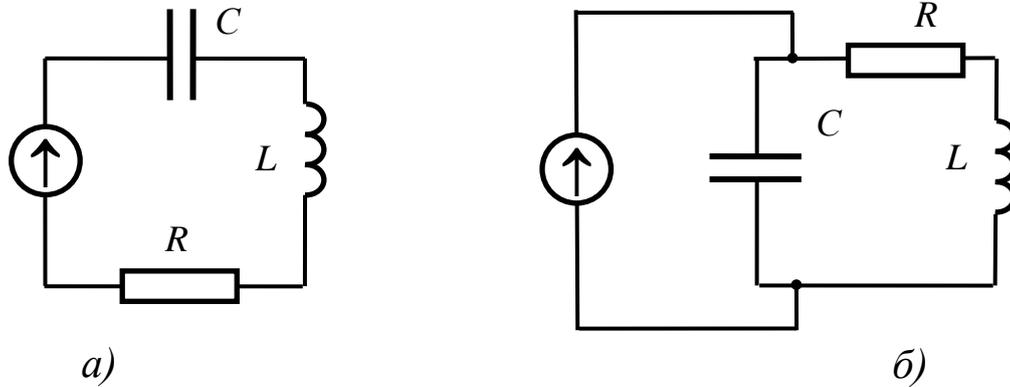


Рисунок 1

3. 2. Условия резонанса в последовательном колебательном контуре

Резонансом напряжений называется режим вынужденных колебаний, возникающий в последовательном контуре при равенстве ёмкостного и индуктивного сопротивлений.

Таким образом, при резонансе напряжений должно выполняться соотношение:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad (1)$$

где ω_0 – круговая частота резонанса, связанная с линейной частотой резонанса f_0 зависимостью

$$\omega_0 = 2\pi f_0, \quad (2)$$

L – индуктивность катушки контура;
 C – ёмкость конденсатора контура.

Поскольку из (1) и (2) следует, что

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3)$$

очевидно, что резонансная частота вынужденных колебаний контура совпадает с частотой его свободных колебаний (см. [1]).

Потому *условие резонанса* в последовательном контуре часто представляют как условие совпадения частоты питающего генератора с собственной частотой контура.

3.3. Зависимость характера сопротивления контура от частоты генератора

Полное входное сопротивление контура Z_k представляется в виде геометрической суммы активной (R) и реактивной (X) составляющих

$$Z_k = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (4)$$

где реактивная составляющая X равна разности индуктивного X_L и ёмкостного X_C сопротивлений

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}, \quad (5)$$

ω – круговая частота генератора.

Полное сопротивление контура может быть как чисто активным (резистивным), так и резистивно-индуктивным или резистивно-ёмкостным (см. [2]).

Зависимость характера сопротивления контура от частоты (сплошная линия) показана на рис. 2. Пунктирными линиями на отмечены частотно-зависимые сопротивления катушки индуктивности и конденсатора, и постоянное активное сопротивление.

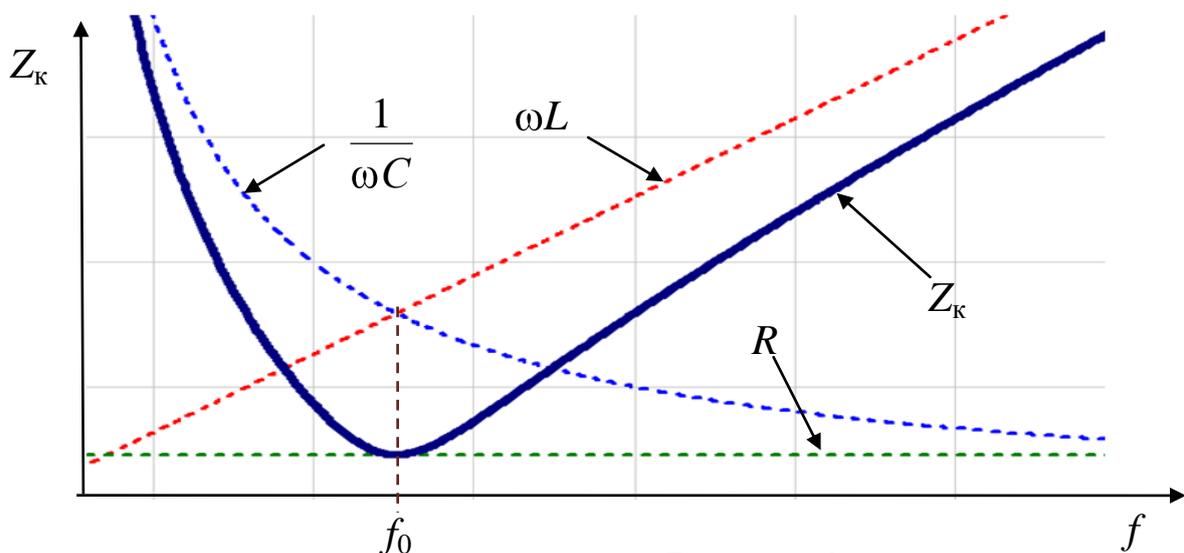


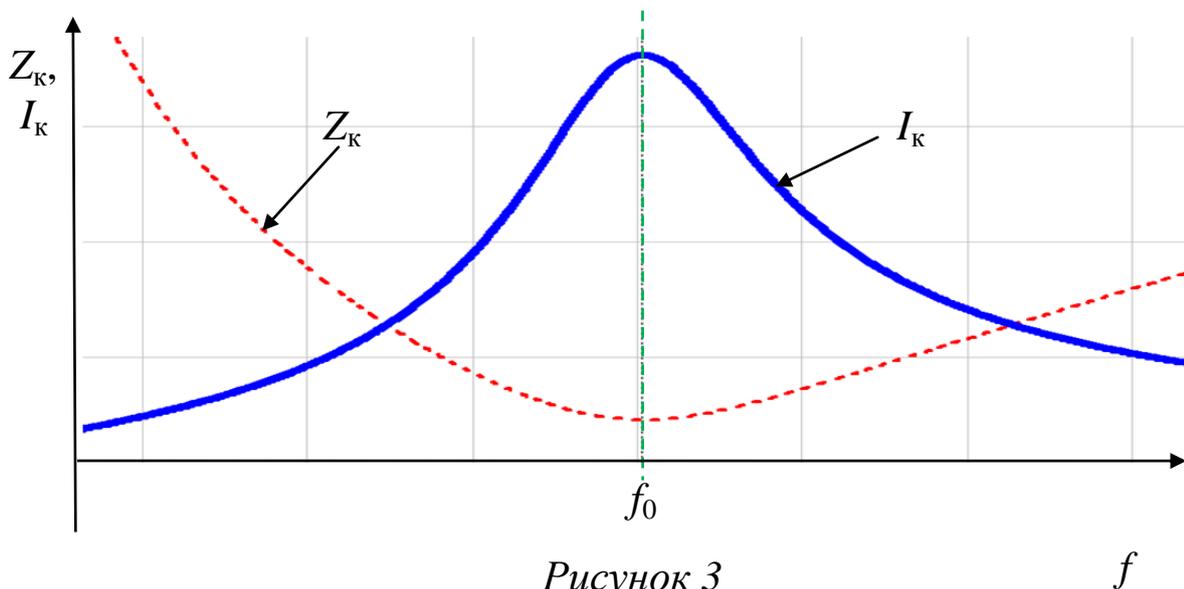
Рисунок 2

Собственная частота контура (частота резонанса) f_0 соответствует минимуму его полного сопротивления. На малых частотах (меньших f_0) сопротивление ёмкости больше сопротивления индуктивности, а потому сопротивление контура резистивно-ёмкостное. На больших (бóльших f_0), напротив, «доминирует» сопротивление индуктивности, а потому сопротивление контура становится резистивно-индуктивным.

На частоте резонанса полное сопротивление контура не содержит реактивной составляющей и является чисто активным. При этом ток в контуре

$$I_{\text{к}} = \frac{U_{\text{ген}}}{Z_{\text{к}}} \quad (6)$$

при фиксированных напряжении генератора $U_{\text{ген}}$ и параметрах контура достигает своего максимального значения (см. рис. 3).



3. 4. Резонансные кривые

Величина тока в контуре при заданные параметрах R , C и L зависит как от напряжении генератора $U_{\text{ген}}$, так и от его частоты.

Наибольшее значение тока (см. (6)) наблюдается при минимуме полного сопротивления контура на частоте резонанса. И с уменьшением, и с увеличением частоты полное сопротивление возрастает, а, следовательно, ток в контуре падает.

Резонансной кривой называется зависимость тока в контуре от частоты генератора в окрестности частоты резонанса (см. рис. 3).

Формы резонансных кривых контура зависят от его параметров. Чем больше активное сопротивление контура, тем более пологой является вершина резонансной кривой. Чем больше волновое сопротивление контура (см. [1])

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (7)$$

тем более острый максимум.

Резонансные кривые двух контуров, имеющих одинаковые ёмкости и индуктивности, но различное активное сопротивление ($R_2 < R_1$), показаны на рис. 4, а. Резонансные кривые двух контуров, имеющих одинаковые резонансные частоты и активные сопротивления, но различные волновые сопротивления ($\rho_2 < \rho_1$), показаны на рис. 4, б. Кривые сняты при одинаковом напряжении генератора.

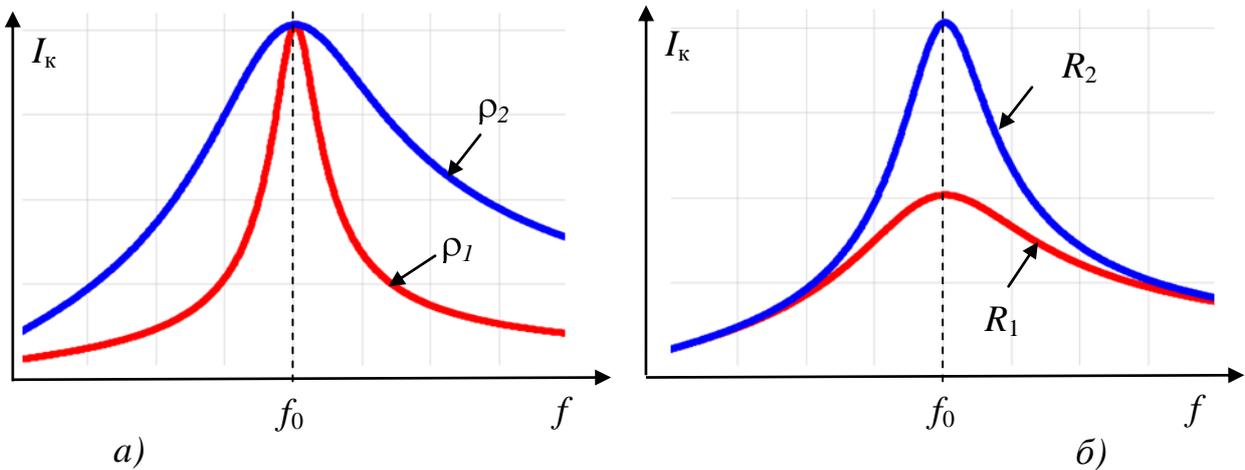


Рисунок 4

Если обратиться к интегральной характеристике контура – добротности, учитывающей соотношение между волновым и активным сопротивлением контура (см. [1]):

$$Q = \frac{\rho}{R}, \quad (8)$$

можно сделать вывод о том, что чем выше добротность контура, тем острее резонансная кривая, и, следовательно, тем точнее настройка контура на частоту резонанса.

3.5. Полоса пропускания контура

Свойства контура можно оценить по форме резонансной кривой или по значению его добротности. Еще одной характеристикой контура является его полоса пропускания.

Полосой пропускания контура называется полоса частот, в пределах которой ток в контуре уменьшается не более, чем в $\sqrt{2}$ раз. Т. е. в диапазоне частот от f_H до f_K , составляющих полосу пропускания, ток контура составляет 70,71 % и более от тока при резонансе (см. рис. 5).

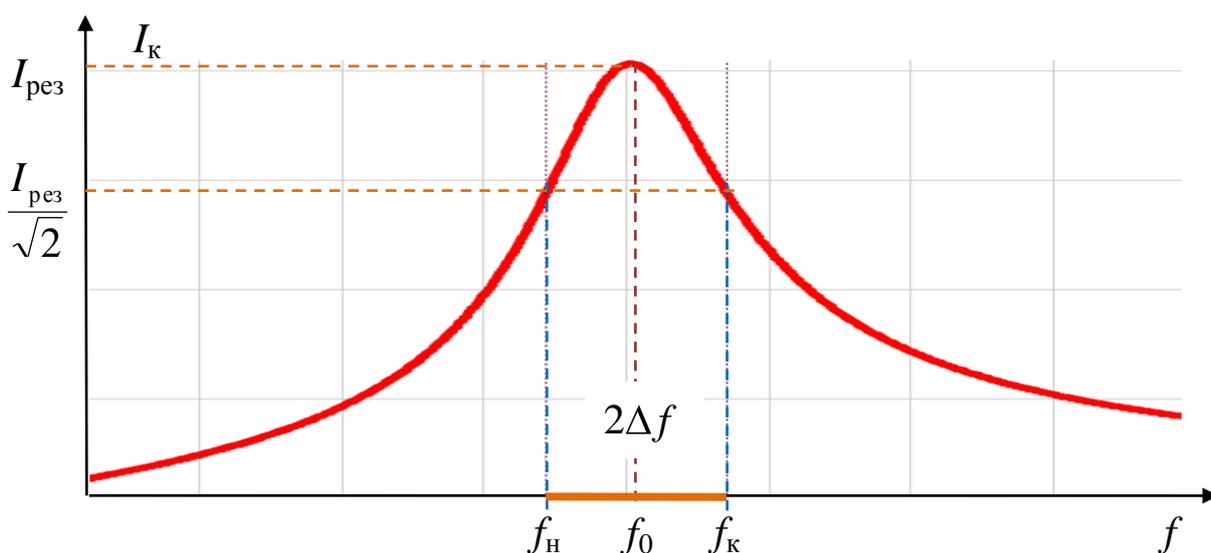


Рисунок 5

Говорят, что частоты от f_H до f_K контур пропускает, а частоты ниже f_H и выше f_K контур не пропускает.

