

**ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ.
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В СРЕДЕ «TINA-8»**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ
Для студентов всех форм обучения

МОСКВА 2011

Автор: В.А. Алехин.

Редактор: В.Ю. Маслов

Методические указания для лабораторно-практических занятий по электротехнике содержат теоретические сведения, расчетные задания, компьютерное моделирование и контрольные задания по разделу «Линейные электрические цепи постоянного и переменного тока». Изучается и используется современная программа компьютерного моделирования электронных схем «TINA-8». Работая по методическим указаниям, студенты могут самостоятельно освоить расчеты электрических цепей, проверить результаты расчетов на компьютерных моделях, выполнить на компьютерных моделях интересные исследования. Контрольные задания позволяют проверить усвоение материала и могут быть многовариантными как в курсовой работе. Такое содержание методических указаний может способствовать формированию у студентов профессиональных компетенций.

Материал предназначен для студентов специальностей 230101, 230105, 210301, 220201, 220401, 210105, 210108, 210104, изучающих дисциплины «Общая электротехника», «Теоретические основы электротехники», «Электротехника», «Электротехника, электроника и схемотехника».

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технический университет).

Рецензенты: Р.М. Закалюкин, В.Н. Цыпкин

© Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), 2011

ВВЕДЕНИЕ

Электротехнические дисциплины являются фундаментальной основой знаний специалистов и бакалавров, обучающихся по направлениям приборостроения, радиотехники, электроники и информационной техники. Изучение электротехники предусматривает освоение теории, формирование навыков и компетенций в решении задач и выполнении расчетов электрических цепей, проведении экспериментальных исследований. Большое место в работе современного специалиста занимает компьютерное моделирование электрических цепей и электронных схем и компьютерное проектирование электронных устройств. Одной из новых эффективных программ компьютерного моделирования и проектирования электронных устройств является программа TINA-8 компании Texas Instruments. Изучение этой программы и ее использование для освоения электротехнических дисциплин весьма полезно для будущих специалистов и бакалавров. В [2] были изложены основные сведения о программе TINA-8, рассмотрены важные функции программы, инструменты, виды анализа и оптимизации, виртуальные приборы. В данных методических указаниях приведены описания лабораторных работ и практических заданий по разделу «Линейные электрические цепи», которые выполняются в среде TINA-8. Методические указания разделены на отдельные модули. Каждый модуль содержит краткие теоретические сведения по конкретному вопросу, простое расчетное задание и компьютерное моделирование, подтверждающее расчет. В процессе изучения модулей будут закрепляться навыки работы с программой TINA-8. Ограниченный объем методических указаний не позволяет разместить в них весь теоретический материал. Поэтому студенты должны дополнительно изучать конспекты лекций, учебники, учебные пособия, описания программы [1, 3, 4, 6-8]. Наряду с компьютерным моделированием экспериментальное исследование электрических цепей можно выполнить в аналоговой лаборатории кафедры теоретических основ электротехники, используя «Миниатюрную электротехническую лабораторию МЭЛ».

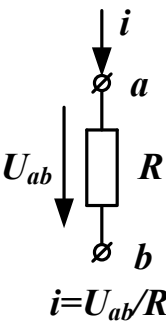
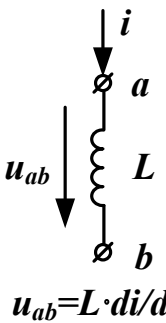
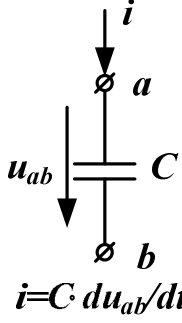
Лабораторно-практическое занятие №1

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Элементы, структура и основные законы электрических цепей

Идеальные пассивные элементы:

Резистор R [Ом], индуктивность L [Гн], емкость C [Ф].

 <p style="text-align: center;">$i=U_{ab}/R$</p>	 <p style="text-align: center;">$u_{ab}=L \cdot di/dt$</p>	 <p style="text-align: center;">$i=C \cdot du_{ab}/dt$</p>
Резистор	Индуктивность	Емкость

Понятие «**постоянное напряжение (ток)**» означает, что во времени значение и направление напряжения (тока) не меняются. Можно сказать, что **частота изменения постоянного напряжения (тока) $\omega = 0$** .

На постоянном токе $i=I=const$ получим $di/dt=0$. Следовательно, напряжение на индуктивности равно нулю и индуктивность для постоянного тока является коротким замыканием.