Введем обозначение:

$$\Delta f = \frac{f_K - f_H}{2}. \quad (9)$$

Запишем без вывода приближенную формулу, связывающую ширину полосы пропускания контура с его добротностью:

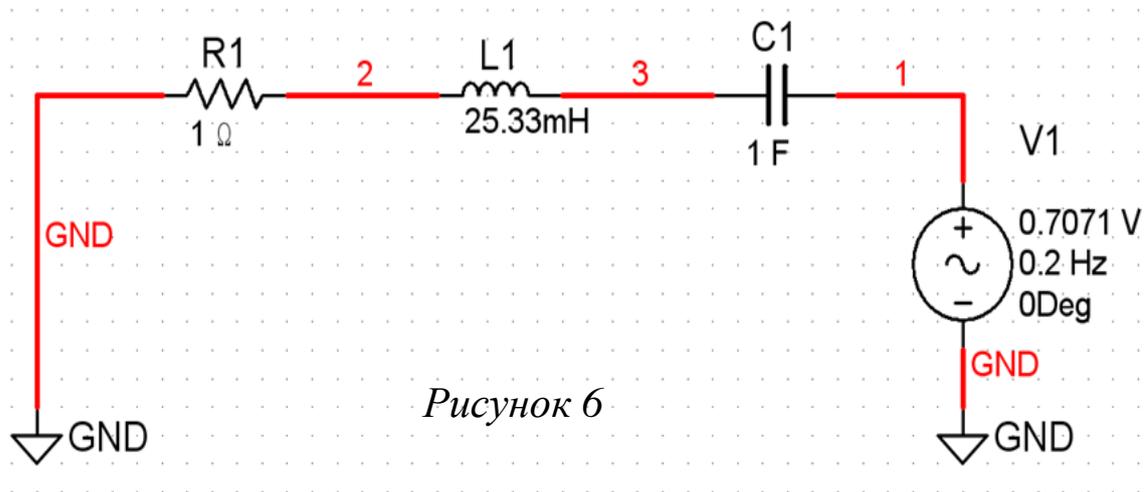
$$2\Delta f = \frac{f_0}{Q}. \quad (10)$$

Очевидно, чем выше добротность контура, тем меньше его полоса пропускания.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4. 1. Создание схемы последовательного колебательного контура

Соберите схему последовательного колебательного контура, показанную на рис. 6



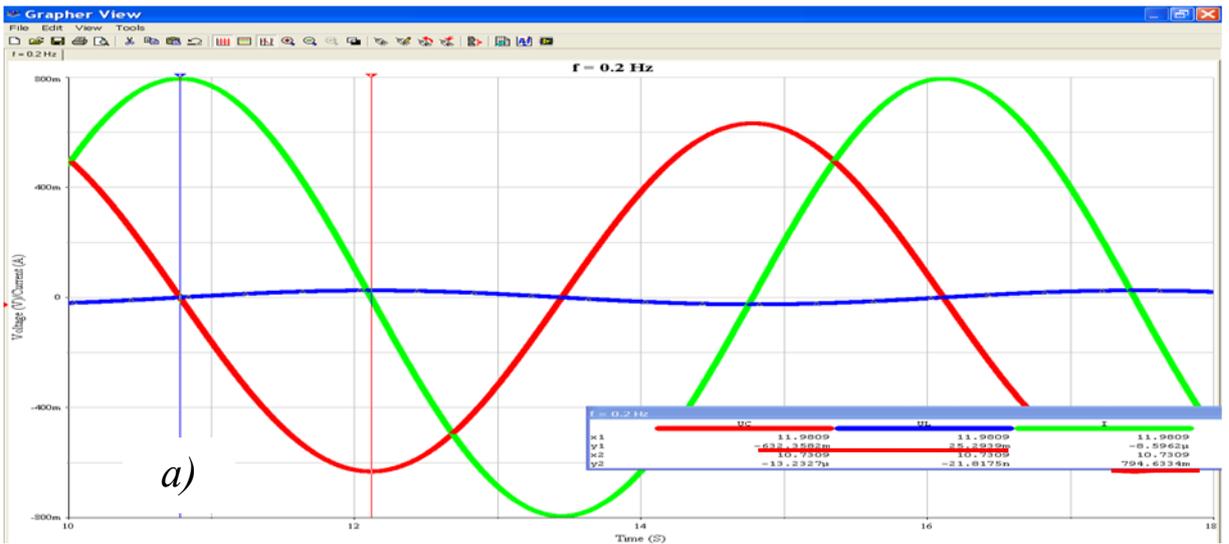
4. 2. Анализ колебаний в контуре с помощью функции Transient Analysis

Проведем моделирование процессов в контуре, поставив в настройках функции Transient Analysis различные времена моделирования для трех различных частот питающего напряжения:

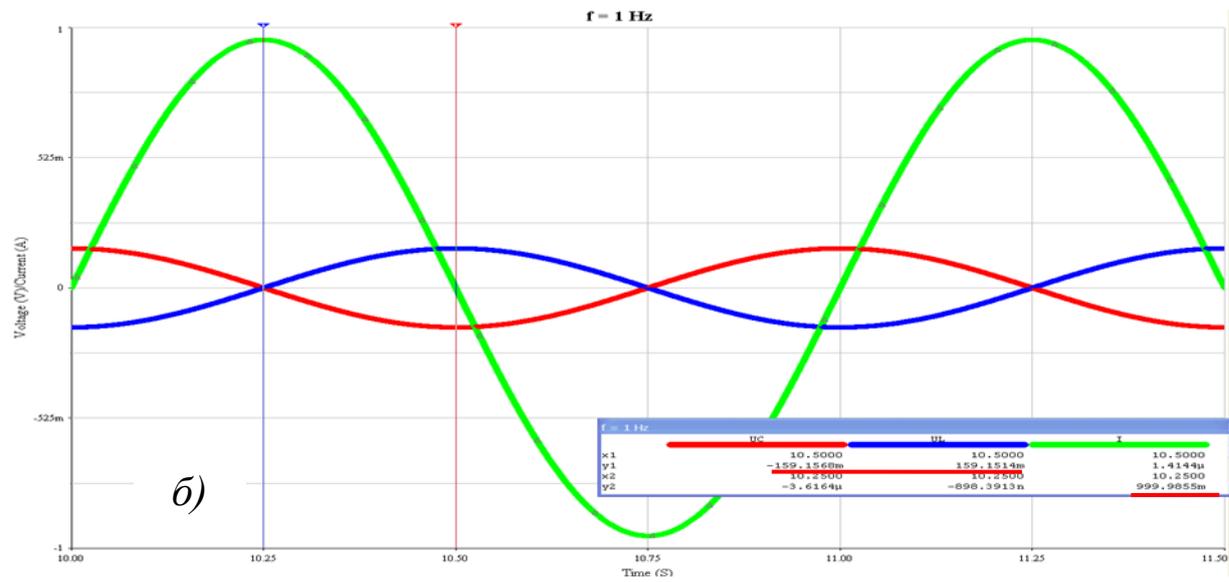
- 1) $f_1 = 0,2$ Гц, TSTART = 10 с, TSTOP = 17,5 с;
- 2) $f_0 = 1,0$ Гц, TSTART = 10 с, TSTOP = 11,5 с;
- 3) $f_2 = 5,0$ Гц, TSTART = 10 с, TSTOP = 10,3 с.

Временные диаграммы тока в контуре, напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе, соответствующие частотам f_1 , f_0 , f_2 , полученные после редактирования, показаны на рис. 7 (а, б и в соответственно).

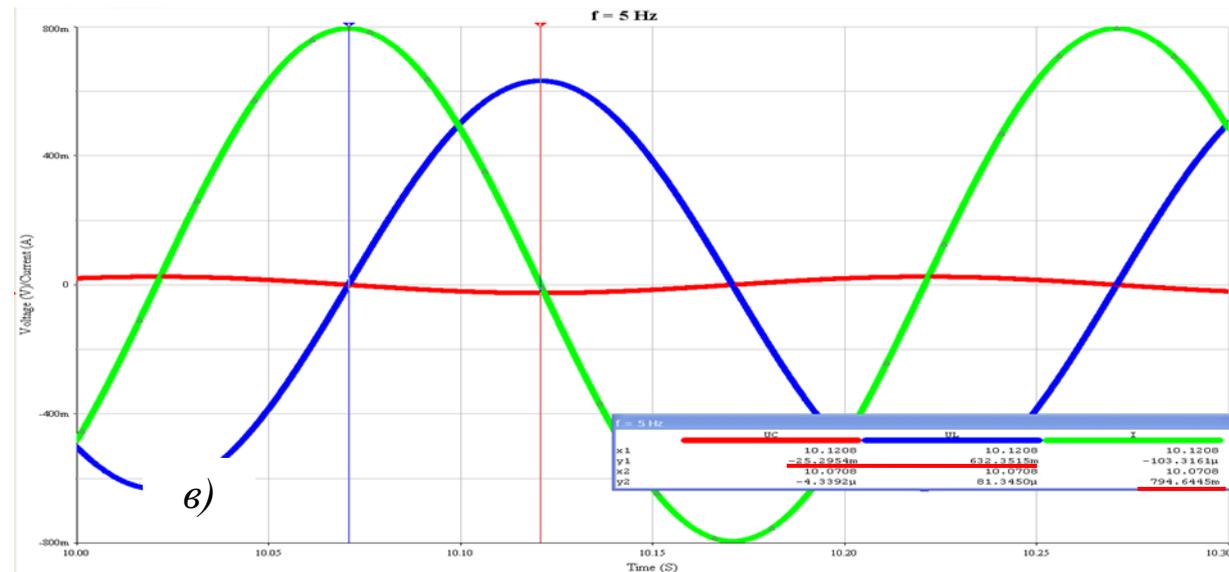
Очевидно, что резонанс в контуре наступает при частоте генератора, равной 1,0 Гц. В этом случае модули ёмкостного и индуктивного сопротивлений контура будут равны, а потому будут равны амплитуды напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе (см. рис. 7, б). Сопротивление контура будет резистивным.



a)



б)



в)

Рисунок 7

При частоте питающего генератора, равной 0,2 Гц, сопротивление конденсатора будет больше, нежели сопротивление катушки индуктивности, а потому и амплитуда напряжения на конденсаторе будет выше (см. рис. 7, а). Сопротивление контура будет резистивно-ёмкостным.

При частоте генератора, равной 5 Гц, сопротивление катушки индуктивности будет больше сопротивления конденсатора. Амплитуда напряжения на катушке индуктивности будет выше (см. рис. 7, в). Сопротивление контура в этом случае будет резистивно-индуктивным.

Проверим соответствие экспериментальных значений тока в контуре, напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе расчетным значениям.

Пусть $f = f_1 = 0,2$ Гц. Тогда индуктивное и ёмкостное сопротивления контура равны соответственно

$$X_L = \omega L = 2\pi \cdot 0,2 \cdot 25,33 \cdot 10^{-3} = 0,032 \text{ Ом};$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,2 \cdot 1} = 0,796 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление контура, рассчитанное по формуле (4) равно

$$Z = 1,258 \text{ Ом}.$$

Тогда амплитуда тока, протекающего в цепи, вычисленная по формуле (6) равна

$$I = \frac{1}{1,258} = 0,795 \text{ А}.$$

Амплитуды напряжения на катушке индуктивности U_L и конденсаторе U_C можно рассчитать, пользуясь законом Ома:

$$U_L = I \cdot X_L = 0,795 \cdot 0,032 = 0,025 \text{ В};$$

$$U_C = I \cdot X_C = 0,795 \cdot 0,796 = 0,632 \text{ В}.$$

Значения напряжений U_L , U_C и тока в контуре I отмечены в таблице курсоров на рис. 7, а.

Задание 1: Рассчитать и соотнести с результатами моделирования значения тока и напряжений в цепи для частот генератора f_0 и f_2 .

Амплитуды напряжений и тока для частот генератора f_0 и f_2 отмечены на рис. 7, б, в соответственно.

4.3. Анализ колебаний с помощью функции AC-Sweep. Определение полосы пропускания контура

Программа Multisim позволяет анализировать изменение модуля и фазы гармонических сигналов.

Построим амплитудно-частотную характеристику (резонансную кривую) колебательного контура и его фазо-частотную характеристику, применив функцию AC-Sweep.

Поставим значения начальной частоты $FSTART=0.01$ Гц, конечной частоты $FSTOP=100$ Гц. Ось ординат задаем линейной. В качестве выходной переменной выбираем ток в контуре (с обратным знаком).

АЧХ и ФЧХ колебательного контура показаны на рис. 8 а и б.

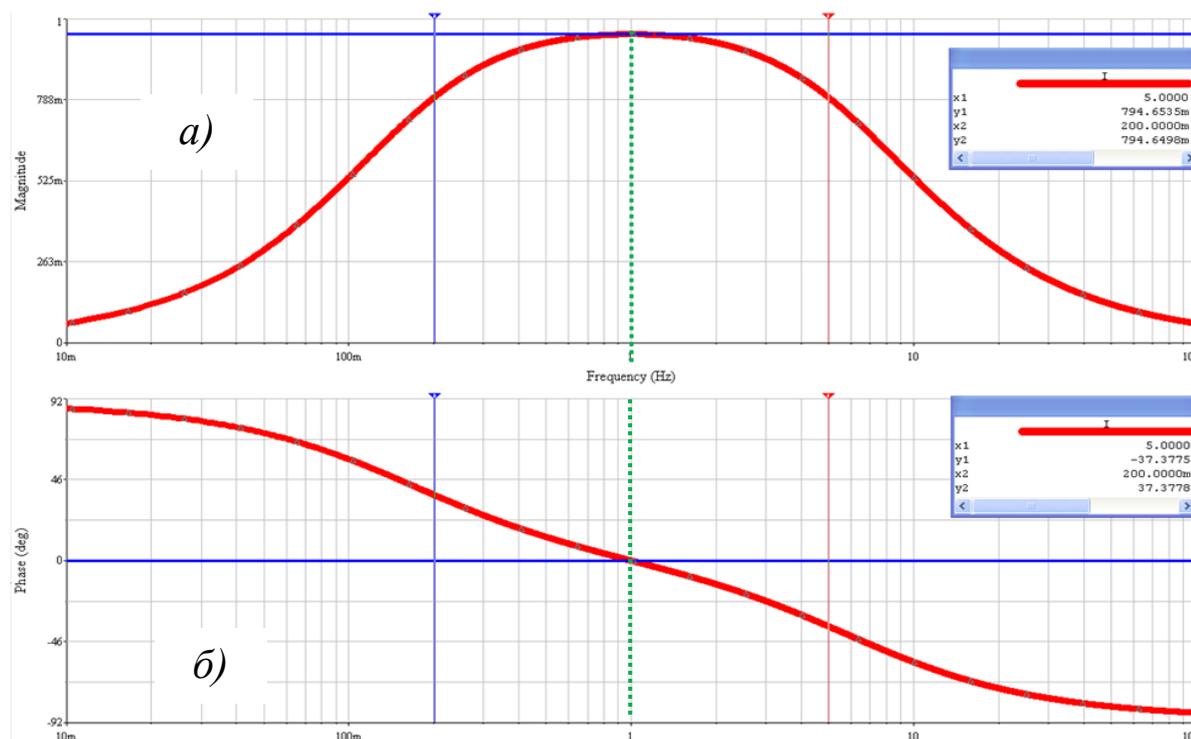


Рисунок 8

Замечание 1. Программа Multisum строит АЧХ приведенную к напряжению генератора, равному 1 В.

Амплитуда и фаза тока для частоты $f_1 = 0,2$ Гц и $f_2 = 5$ Гц показаны на рис. 8 в окне курсоров. Значение амплитуды тока с достаточно точностью соответствует полученному в п. 4.2 с помощью Transient Analysis.

Обратим внимание на то, что полоса пропускания контура должна быть шире, нежели диапазон частот от 0,2 Гц до 5 Гц, поскольку ток в контуре при этих частотах выше, чем 0,7071 тока резонанса.

Определим границы полосы пропускания контура по его резонансной кривой и сопоставим с расчетными значениями.

Моделирование дает результат $f_H = 0,155$ Гц, $f_K = 6,439$ Гц (см. рис. 9). Следовательно,

$$2\Delta f = f_K - f_H = 6,284 \text{ Гц.}$$

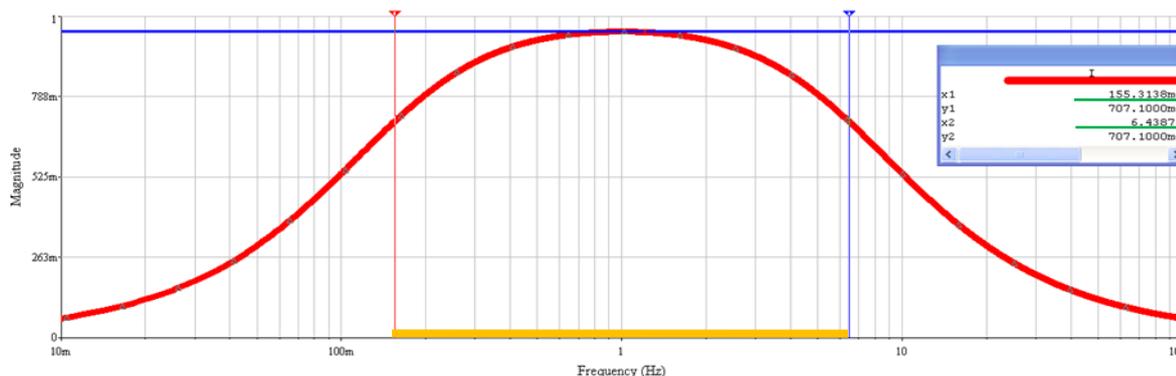


Рисунок 9

Поскольку добротность контура

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = 1 \cdot \sqrt{\frac{25,33 \cdot 10^{-3}}{1}} = 0,159,$$

расчетным путем (см. (10)) получаем хорошо согласующийся с экспериментальным результат

$$2\Delta f = \frac{f_0}{Q} = \frac{1}{0,159} = 6,283 \text{ Гц.}$$

Задание 2: Построить резонансную кривую контура, уменьшив в два раза его активное сопротивление. Определить полосу пропускания контура.

Задание 3: Построить резонансную кривую контура, имеющего ту же частоту резонанса, но в два раза большее волновое сопротивление. Определить полосу пропускания контура.

Задание 4: Включив в число выходных переменных моделирования напряжение питающего генератора (в качестве опорного), проведите повторно Transient Analysis для частот 0,2 Гц, 1 Гц и 5 Гц.

Сопоставьте фазовый сдвиг тока относительно напряжения для этих частот, полученный при проведении Transient Analysis (см. рис. 7) и AC-Sweep (см. рис. 8, б).

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Основные формулы, используемые при расчетах требуемых характеристик колебательных контуров.
3. Подробная запись всех этапов проведенных расчетов и их результаты.
4. Скриншоты графиков, полученных в результате проведения Transient Analysis и AC-Sweep, с открытыми окнами курсоров.
5. Сопоставление расчетных данных с результатами моделирования (включая выполнение заданий 1-4).
6. Выводы.

7. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Попов, В. П. Основы теории цепей / В. П. Попов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2000 – 575 с.
2. Исследование свободных колебаний в замкнутом контуре : методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория электрических цепей» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Л. А. Большевцева, А. Ф. Рыбочкин. Курск, 2013. 18 с.

УДК 681.325

Составители: А.Ф. Рыбочкин, Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор
кафедры космического приборостроения и систем связи

В.Г. Андронов

Исследование свободных колебаний в замкнутом контуре: методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория электрических цепей» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.Ф. Рыбочкин, Д.С. Коптев. – Курск, 2019. – 19 с.: ил. 23. – Библиогр.: с. 19.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат теоретические сведения о величинах, характеризующих свободные колебания в RLC-контурх, методике их расчета и об основных способах исследования в системе компьютерного моделирования Multisim. Указывается порядок выполнения лабораторной работы.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Теория электрических цепей», и учебного плана по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплине «Теория электрических цепей» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *8.02.19*. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ. ~~№~~ Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	4
3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
3. 1. Понятие колебательного контура.....	4
3. 2. Частота и период свободных колебаний в идеальном контуре.....	5
3. 3. Длина волны в пространстве, соответствующая собственной частоте колебаний идеального контура	6
3. 4. Волновое (характеристическое) сопротивление контура....	7
3. 5. Затухание колебаний в реальном контуре. Декремент затухания и добротность контура.....	8
3. 6. Условие возникновения колебаний в реальном контуре...	10
4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	10
4. 1. Создание схемы идеального колебательного контура.....	10
4. 2. Анализ переходных процессов в идеальном контуре с помощью функции Transient Analysis.....	11
4. 3. Создание схемы реального колебательного контура.....	15
4. 4. Анализ затухания колебаний в контуре с помощью функции Transient Analysis	15
5. ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.....	17
6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	18
7. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	18

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение свободных процессов в колебательных контурах:

- расчет основных параметров свободных колебаний в идеальном контуре;
- расчет основных параметров свободных колебаний в контуре с потерями.

2. Построение графиков токов и напряжений в контуре в системе компьютерного моделирования Multisim с использованием функции Transient Analysis.

2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в методических указаниях;
- ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

При подготовке к защите лабораторной работы необходимо:

- оформить отчет в соответствии с разделом 5;
- ознакомиться с соответствующими разделами конспекта лекций и рекомендованной литературой;
- устно подготовить ответы на контрольные вопросы.

3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1. Понятие колебательного контура

Электромагнитными колебаниями называют процесс непрерывного превращения энергии из электрической в магнитную и из магнитной в электрическую [1].

Идеальный колебательный контур – это электрическая цепь, содержащая емкость C и индуктивность L .

Всякий *реальный колебательный контур* помимо реактивных элементов содержит также активное сопротивление R , обуславливающее потери энергии в схеме.

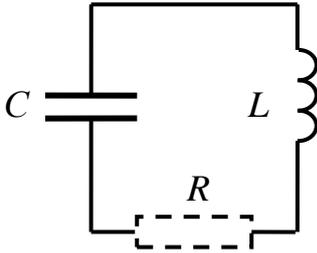


Рисунок 1

Потери энергии складываются из потерь в проводе катушки индуктивности, в рабочем диэлектрике и электродах конденсатора, в соединительных проводах и переходных контактах контура.

Схематически колебательный контур показан на рис. 1.

Колебания, происходящие только за счет первоначального сообщения контуру некоторого запаса энергии (зарядки конденсатора) без последующего её пополнения, называются *свободными* или *собственными*.

Колебательные контуры широко используются в передающих устройствах, задавая длину волны, на которой работает передатчик, и в приемных устройствах, определяя избирательность приемника.

3. 2. Частота и период свободных колебаний в идеальном контуре

Рассмотрим собственные колебания в идеальном контуре. Поскольку активное сопротивление такого контура равно нулю, запасенная энергия в процессе функционирования схемы не расходуется (не превращается в тепло и другие виды энергии).

Поскольку энергия электрического поля полностью превращается в энергию магнитного поля, то максимальные значения энергии конденсатора W_C и катушки W_L равны:

$$W_C = W_L, \quad (1)$$

или

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (2)$$

где U_m и I_m – амплитудные значения напряжения на контуре (на катушке индуктивности) и тока в контуре соответственно.

С другой стороны, между этими величинами выполняется соотношение

$$U_m = X_L I_m = \omega_0 L \cdot I_m, \quad (3)$$

где X_L – модуль комплексного сопротивления индуктивности;
 ω_0 – круговая (угловая) частота тока в контуре.

Таким образом, из (2) и (3) с учетом равенства (4)

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f_0 \quad (4)$$

следует выражения (5) для частоты f_0 :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (5)$$

и (6) для периода T_0 свободных колебаний контура

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = 2\pi \cdot \sqrt{LC}. \quad (6)$$

Качественно объяснить формулу (6) можно достаточно просто.

Для создания между обкладками конденсатора с бóльшей ёмкостью той же разности потенциалов требуется бóльшее количество электричества. Следовательно, увеличение ёмкости увеличивает время заряда и разряда конденсатора.

Увеличивая индуктивность контура, мы наращивает её противодействие изменениям тока, а потому ток в контуре с бóльшей индуктивностью будет нарастать и убывать медленнее.

3. 3. Длина волны в пространстве, соответствующая собственной частоте колебаний идеального контура

В передающем устройстве энергия электромагнитных колебаний контура направляется в антенну, излучающую, в свою очередь, эту энергию в виде электромагнитных колебаний в пространство.

Каждой частоте собственных колебаний контура соответствует определенная длина волны в пространстве (λ_0), связанная с ней соотношением

$$\lambda_0 = vT_0 = \frac{v}{f_0}, \quad (7)$$

где v – скорость распространения электромагнитной энергии.

Известно, что в свободном пространстве величина $v = \text{const}$ и совпадает со скоростью света: $v \approx 3 \cdot 10^8$ м/с.

3. 4. Волновое (характеристическое) сопротивление контура

Волновое сопротивление контура ρ определяется отношением амплитуды напряжения на контуре к амплитуде тока в контуре в режиме свободных колебаний. Для его нахождения выразим это отношение из равенства (2):

$$\rho = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (8)$$

Для выяснения *физического смысла волнового сопротивления* рассмотрим два контура, первый из которых образован малой емкостью C_1 и большой индуктивностью L_1 , второй – большой емкостью C_2 и малой индуктивностью L_2 (см. рис. 2).

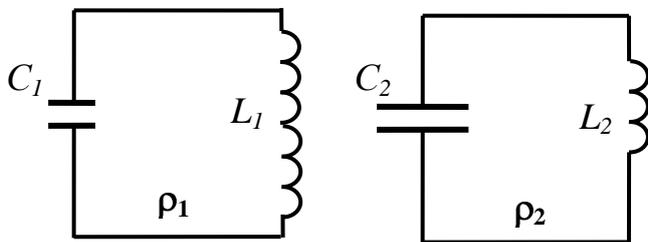


Рисунок 2

Пусть при этом выполняется равенство

$$L_1 C_1 = L_2 C_2, \quad (9)$$

означающее равенство периода и частоты собственных колебаний обоих контуров. При этом очевидно, что волновое сопротивление ρ_1

первого контура много больше волнового сопротивления второго контура ρ_2 :

$$\rho_1 \gg \rho_2. \quad (10)$$

А это означает (см. (8)), что при одинаковом напряжении ток в первом контуре будет много меньше тока во втором контуре:

$$I_{m1} \ll I_{m2}. \quad (11)$$

Таким же соотношением будет связано и количество «колеблющейся» в контурах энергии.

Рассмотрим модули индуктивного сопротивления катушки (X_L) и емкостного сопротивления конденсатора (X_C) на частоте собственных колебаний контура:

$$X_L = \omega_0 L, \quad X_C = \frac{1}{\omega_0 C}. \quad (12)$$

Подставив в эти равенства значение угловой частоты собственных колебаний контура (4), получим следующее:

$$X_L \Big|_{f=f_0} = X_C \Big|_{f=f_0} = \rho. \quad (13)$$

Таким образом, *волновое сопротивление* контура равно модулю индуктивного сопротивления катушки и емкостного сопротивления конденсатора для тока свободных колебаний

3. 5. Затухание колебаний в реальном контуре.

Декремент затухания и добротность контура

В реальных контурах всегда присутствует активное сопротивление, а потому количество «колеблющейся» энергии в контуре постоянно уменьшается, что приводит к затуханию колебаний. В случае малых затуханий амплитуда колебаний (амплитуда напряжения и амплитуда тока) убывает по экспоненциальному закону:

$$U_m(t) = U_m(0) e^{-\frac{\delta t}{T}}; \quad I_m(t) = I_m(0) e^{-\frac{\delta t}{T}}, \quad (14)$$

где δ – безразмерная величина, являющаяся количественной характеристикой скорости затухания.

Величина δ в теории колебательных систем носит название *декремент затухания*. Величина, обратная декременту затухания, равна количеству колебаний, за которые амплитуда колебаний уменьшится в $e \approx 2,71$ раз.

Графически декремент затухания колебаний можно найти, взяв натуральный логарифм отношения любых двух последовательных максимальных (или минимальных) отклонений колеблющейся величины:

$$\delta = \ln \frac{U_{m(j)}}{U_{m(j+1)}} = \ln \frac{I_{m(j)}}{I_{m(j+1)}}. \quad (15)$$

Кроме того, оказывается, именно декремент затухания позволяет определить, какая часть энергии расходуется в контуре на тепловыделение за половину периода

$$\delta = \frac{W_R}{W_L}, \quad (16)$$

где W_R – количество энергии, выделяемой на активном сопротивлении; W_L – полное количество энергии контура.

Известно, что W_L определяется согласно соотношению (2), а

$$W_R = \frac{I_m^2 R}{2} \cdot T. \quad (17)$$

Тогда, с учетом (4), (5) и (8), получим

$$\delta = \frac{R}{2L} \cdot T = \frac{R}{2L} \cdot \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{\pi \cdot R}{\rho}. \quad (18)$$

В реальных контурах значение декремента затухания не превышает нескольких сотых.

Замечание: затухающие колебания не являются периодическими. Однако, если декремент δ мал, можно условно использовать понятие *периода затухающих колебаний*, как временного интервала между двумя последовательными максимумами колеблющейся величины.

Помимо декремента затухания используются понятия «затухание» и «добротность» контура. *Затуханием контура d* называют отношение активного и волнового сопротивлений контура, а *добротностью Q* – величину обратную затуханию:

$$d = \frac{R}{\rho}; \quad Q = \frac{1}{d} = \frac{\rho}{R}. \quad (19)$$

Чем больше волновое сопротивление контура по сравнению с активным, тем «лучше» контур, тем выше его добротность.

3. 6. Условие возникновения колебаний в реальном контуре

Колебательный процесс в реальном контуре может возникнуть лишь тогда, когда есть условия для обмена энергией между реактивными элементами схемы: катушкой индуктивности и конденсатором.

Если активное сопротивление контура велико, то такие условия не возникают, и весь запас электрической энергии, накопленной конденсатором, превращается в тепло еще до начала колебательного процесса.

Расчеты показывают, что колебания в контуре с активным сопротивлением могут происходить только при выполнении соотношения:

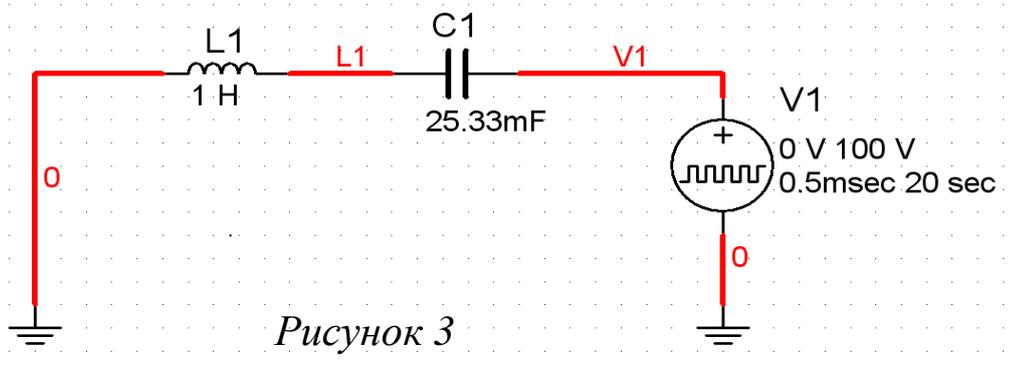
$$R < 2\rho. \quad (20)$$

В том случае, когда удвоенное волновое сопротивление меньше активного, процесс носит *апериодический* (не колебательный) характер. Если имеет место равенство этих величин, процесс называется *критическим*.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4. 1. Создание схемы идеального колебательного контура

Соберите схему идеального колебательного контура, показанную на рис. 3



Используемый для начальной зарядки конденсатора импульсный источник Pulse Voltage расположен в библиотеке Sources (см. рис. 4). Окно редактирования компонента показано на рис. 5.