Для емкости на постоянном токе $du/dt=0$. Следовательно, ток через емкость равен нулю и емкость на постоянном токе эквивалентна разрыву.

Линейные пассивные элементы имеют линейные зависимости между током и напряжением (или их производными для индуктивности и емкости). Для этого значения R , L , C не должны зависеть от токов и напряжений на этих элементах.

Идеальные активные элементы (источники энергии)

Идеальный источник E напряжения имеет нулевое внутреннее сопротивление ($R_{ин}=0$) и напряжение на его зажимах не зависит от тока, который он отдает во внешнюю цепь.

Идеальный источник тока J имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление ($R_{\text{ит}} = \infty$) и ток, который он отдает во внешнюю цепь, не зависит от напряжения на зажимах источника тока.

	
Идеальный источник напряжения	Идеальный источник тока

Реальные активные элементы имеют конечные внутренние сопротивления (Рис.1.1).

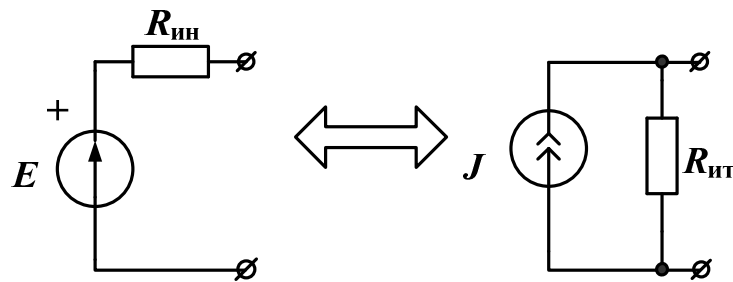


Рис.1.1. Замена источника напряжения и источника тока

Источник напряжения с последовательным внутренним сопротивлением можно заменить на эквивалентный источник тока с параллельным внутренним сопротивлением при условии, что:

$$R_{\text{ин}} = R_{\text{ит}} = R_{\text{вн}}, E = J \cdot R_{\text{вн}}, J = \frac{E}{R_{\text{вн}}}$$

Линейные источники энергии имеют линейные вольтамперные характеристики. Вольтамперной характеристикой электрической цепи называют зависимость тока, проходящего через элемент от напряжения на его зажимах.

Электрическая цепь постоянного тока является линейной, если все элементы цепи имеют линейные вольтамперные характеристики.

На рис.1.2 показана схема линейной электрической цепи постоянного тока.

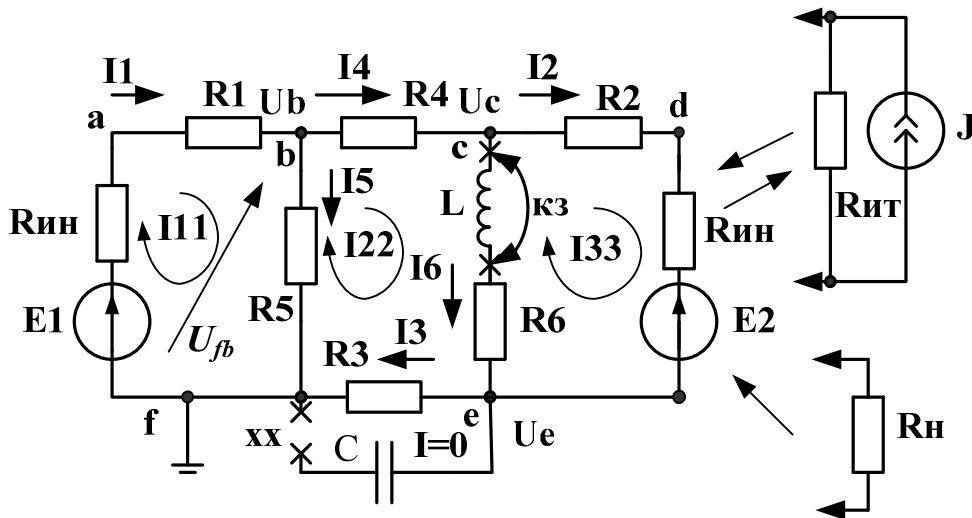


Рис. 1.2. Схема линейной цепи постоянного тока

Структура электрической цепи определяется взаимным расположением ветвей, узлов и контуров. **Ветвь** это участок цепи, через который проходит один и тот же ток. **Узел** – место соединения трех и более ветвей. **Контур** – замкнутый путь, последовательность ветвей и узлов, в которой каждая ветвь и каждый узел входит один раз. В схеме рис.1.2. 6 ветвей (не считая разомкнутой емкости), 4 узла и 3 контура. Один из узлов (например, *f*) заземляют и считают общим.