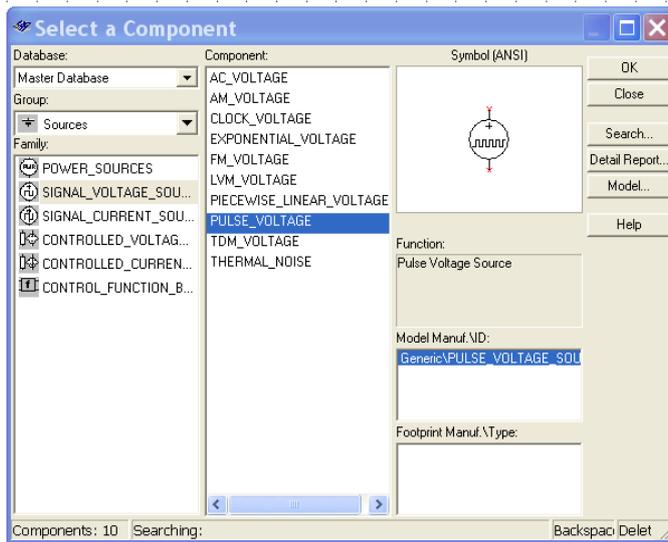


Рисунок 4

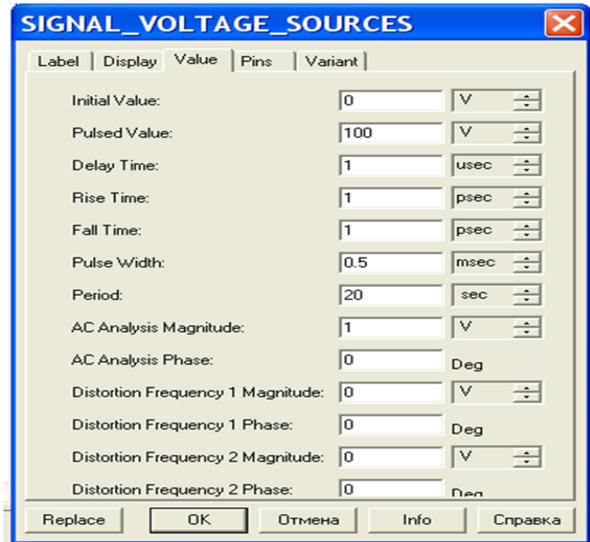


Рисунок 5

Поскольку нам необходимо быстро зарядить конденсатор, а затем полностью прекратить подачу энергии в контур, установим параметры импульсного источника такими, как показано на рис. 5:

- начальное значение (Initial Value) – 0 В;
- амплитуда импульса (Pulsed Value) – 100 В;
- задержка импульсов (Delay Time) – 1 мкс;
- длительность фронта (Rise Time) – 1 пс;
- длительность среза (Fall Time) – 1 пс;
- длительность импульса (Pulse Width) – 0,5 мс;
- период (Period) – 20 с.

Длительность импульса должна быть достаточной для зарядки конденсатора (она определяет максимальное напряжение на контуре), а период – многократно бóльшим, нежели период свободных колебаний контура.

4. 2. Анализ переходных процессов в идеальном контуре с помощью функции Transient Analysis

Проведем анализ процессов, происходящих в колебательном контуре. Выберем в меню пункты: Simulate → Analysis → Transient Analysis (Моделирование → Анализ → Анализ переходных процессов).

Изменим на открывшейся вкладке Analysis Parameters (Параметры анализа), установив показанные на рис. 6:

- начальное время (Start Time TSTART) – 0 с;
- конечное время (End Time TSTOP) – 3 с;
- максимальный шаг моделирования (maximum time step TMAX) – 0,0001 с.

На вкладке Output (выходные переменные) выберем для анализа (добавив в список Selected variables for analysis, находящийся в правой половине окна) ток в контуре с отрицательным знаком I1#branch (см. [3, с. 25], замечание) и напряжение на катушке \$I1. Для этого, выделив их из общего списка, нажмем кнопку Add (Добавить). Знак «←» добавляем с помощью кнопки Add Expression (Добавить выражение) (см. рис. 7).

Запускаем моделирование, нажав кнопку Simulate (Моделировать).

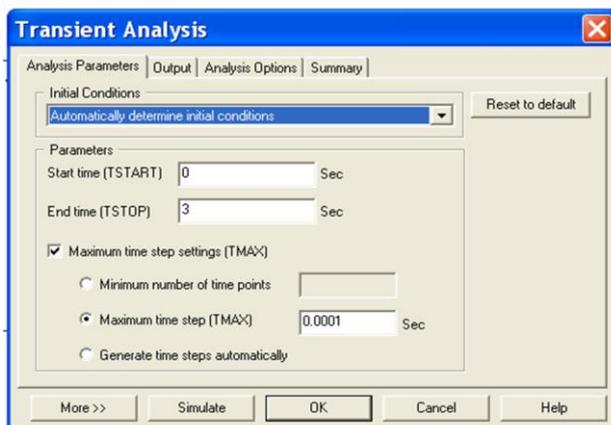


Рисунок 6

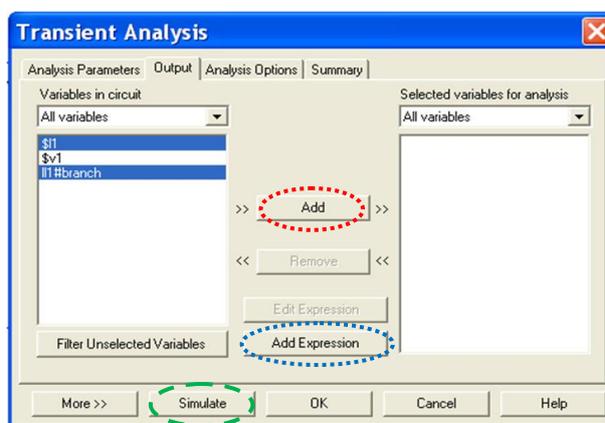


Рисунок 7

После завершения моделирования откроется окно графика (см. рис. 8), который необходимо отредактировать, поскольку неправильный диапазон по оси ординат не дает возможности увидеть действительно происходящий колебательный процесс.

Вызовем окно свойств графика – Graph Properties, выбрав пункты меню Edit → Properties (Правка → Свойства). Поменяем диапазон вертикальной оси (Left Axis), установив на соответствующей вкладке минимальное значение равное –0.4; максимальное равное +0.4 (см. рис. 9); диапазон оси времени (Bottom Axis) оставим без изменения.

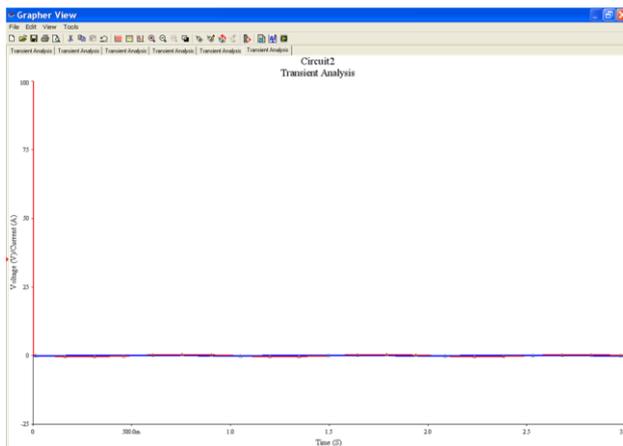


Рисунок 8

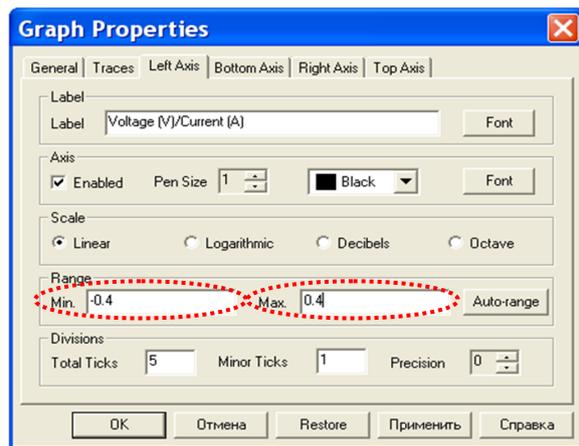


Рисунок 9

На вкладке Traces увеличим толщину обеих линий, поставив равной 6. Полученный график показан на рис. 10.

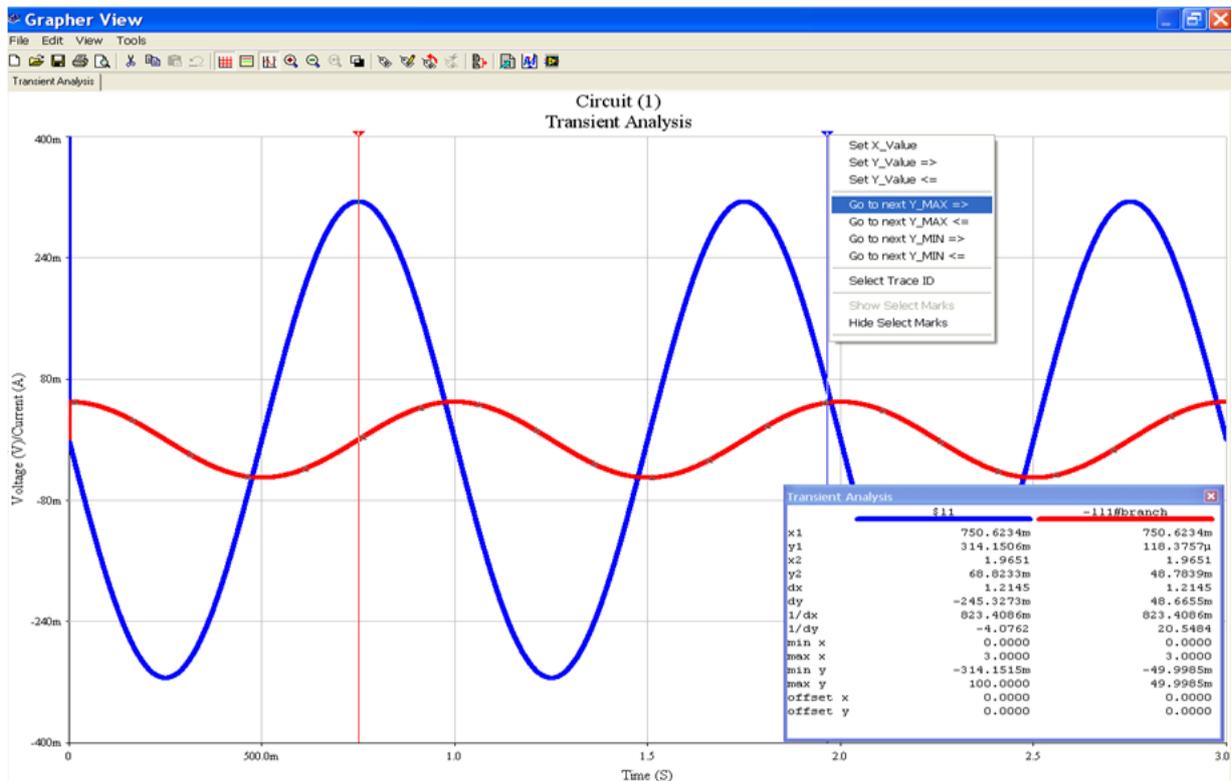


Рисунок 10

Внизу справа открыто окно курсоров, вверху – альтернативное меню правого курсора, вызванное щелчком правой кнопкой мыши по его верхнему треугольнику.

Опции поиска альтернативного меню курсора:

Set X Value (Настроить на значение по оси X) – устанавливает курсор на определенное (задаваемое в открывающемся окне) значение по оси X;

Set X Value => или <= (Настроить значение по оси Y) – устанавливает курсор на определенное значение по оси Y, ближайшее в выбранном направлении;

Go to next Y_MAX => или <= (Перейти к следующему максимальному значению) – устанавливает курсор на точку ближайшего максимума в выбранном направлении;

Go to next Y_MIN => или <= (Перейти к следующему минимальному значению) – устанавливает курсор на точку ближайшего минимума в выбранном направлении.

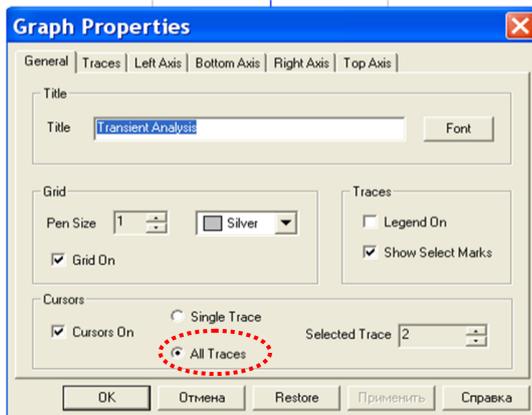


Рисунок 11

и выбрать нужную кривую (см. рис. 11).

Анализ полученных графиков показывает, что период свободных колебаний контура равен 1 с, что полностью соответствует расчетному значению.

Амплитуда тока I_m (max у в окне курсора тока П1#branch) равна 54.350 мА, амплитуда напряжения U_m равна 341.493 мВ. Поскольку максимальное значение напряжения равно 100 В, возьмем значение, противоположное min у в окне курсора напряжения \$11.

Опции поиска незаменимы при определении по результатам моделирования амплитуды тока и напряжения, а также периода колебаний.

На вкладке General окна свойств графика – Graph Properties можно настроить отображение сведений для курсоров об одной (Single Traces) или всех (All Traces) кривых, находящихся на графике, и

Соотношение между амплитудами U_m и I_m равно

$$\frac{U_m}{I_m} = 6.283,$$

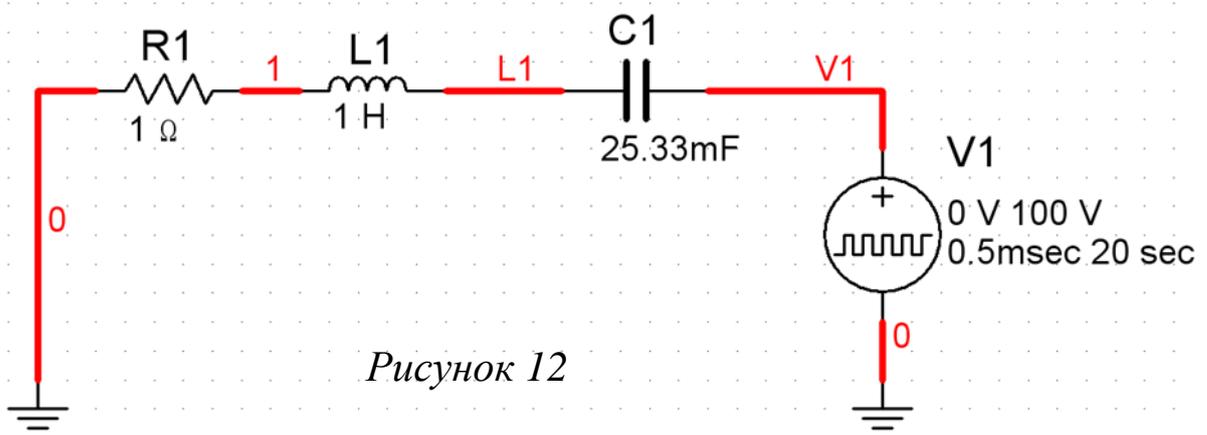
что совпадает с волновым сопротивлением контура ρ , определенным по формуле (8).

Задание 1: увеличьте вдвое длительность импульса (Pulse Width) в параметрах источника напряжения. Проведите моделирование.

Определите по графику период колебаний, а также соотношение между амплитудами U_m и I_m в этом случае.

4.3. Создание схемы реального колебательного контура

Добавим в схему активное сопротивление $R = 1$ Ом, удовлетворяющее соотношению (20) – см. рис. 12.



4.4. Анализ затухания колебаний в контуре с помощью функции Transient Analysis

Проведем моделирование процессов в контуре с активным сопротивлением, изменив в настройках функции Transient Analysis (см. п. 4.2) только время моделирования (см. рис. 6). Для большей наглядности графика увеличим временной интервал анализа, поставив $TSTOP = 5$ с.

После редактирования, аналогичного проведенному в п. 4. 2, получим график, изображенный на рис. 13.

Курсоры на графике отмечают положения двух «первых» максимумов напряжения на контуре:

$$I_{m1} = 217,0318 \text{ мВ}; I_{m2} = 131,4276 \text{ мВ}.$$

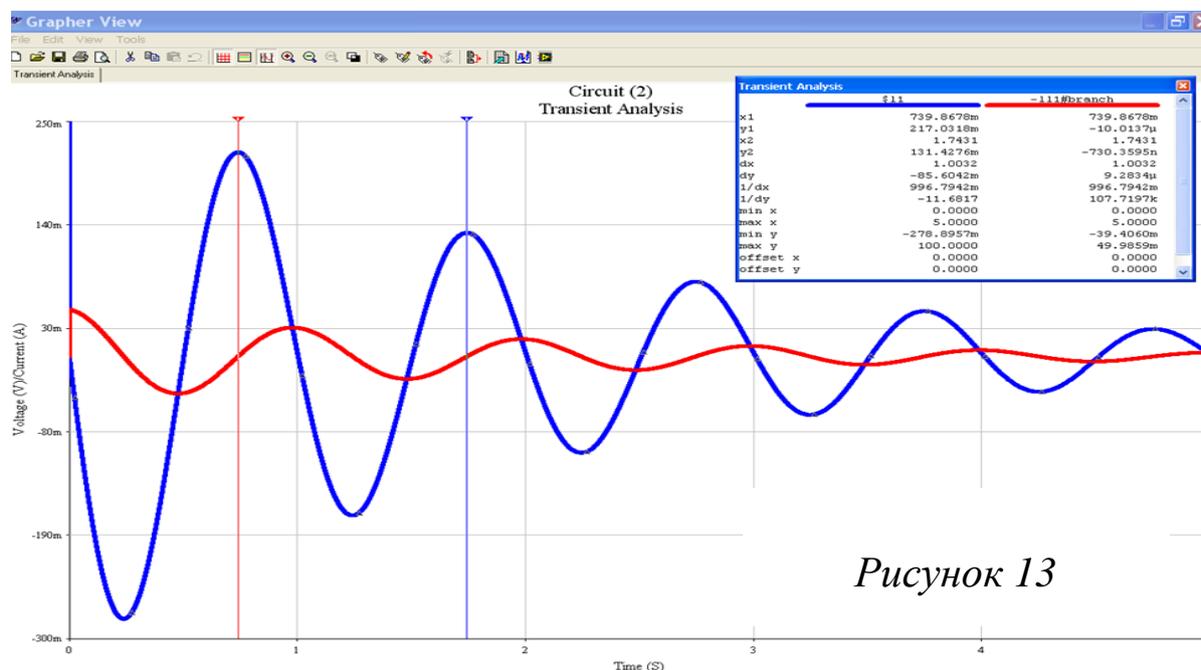


Рисунок 13

Следующие максимумы:

$$U_{m3} = 79,5884 \text{ мВ}; U_{m4} = 48,1962 \text{ мВ}; U_{m5} = 29,1861 \text{ мВ}.$$

Отношение любых двух из последовательных максимумов

$$k = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} = \dots = \frac{U_{m4}}{U_{m5}} = 1,6513.$$

Натуральный логарифм коэффициента k

$$\ln k = \ln 1.6513 = 0,5016;$$

с учетом небольшой погрешности вычислений равен декременту затухания, рассчитанному по формуле (18):

$$\delta = \frac{\pi \cdot R}{\rho} = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}} \approx 0,5.$$

В e раз колебания контура затухают за два условных периода.

Задание 2: Увеличив активное сопротивление контура в два раза, рассчитайте и определите графически декремент затухания.

5. ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Собрав соответствующие схемы (см. рис. 3 и 12), выполните анализ колебаний идеального контура и контура с активным сопротивлением.

Рассчитайте следующие величины, характеризующие свободные колебания:

- круговая и линейная частоты;
- период;
- длина волны;
- волновое сопротивление контура;
- декремент затухания;
- добротность контура.

Воспользовавшись графиками кривых тока в контуре и напряжения на контуре (полученным с помощью функции Transient Analysis – см., для примера, рис. 10 и рис. 13), проверьте соответствие теоретических результатов экспериментальным.

Параметры используемых компонентов указаны в табл. 1.

Вариант задания для каждого студента соответствует его номеру в списке подгруппы/группы в журнале преподавателя.

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6
Ёмкость C, мкФ	400	250	100	30	500	650
Индуктивность L, мГн	6,3350	2,5350	4,0530	0,5404	1,2665	3,8970
Сопротивление R, Ом	1,2670	1,0140	5,0662	6,7550	1,0135	1,9485
№ варианта	7	8	9	10	11	12

Ёмкость C , мкФ	150	50	850	70	20	80
Индуктивность L , мГн	4,2217	0,5066	6,7053	0,8142	5,0660	2,8500
Сопротивление R , Ом	3,3760	2,5330	1,1176	3,2570	10,134	7,5996

Замечание: при отсутствии возможности установить значение параметра с требуемой точностью используйте меньшие единицами измерения, переводя, например, миллигенри в микрогенри.

Параметры импульсного источника подберите для обеих схем самостоятельно.

Время моделирования для схемы реального колебательного контура установите, учитывая количества периодов, необходимое для значительного уменьшения амплитуды колебаний.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Основные формулы, используемые при расчетах требуемых характеристик колебательных контуров.
3. Подробная запись всех этапов проведенных расчетов и их результаты.
4. Скриншоты графиков, полученных в результате проведения Transient Analysis, с открытыми окнами курсоров.
5. Сопоставление расчетных данных с результатами моделирования.
6. Выводы.

7. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Попов, В. П. Основы теории цепей / В. П. Попов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2000 – 575 с.
2. Исследование резистивных схемных соединений в цепях постоянного тока : методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория электрических цепей» /

Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Л. А. Большевцева, А. Ф. Рыбочкин. Курск, 2013. 22 с.

3. Исследование линейных цепей при гармоническом воздействии : методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория электрических цепей» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Л. А. Большевцева, А. Ф. Рыбочкин. Курск, 2013. 31 с.: ил. 24, табл. 1. Библиогр.: с. 31.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
« 8 » _____ 2019 г.



**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ СХЕМНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Методические указания
по выполнению лабораторной работы
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
по дисциплине «Теория электрических цепей»

Курск 2019

УДК 681.325

Составители: А.Ф. Рыбочкин, Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор
кафедры космического приборостроения и систем связи

В.Г. Андронов

Исследование резистивных схемных соединений в цепях постоянного тока: методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория электрических цепей» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.Ф. Рыбочкин, Д.С. Коптев. – Курск, 2019. – 22 с.: ил. 29 – Библиогр.: с. 22.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат сведения о характеристиках резистивного элемента электрической цепи и об основных способах исследования резистивных цепей в системе компьютерного моделирования Multisim. Указывается порядок выполнения лабораторной работы.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Теория электрических цепей», и учебного плана по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплине «Теория электрических цепей» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *8.02.19*. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,278. Уч.-изд. л. 1,157. Тираж 100 экз. Заказ *№2* Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2. ПОДГОТОВКИ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	4
3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	4
3. 1. Создание схемы	4
3. 2. Измерения с использованием индикаторов.....	8
3. 3. Измерения с использованием мультиметра	11
3. 4. Измерения с использованием ваттметра.....	13
3. 5. Анализ рабочей точки.....	14
3. 6. Проведение анализа с помощью функции DC-Sweep.....	15
3. 7. Настройка вида графика	17
3. 8. Использование программы Postprocessor	18
4. ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.....	20
5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	22
6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	22

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение процессов в схемах с резисторами на постоянном токе с помощью системы компьютерного моделирования и анализа схем Multisim:

- определение значений токов и напряжений в схеме с постоянными сигналами с использованием индикаторов;
- измерение рассеиваемой мощности с применением ваттметра;
- определение значений токов и напряжений в схеме с применением функции анализа рабочей точки.

2. Изучение процессов моделирования в схемах с резисторами на постоянном токе при изменяющихся параметрах компонентов схем.

3. Построение графиков зависимости напряжений и токов в схеме от напряжения источника.

2. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить теоретический материал, содержащийся в соответствующих разделах конспекте лекций;
- ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

При подготовке к защите лабораторной работы необходимо:

- оформить отчет в соответствии с разделом 5;
- ознакомиться с рекомендованной литературой;
- устно подготовить ответы на контрольные вопросы.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

3.1. Создание схемы

Для создания схемы необходимо следовать алгоритму:

- ✓ Запустить программу Multisim из меню Пуск.
- ✓ Проверить настройки схемы.

Для этого в меню Options (Опции) выберем пункт Sheet Properties (Свойства страницы). Откроем вкладку Circuit (Схема). Верхняя панель окна показывает, какая информация должна отображаться около каждого компонента схемы (см. рисунок 1).

Большая часть информация на данном этапе проектирования не представляет интереса, а лишь загромождает схему. Поэтому отключим ненужные опции, оставив лишь название компонента и его значение. (Найдите эти опции самостоятельно!)

На вкладке Workspace (см. рисунок 2) отметим опцию Show grid (Показать сетку), которая будет нам полезна при размещении компонентов.

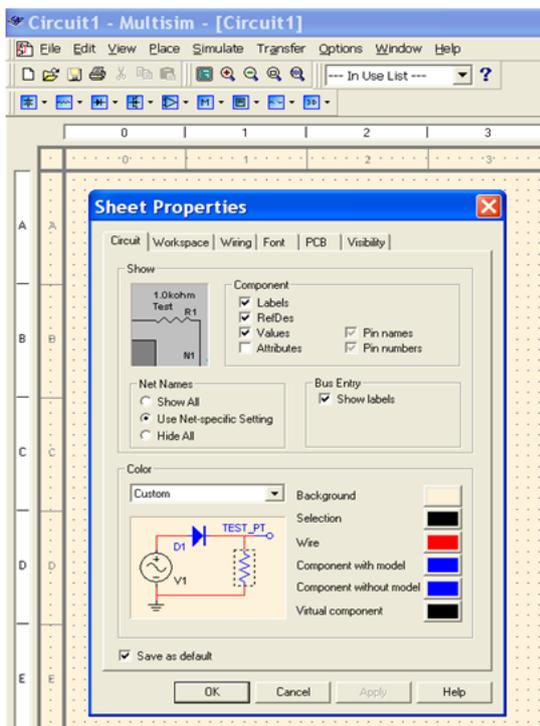


Рисунок 1

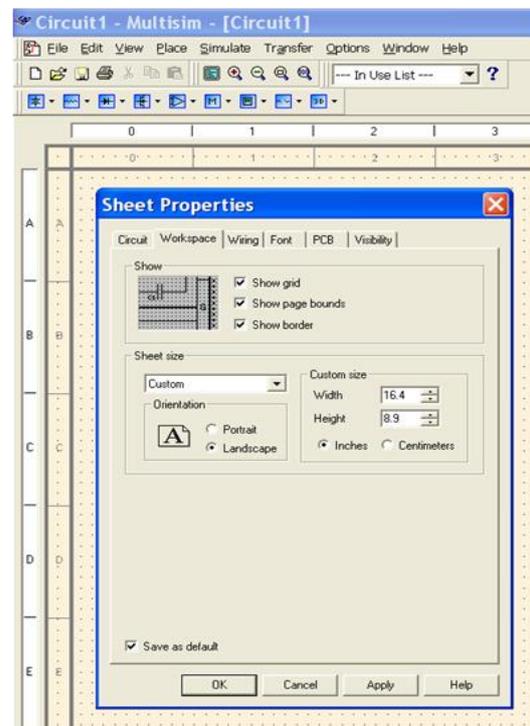


Рисунок 2

Наконец в пункте Preferences (Параметры) на вкладке Parts отметим опцию Place Single component (Поместить один компонент), благодаря которой можно размещать компоненты без опасения добавить два одинаковых компонента по ошибке (см. рисунок 3).

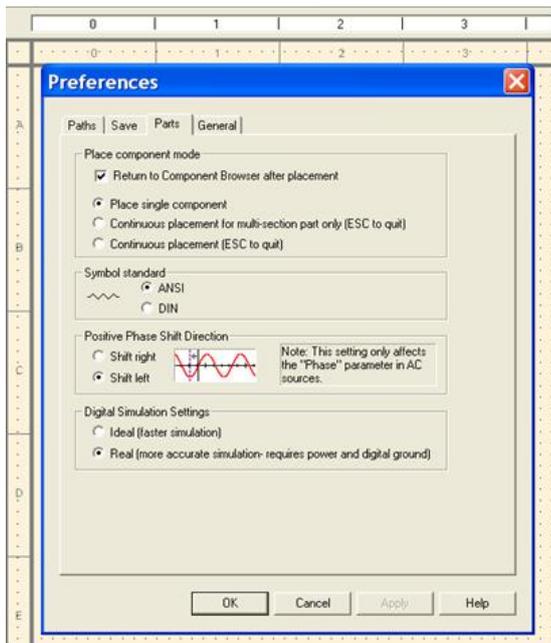


Рисунок 3

Также на этой вкладке можно выбрать стандарт для изображения компонентов (ANSI или DIN), а на вкладке Save интервалы времени для автосохранения созданных документов.

- ✓ **Собрать схему** (см. рисунок 4), установив заданные названия и значения компонентов.

Поскольку используемый по умолчанию в программе Multisim стандарт компонентов ANSI нами изменен не был, изображение некоторых компонентов могут быть отличны от используемых Вами ранее.

Для перехода к привычным изображениям необходимо выбрать стандарт DIN.

Примечание 1. В программе Multisim существуют несколько

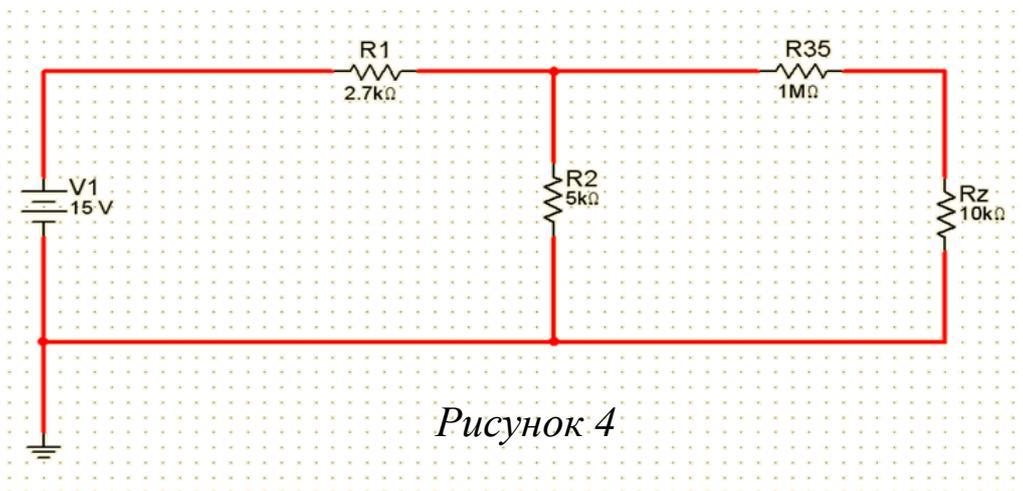


Рисунок 4

способов выбора компонентов. Поскольку в данной работе нам будут необходимы только виртуальные компоненты, удобнее всего воспользоваться панелью Virtual (View ► Toolbars ► Virtual).