Основные законы электрических цепей

Обобщенный закон Ома для участка цепи, содержащего источник напряжения:

Ток в ветви равен напряжению на зажимах ветви, взятому по направлению тока, плюс (минус) источники напряжения, деленному на сумму сопротивлений ветви.

Ток в первой ветви
$$I_1 = \frac{U_{fb} + E_1}{R_{ин} + R_1}$$
. Знак плюс берут для источников напряжения, совпадающих по направлению с током.

точников напряжения, совпадающих по направлению с током.

Первый закон Кирхгофа:

Сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю (или сумма входящих в узел токов равна сумме выходящих токов).

Для узла *b*: $I_1 = I_4 + I_5$.

Второй закон Кирхгофа:

В замкнутом контуре алгебраическая сумма падений напряжений на пассивных элементах равна алгебраической сумме источников напряжения. При этом со знаком плюс берут падения напряжения на тех пассивных элементах, в которых токи совпадают с направлением обхода контура. Со знаком плюс берут источники напряжения, совпадающие по направлению с направлением обхода контура.

Расчет цепи методом контурных токов (МКТ)

Рассчитать контурные токи в цепи (рис.1.1).

Независимые контуры и контурные токи I_{11} , I_{22} , I_{33} обозначены на схеме.

Записываем канонические уравнения по методу МКТ для трехконтурной схемы (рис.1.2):

$$\begin{pmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \end{pmatrix}$$

Диагональные сопротивления контурной матрицы сопротивлений с одинаковыми индексами находим как сумму всех сопротивлений контура при последовательном обходе. Недиагональные сопротивления с разными индексами равны сопротивлениям смежных ветвей контуров, причем со знаком плюс берут те сопротивления смежных ветвей, в которых контурные токи направлены одинаково. Контурные ЭДС равны алгебраической сумме всех ЭДС контура. Со знаком плюс берут ЭДС, совпадающие по направлению с обходом контура.

Расчетное задание №1.

Схема электрической цепи изображена на рис.1.3. Найти токи во всех ветвях и напряжения U_{bd} и U_{cd} .

Рекомендации:

1. Замените источник тока на источник напряжения.
2. Параллельно включенные сопротивления R_3 и R_4 замените эквивалентным.

3. В полученной одноконтурной цепи по второму закону Кирхгофа рассчитайте ток I_2 .
4. Вычислите напряжения U_{cd} и U_{bd} по закону Ома.
5. Вычислите токи I_3 и I_4 по закону Ома.
6. По первому закону Кирхгофа вычислите ток I_1 .
7. Запишите численные ответы для токов и напряжений.

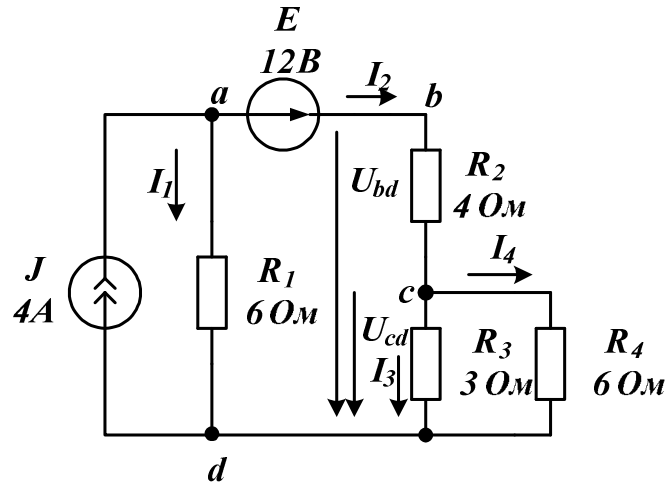


Рис.1.3. Схема к заданию №1

Компьютерное моделирование задания №1

Соберите схему рис.1.4 , пользуясь методическими указаниями [1]. Изображения элементов электрической цепи соответствуют европейским стандартам. Это устанавливается в меню *View – Options*. Выберите в интерактивном меню режим DC и нажмите кнопку DC. На схеме появятся показания всех приборов. Убедитесь, что эти показания совпадают с Вашим расчетом.