При наведении курсора на любую пиктограмму высвечивается название семейства компонентов. При нажатии на стрелку, расположенную рядом с каждой пиктограммой, (см. рисунок 5), открывается выпадающий список компонентов семейства.

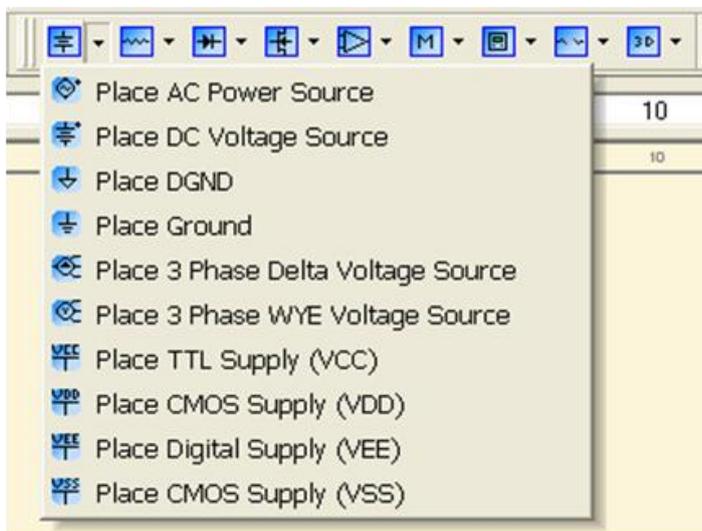


Рисунок 5

Виртуальный источник постоянного напряжения V1 (DC voltage Source) относится к семейству Power Source (крайняя левая пиктограмма), виртуальный резистор (Virtual resistor) – к семейству Basic (вторая слева пиктограмма).

Примечание 2. Виртуальные компоненты (в отличие от стандартных) позволяют произвольным

образом изменять свои параметры.

Для изменения параметров любого виртуального компонента необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на этом компоненте. Откроются соответствующие диалоговые окна (диалоговое окно для изменения параметров резисторов показано на рисунке 6, источников напряжения – на рисунке 7).

На вкладке Value можно изменить значения компонентов, на вкладке Label – названия.

Примечание 3. Для подключения компонентов (соединения их проводами) поместим курсор мыши на нужный вывод компонента. При приближении к выводу стрелка курсора заменяется на символ в виде перекрестья. Это значит, что все готово для добавления провода.

Щелкнем левой кнопкой мыши и переместим курсор. При перемещении за курсором потянется черная линия. Для создания ломаной кривой с более чем одним изломом на месте требующихся изломов необходимо щелкать левой кнопкой мыши.

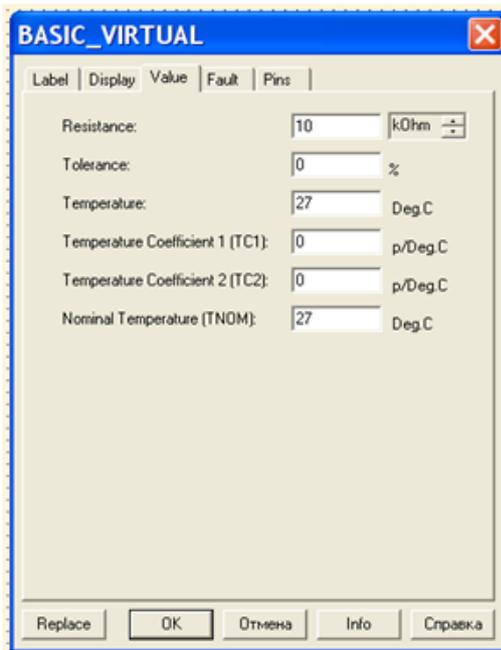


Рисунок 6

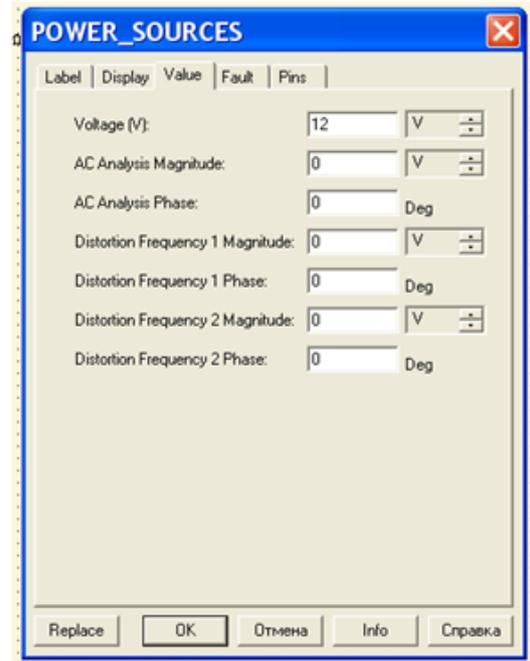


Рисунок 7

Приблизим линию к конечному пункту (выводу подключаемого элемента) и щелкнем левой кнопкой. Черная линия станет красной, а это означает, что соединение успешно добавлено.

Примечание 4. Для моделирования схемы в программе Multisim необходимо подключение к ней хотя бы одного заземления. Поскольку схема не содержит цифровых компонентов, добавим обычное (нецифровое) заземление Ground. Оно доступно в семействе Power Source (крайняя левая пиктограмма на панели Virtual).

3. 2. Измерения с использованием индикаторов

✓ Подключение индикатора тока.

Для определения ток источника воспользуемся индикатором тока (Ammeter (Horizontal) – амперметр с горизонтальными выводами), расположенном на панели Virtual (Measurement Family – семейство измерительных инструментов).

Амперметр располагается последовательно с компонентом, ток через который будет измеряться. Включим его в схему так, как показано на рисунке 8 (компонент U1).

Символы «+» и «-» на амперметре обозначают следующее: если ток входит в «+плюс» и выходит из «минуса» на экране отображается положительное значение. В противном случае – отрицательное.

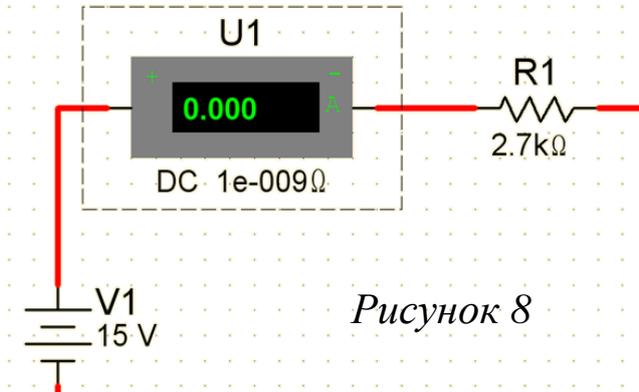


Рисунок 8

Примечание 5. Окно настройки параметров амперметра (открывающееся при двойном щелчке левой кнопкой мыши по символу компонента) содержит два важных параметра (см. рисунок 9).

Первый – Mode (режим) – настроен на режим измерения постоянного тока DC. Оставим его без изменения.

Второй – Resistance (R) – соответствует последовательному сопротивлению амперметра. Поскольку индикатор тока соединяется с другими элементами ветви последовательно, то его сопротивление (по умолчанию 1нОм) будет добавляться к общему сопротивлению ветви.

Заданное по умолчанию значение последовательного сопротивления амперметра мало по сравнению с общим сопротивлением схемы, поэтому менять его тоже не имеет смысла.

✓ Подключение индикатора напряжения

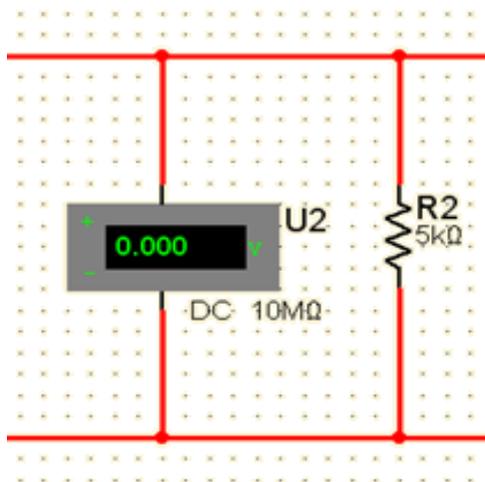


Рисунок 9

Индикаторы напряжения также расположены на панели Virtual (в семействе Measurement Family). Выберем Voltmeter Vertical (вольтметр с вертикальными выводами) и подключим его в схему параллельно участку цепи, падение напряжения на котором измеряется. Подключение для измерения падения напряжения на резисторе R35 показано на рисунке 9.

Как и при работе с индикаторами тока, индикаторы напряжения также можно настроить на измерение переменного и постоянного тока. В окне настройки параметров сохраним значение DC.

Другой важный параметр – это параллельного сопротивления вольтметра (см. рисунок 10). Значение, заданное по умолчанию

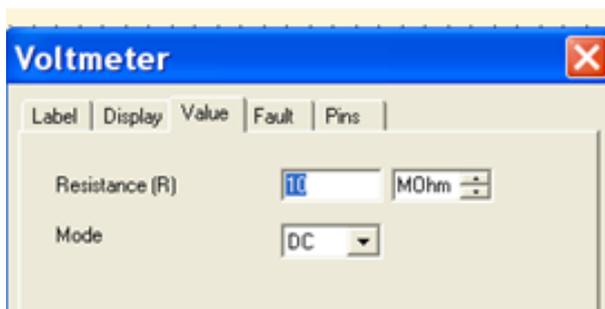


Рисунок 10

(10МОм), казалось бы, велико, но, поскольку сопротивление резистора R35 составляет 1МОм параметр Resistance (R) придется увеличить. Увеличим параллельное сопротивление вольтметра до 1ГОм, чтобы минимизировать его воздействие на схему.

Аналогично подключим виртуальный вольтметр с сопротивлением 1ГОм для измерения падения напряжения на резисторе R_x.

Теперь все подготовлено для проведения моделирования.

✓ Проведение моделирования

Выберем в меню Simulate (Моделировать) пункт Run (выполнить), или нажмем клавишу F5, или поставим переключатель «0/1» в положение «1». Индикаторы отобразят соответствующие значения (см. рисунок 11).

Примечание 6: Проведите аналитический расчет силы тока и паданий напряжений в соответствующих ветвях и сравните с результатом моделирования. Объясните, с чем связаны расхождения.

Измените сопротивления приборов. Проведите моделирование повторно. Как связаны отклонения расчетных и модельных результатов со значениями сопротивлений амперметра и вольтметра.

Примечание 7. Несмотря на то, что идеальным измеритель тока не имеет последовательного сопротивления, слишком низкое значение сопротивления использовать не следует. Задайте сопротивление амперметра равным 1пОм, проведите моделирование и сравните результат измерения силы тока с расчетным.

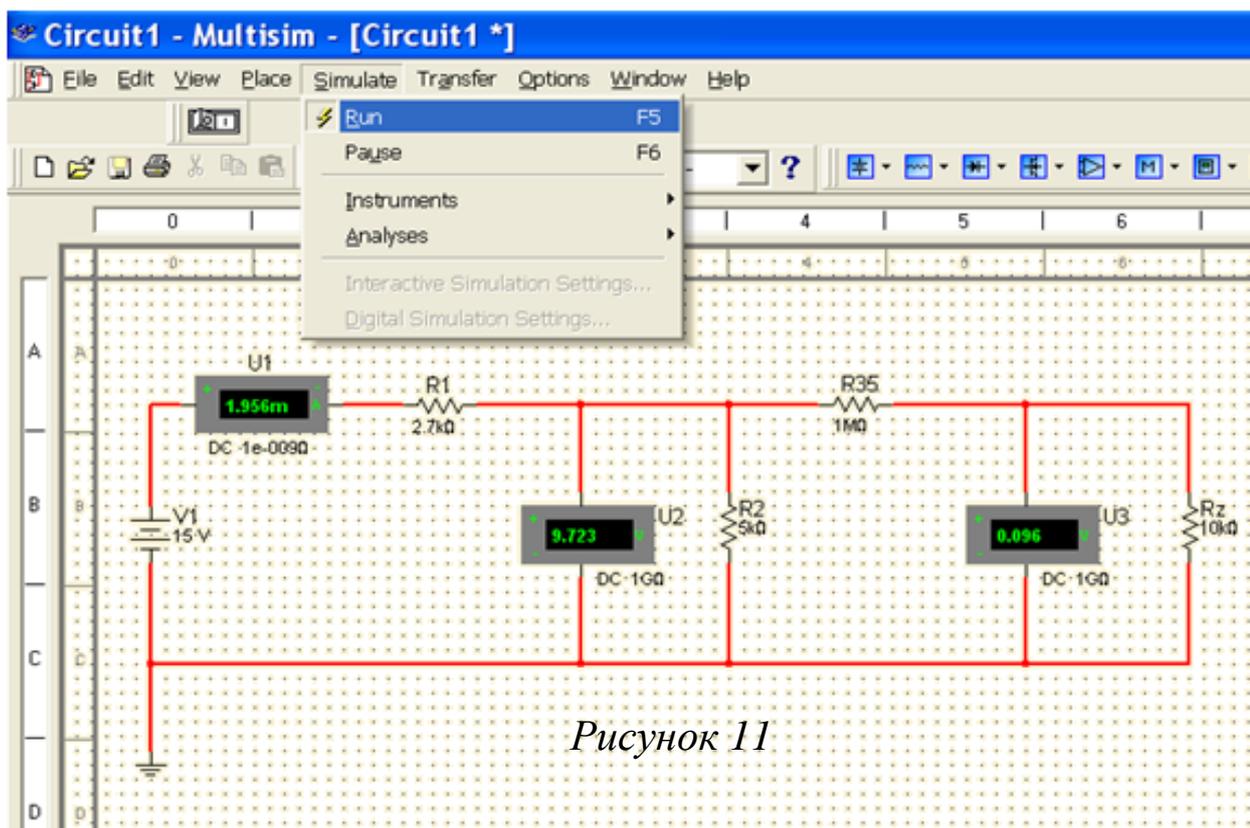


Рисунок 11

3.3. Измерения с использованием мультиметра

Измерения силы тока и падения напряжения можно проводить также с помощью прибора Multimeter.

✓ Подключение мультиметра

Добавить мультиметр в схему можно с помощью панели Instruments. Панель вызывается путем выполнения следующих действий: View – Toolbars – Instruments. Пиктограмма мультиметра показана на рисунке 11 (вверху).



Рисунок 11

Подключим к схеме два мультиметра: ток через резистор R1 будем измерять с помощью прибора ХММ1, падение напряжения на резисторе R2 – с помощью прибора ХММ2.