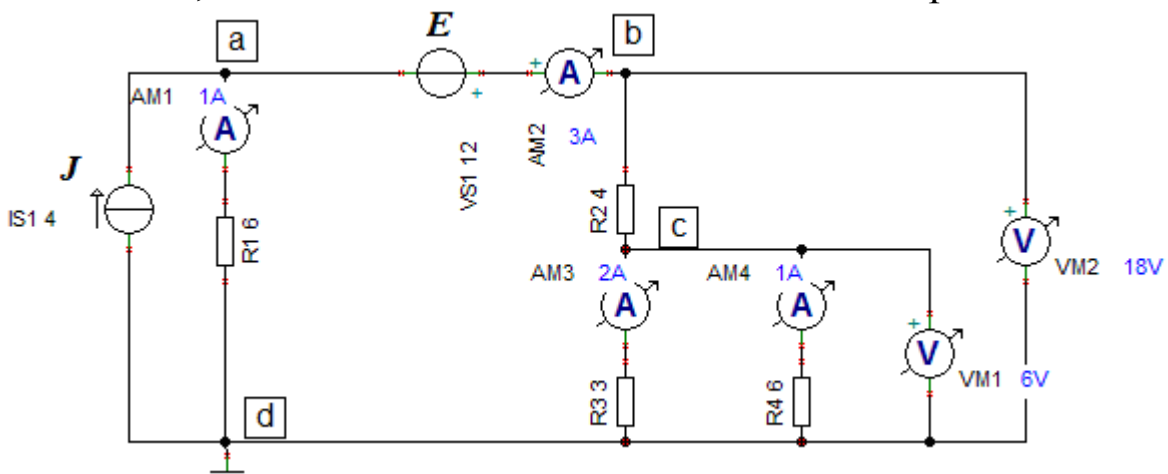


Рис. 1.4. Схема моделирования к заданию №1.

Измерение напряжений в схеме можно провести и без включения приборов (рис.1.5).

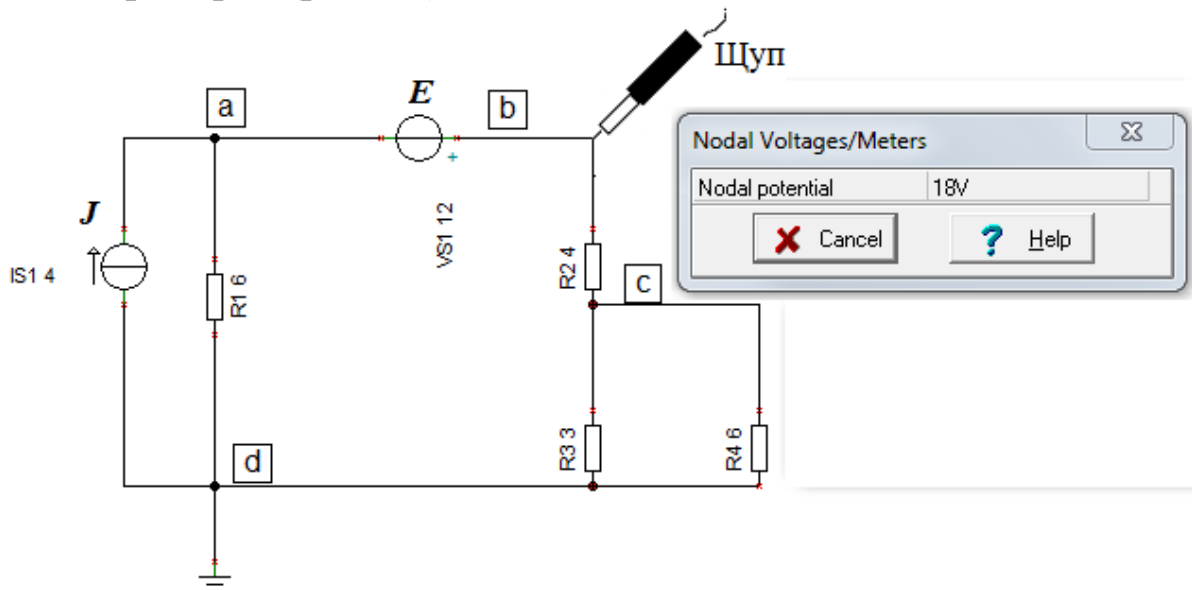


Рис.1.5. Измерение напряжений щупом

Для этого в главном меню наберите *Analysis- DC Analysis – Calculate nodal voltages*. Появится щуп. Касаясь им любого проводника, Вы измерите напряжение относительно земли.