Для настройки функций устройств откроем диалоговое окно прибора (см. рисунок 12). Как мы видим, с помощью мультиметра можно измерять ток, напряжение, сопротивление

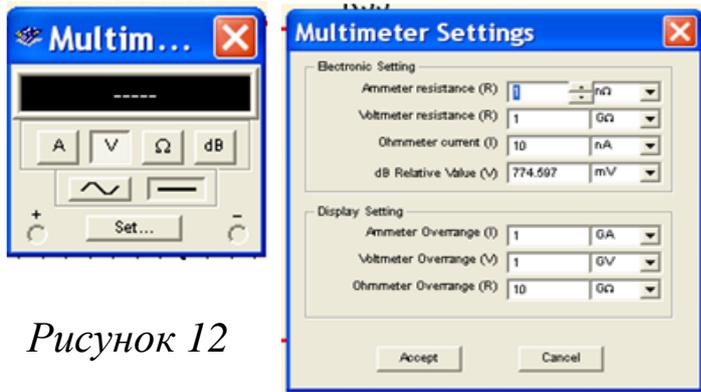


Рисунок 12

ние, а также уровень напряжения в децибелах. Можно выбрать режим измерения АС или DC.

Окно настроек параметров устройства открывается после нажатия кнопки Set.

Компоненты модели аналогичны компонентам индикаторов тока и напряжения. По умолчанию устройство имеет сопротивление 1 нОм при измерении тока, и 1 ГОм – при измерении напряжения.

Для измерения тока включаем мультиметр последовательно компоненту, для измерения напряжения – параллельно (см. рисунок 13).

✓ Проведение моделирования

Перед запуском моделирования вызовем диалоговое окно приборов. Результаты моделирования отобразятся в верхней части окон (рисунок 13).

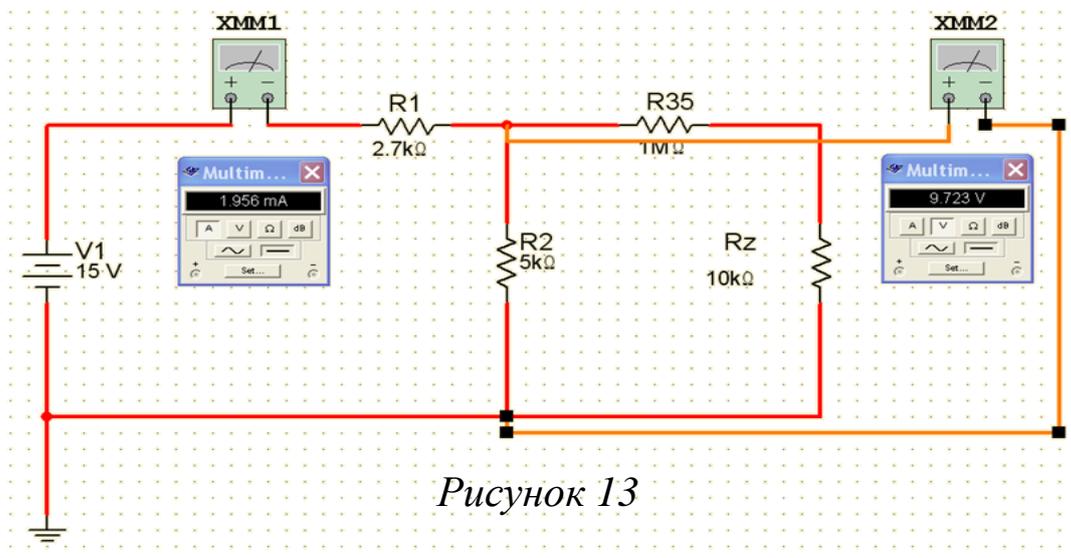


Рисунок 13

Примечание 8. Подключите мультиметр для измерения падения напряжения на резисторе Rx и проведите моделирование.

3. 4. Измерения с использованием ваттметра

Для измерения рассеиваемой в цепи мощности применим ваттметр.

✓ Подключение ваттметра

Добавим ваттметр в схему аналогично мультиметру – с помощью панели Instruments. Пиктограмма мультиметра показана на рисунке 14 (вверху).

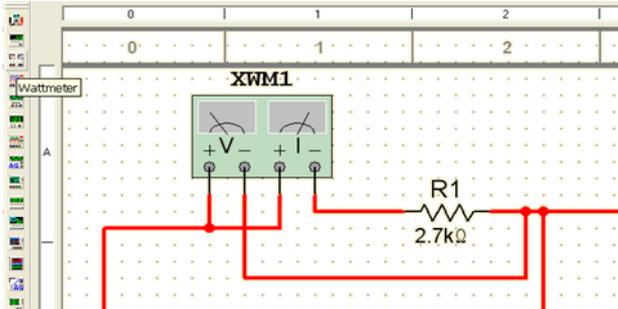


Рисунок 14

На этом же рисунке изображена схема подключения (обратите внимание на подключение токовых зажимов и зажимов напряжения) прибора.

✓ Проведение моделирования

Перед запуском моделирования вызовем диалоговое окно прибора. Проведем моделирование. Результаты моделирования показаны на рисунке 15.

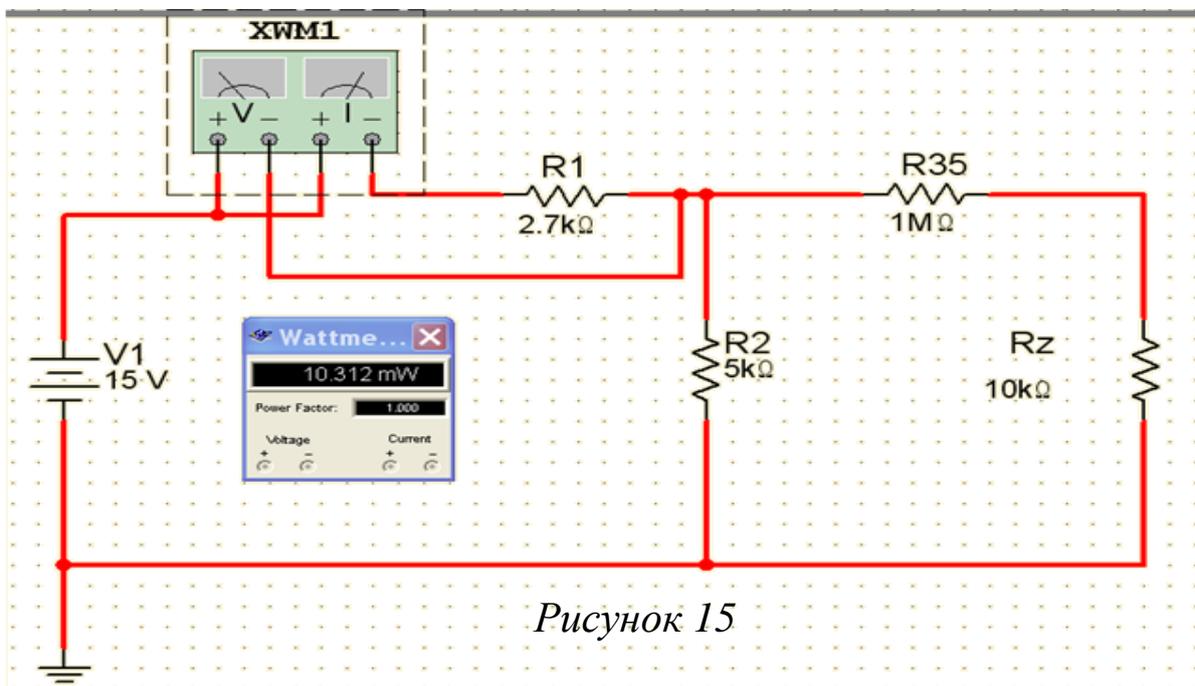


Рисунок 15

Примечание 9. Подключите прибор для измерения мощности, рассеиваемой на резисторе R_x самостоятельно. Проведите моделирование. Сравните все полученные результаты с расчетными.

3.5. Анализ рабочей точки

DC Operating Point Analysis (Анализ рабочей точки) позволяет определить напряжение во всех узлах схемы.

✓ Изменение нумерации узлов.

Выясним, как в нашей схеме пронумерованы узлы. Для этого выделив провод, подходящий к узлу, и дважды щелкнув по нему левой кнопкой мыши, откроем окно Node (см. рисунок 16).

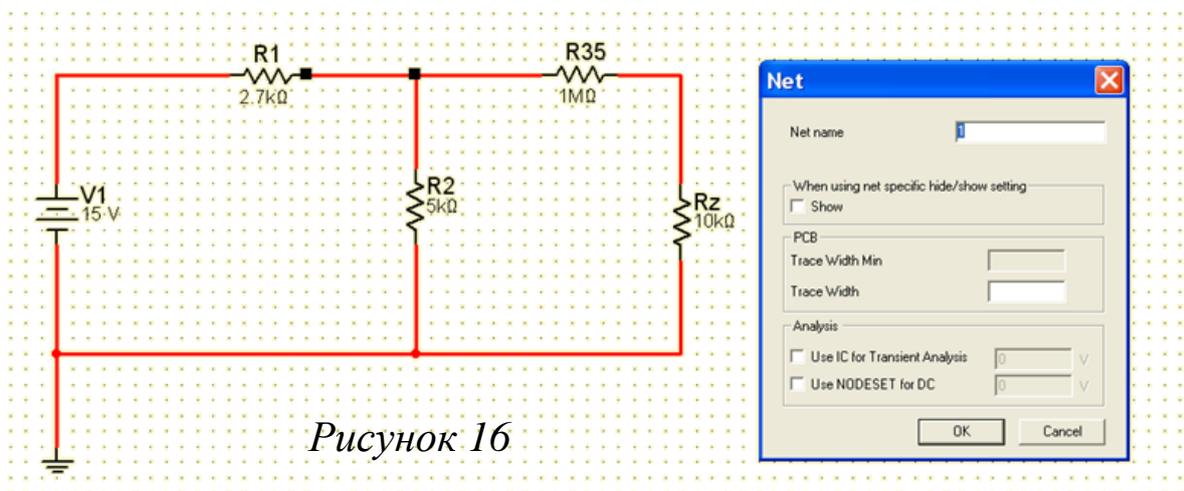


Рисунок 16

Изменим название узла в поле Net name (запишем Vmid) и сохраним изменения. Для того, чтобы отобразить новое название на схеме в меню Options выберем пункт Preferences и на вкладке Circuit выберем опцию Show node names (отображать названия узлов), поставив галочку.

Примечание 10. Переименовать в схеме можно все узлы, кроме узла «0».

✓ Настройка анализа рабочей точки

Зная имя узла, мы сможем выполнить анализ рабочей точки. Выберем в меню пункты Simulate ► Analysis ► DC Operating Point

(Моделировать ► Анализ ► Анализ рабочей точки). В левой части открывшегося окна виден список всех доступных узлов (см. рисунок 17). Перенесем нужные узлы в правую часть окна (выделив название и нажав кнопку Add – добавить). Результат на рисунке 18.

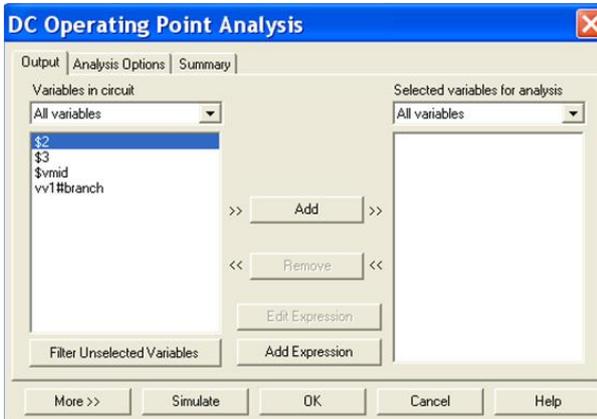


Рисунок 17

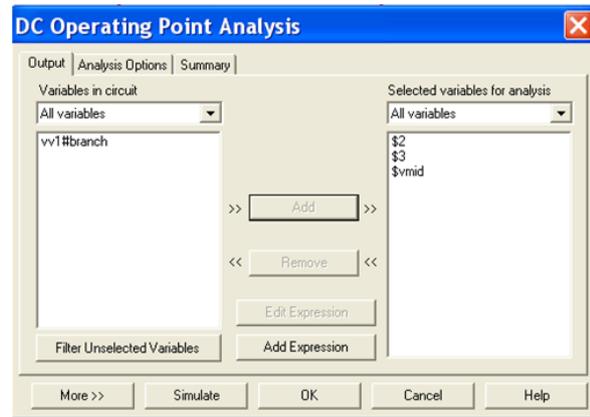


Рисунок 18

✓ Настройка анализа рабочей точки

DC Operating Point	
1	\$3 15.00000
2	\$2 96.27110 m
3	\$vmid 9.72338

Рисунок 19

Нажмем кнопку моделирования Simulate внизу окна DC Operating Point Analysis. Результаты отобразятся в новом окне Grapher View (см. рисунок 19).

Как мы видим, они полностью соответствуют результатам, полученным во время предыдущих измерений.

3. 6. Проведение анализа с помощью функции DC-Sweep

В процессе анализа необходимо выяснить, как будет меняться напряжение в узлах схемы при плавном (проходящем через ряд фиксированных близко расположенных точек) изменении напряжения источника от 0 до 25 В.

✓ **Выберем** в меню пункты **Simulate – Analyses – DC-Sweep** (Моделирование – Анализ – DC-Sweep). Поскольку источник постоянного тока в схеме единственный, программа выбирает его по умолчанию (см. рисунок 20).

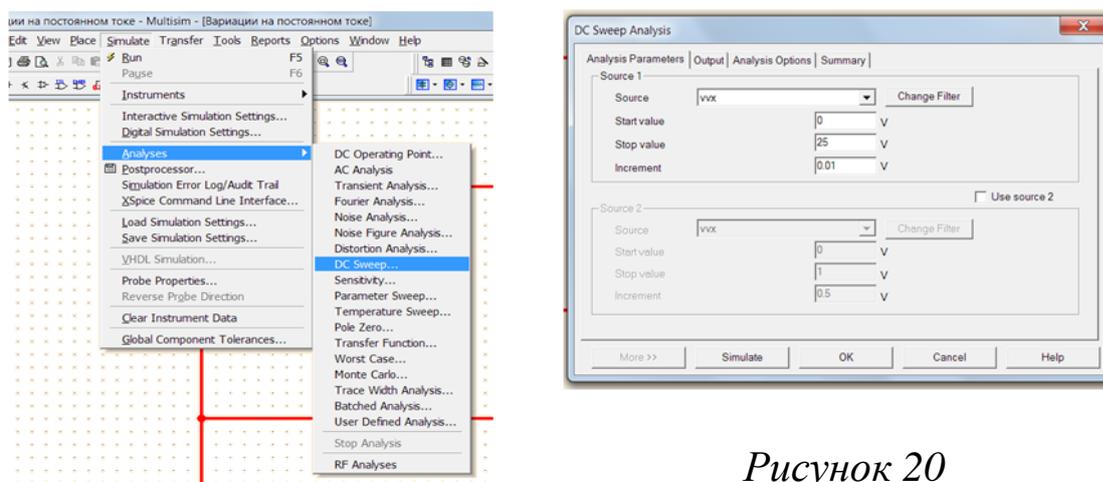


Рисунок 20

Примечание 11. Обратим внимание, что программа автоматически добавила перед «нашим» названием Vx литеру V. Это вызвано тем, что в программе Spice (с которой мы будем работать при построении графиков) все названия источников напряжения должны начинаться с этой литеры. Поэтому соответствующие префиксы добавляются к названиям всех компонентов.

✓ **Введем необходимые входные данные** в окно DC-Sweep Analyses (см. рисунок 20).

Примечание 12. Поскольку в схеме имеется только один источник, нижняя часть окна анализа неактивна. При наличии двух источников мы можем задавать режимы изменения напряжения для обоих (вложенные вариации – nested sweep).

✓ Укажем **требующиеся выходные данные**, вызвав вкладку Output. Выделим переменную \$v0, нажмем кнопку Add. Переменная появится в правой части окна (см. рисунок 21).

Примечание 13. Для начала анализа необходимо выбрать хотя бы одну переменную.

✓ Проведение моделирования

Нажмем кнопку Simulate внизу окна. Откроется окно Analysis Graphs (Графики анализа), в котором отобразится выбранное напряжение (см. рисунок 22).

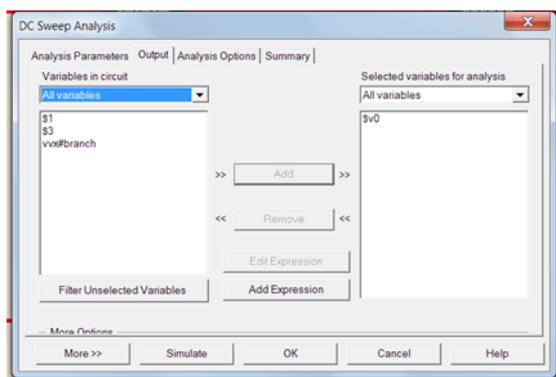


Рисунок 21

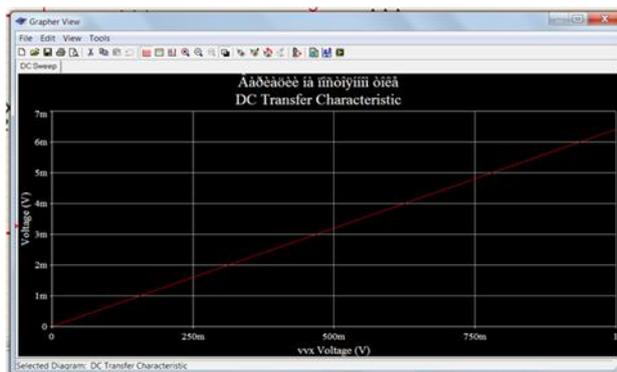


Рисунок 22

3. 7. Настройка вида графика

✓ **Инвертирование цвета.** По умолчанию все графики в программе отображаются на черном фоне. Это неудобно, особенно если ориентироваться на последующую печать изображения. Для изменения настроек выберем в меню Analysis Graphs пункты View – Reverse Color (Вид – Обратить цвета), или нажмем пиктограмму  на верхней панели.

✓ **Редактирование названия графика.** Поскольку программа Spice не работает с кириллическими символами, название графика (а по умолчанию оно совпадает с названием файла) отобразилось некорректно.

Исправим ситуацию. Для этого в меню Edit (Редактирование) выберем пункт Page Properties (Свойства страницы), уберем (или запишем латиницей) название графика (Title).

Окно свойств показано на рисунке 23. Оно позволяет также подкорректировать шрифт, которым набрано название графика (Font), название таблицы (Tab name), а также детальнее настроить цвет подложки (фона) графика (Background color).

Промежуточный вариант отображения графика (после выполнения двух действий) показан на рисунке 24.

✓ **Редактирование осей, сетки, линий.** Поскольку вид графика пока еще не окончательно нас устраивает, проведем дальнейшие корректировки. Откроем окно Graph Properties (Свойства графика) в меню Edit.

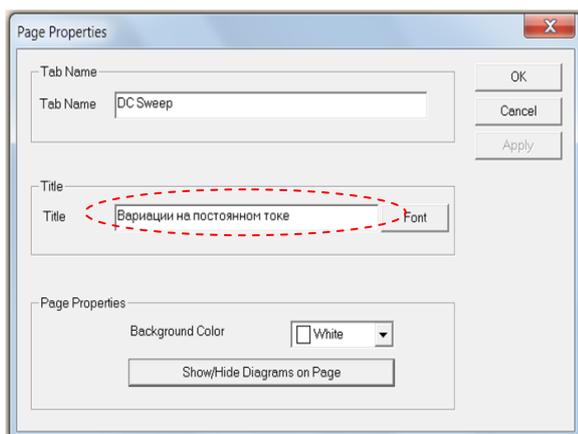


Рисунок 23

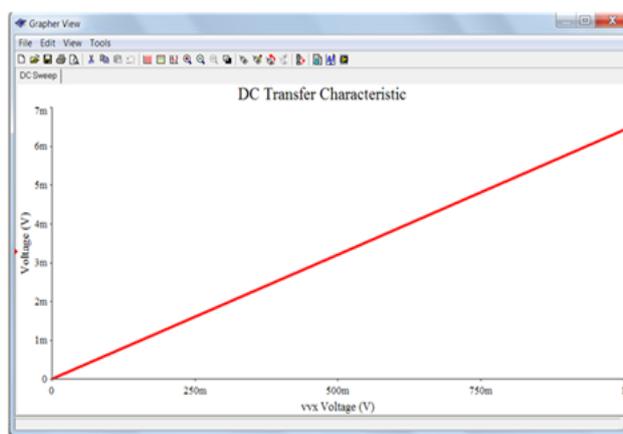


Рисунок 24

Свойства сетки (Grid), а также название графика редактируются на вкладке General (Общие); толщина и цвет линий графика – на вкладке Traces (Линии).

Установить необходимые диапазоны по осям (а также добавить новые оси, активизировав флажок Enable) можно на вкладках Left Axis, Bottom Axis, Right Axis, Top Axis (Левая ось, Нижняя ось, Правая ось, Верхняя ось соответственно).

Также на этих вкладках можно задать названия осей (Label) и масштаб по осям (линейный – Linear, логарифмический – Logarithmic).

Примечание 14: Проведите редактирование свойств графика самостоятельно. Необходимый результат показан на рисунке 25

3. 8. Использование программы Postprocessor

Применим программу Postprocessor для просмотра напряжения на других компонентах схемы.

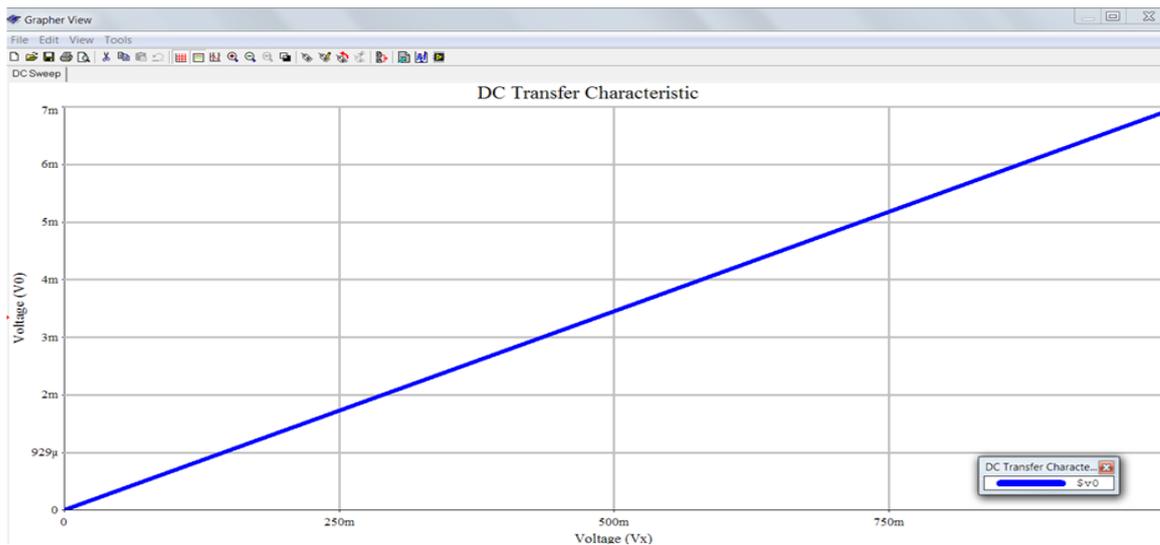


Рисунок 25

Откроем окно программы (см. рисунок 26): Simulate – Post-processor, и щелкнем по Expression (Выражения).

В разделе Select Simulation Rezalt (Выберите результаты моделирования) приведен список доступных результатов (он включает в себя все выполненные сеансы). На данный момент сеанс один; если их много – выбираем последний в списке.

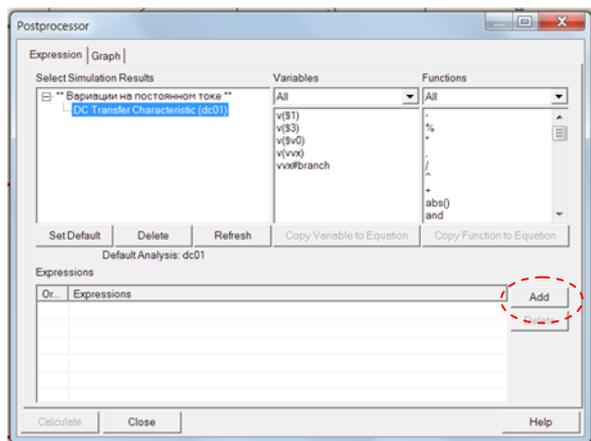


Рисунок 26

✓ **Добавим данные в программу.** Для этого нажмем кнопку Add и создадим выражение для графика.

Примечание 15: В качестве переменных для выражения можно напряжения узлов, приведенные в колонке Variables. Ток показан только один (ток источника напряжения – переменная vvx#branch). Токи через резисторы отсутствуют.

Добавим два значения напряжения (см. рисунок 27), выделив поочередно их в столбце Variables и дважды щелкнув левой кнопкой мыши (или нажав кнопку Add).

✓ **Создадим нужные графики**, щелкнув по вкладке Graph (см. рисунок 27).

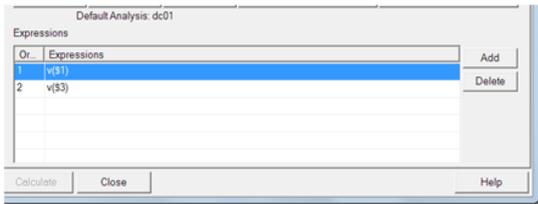


Рисунок 27

В поле Post_Process_Page_1 изменим это (стандартное) название страницы на более отражающее сущность требующегося графика (Node Voltages).

Добавим график, присвоив ему то же название (Node Voltages).

Теперь, выделяя поочередно и нажимая пиктограмму со стрелкой вправо, перенесем из колонки Expressions Available (доступные выражения) в колонку Expressions Select (выделенные выражения) оба наши выражения.

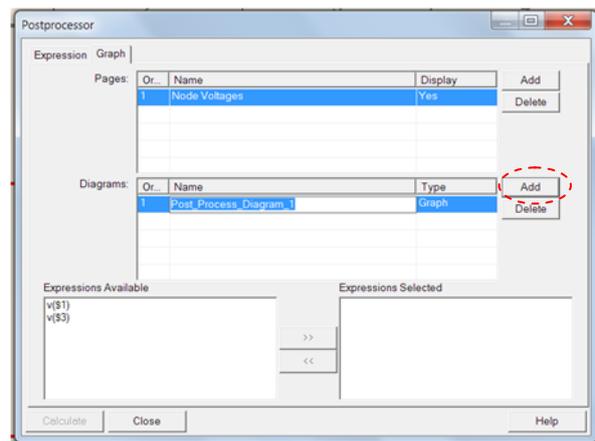


Рисунок 28

После того, как $v(\$1)$ и $v(\$3)$ перенесены в нужную колонку, нажимаем кнопку Calculate (посчитать). На экране отобразятся графики напряжений в узлах (в одной системе координат).

✓ **Отредактируем графики**. Результат приведен на рисунке 29.

4. ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Создайте новый файл и соберите схему, данную преподавателем. Выполните следующие задания:

4.1. Определите токи и падения напряжения в отмеченных участках схемы.

- а) воспользовавшись индикаторами;
- б) воспользовавшись мультиметром;

в) воспользовавшись анализом SPICE DC Operating Point

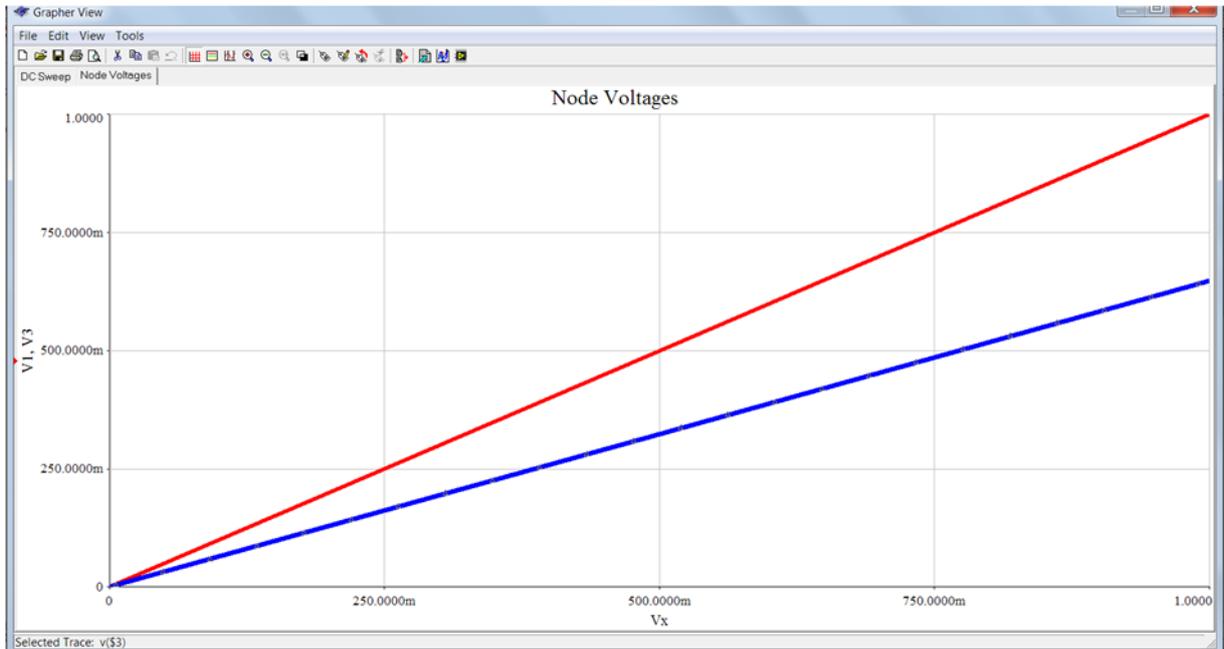


Рисунок 29

4. 2. Покажите, что второй закон Киргхофа выполняется для каких-либо двух контуров схемы;

4. 3. Подтвердите первый закон Киргхофа для двух узлов схемы.

4. 4. Определите мощность, рассеиваемую указанными в задании резисторами, и мощность источника питания, воспользовавшись ваттметрами.

4. 5. Подтвердите полученные в пп. 4. 1 и 4. 4 результаты расчетным путем, рассчитав предварительно общее сопротивление схемы.

4. 6. Воспользовавшись анализом DC-Sweep, постройте и отредактируйте графики изменения напряжения в заданных узлах схемы при плавном изменении напряжения источника (диапазон изменения задается преподавателем).

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Скриншоты результатов измерений, Анализа рабочей точки и анализа DC-Sweep.
3. Основные формулы, используемые при расчетах.
4. Подробная запись всех этапов проведенных расчетов и их результаты.
5. Выводы.

6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Попов, В. П. Основы теории цепей / В. П. Попов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2000 – 575 с.