Полный отчет о всех напряжениях и токах в схеме можно получить, набрав в главном меню *Analysis- DC Analysis – Table of DC results* (рис.1.6).

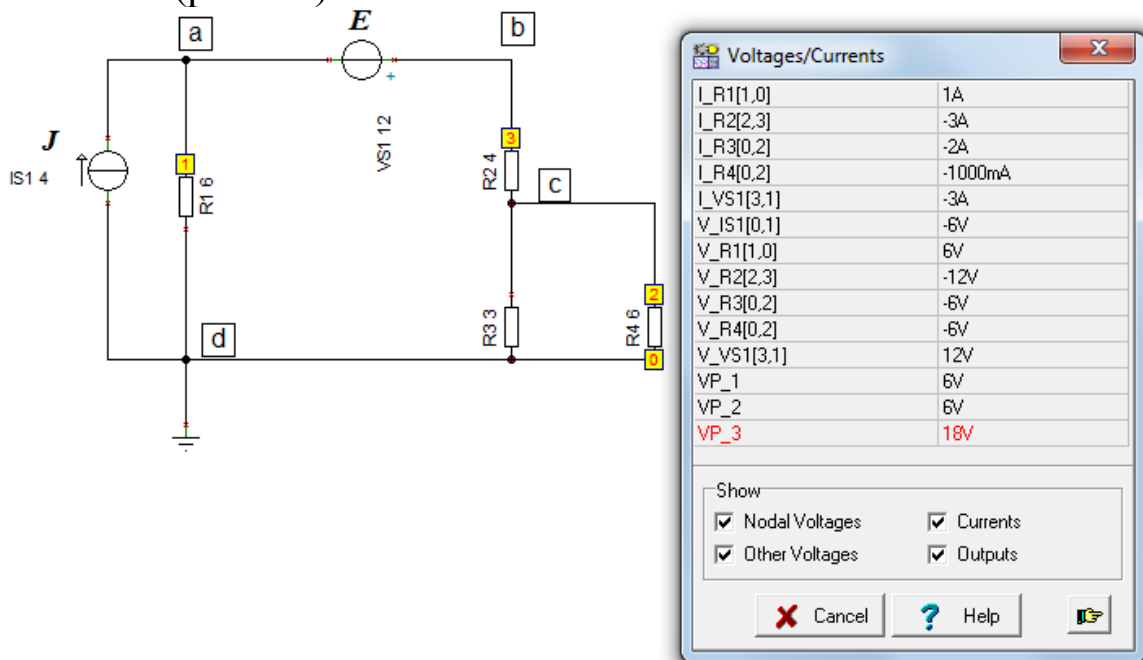


Рис.1.6. Таблица результатов анализа схемы на постоянном токе

Напряжения и токи на отдельных элементах измерены по направлению узлов, указанных в скобках. *Дополнительное задание:* для контура $R_1-E-R_2-R_3$ проверить выполнение второго закона Кирхгофа.

Делитель напряжения

В исследованной схеме напряжение в узле B $U_b=18\text{В}$, а напряжение в узле C $U_c=6\text{В}$. Сопротивления R_2, R_3, R_4 образуют делитель напряжения. Параллельное соединение сопротивлений R_3 и R_4 обозначим $R_3\parallel R_4 = \frac{3 \cdot 6}{9} = 2$ Ом. Напряжение в узле C находим по формуле:

$$U_c = U_b \frac{R_3 \parallel R_4}{R_2 + R_3 \parallel R_4} = 18 \frac{2}{4 + 2} = 6 \text{ В}.$$

Так на резисторах можно получить часть входного напряжения.

Делитель токов

К узлу C из резистора R_2 подходит ток $I_2=3$ А и делится на ток I_3 и I_4 пропорционально проводимостям третьей и четвертой ветвей. Ток I_4 можно рассчитать по формуле:

$$I_4 = I_2 \frac{G_4}{G_3 + G_4} = I_2 \frac{R_3}{R_3 + R_4} = 3 \frac{3}{3 + 6} = 1 \text{ А}.$$

1.2. Метод эквивалентного генератора. Согласование нагрузки с генератором

В схеме рис.1.3 требуется найти ток только в одной ветви, например, ток I_2 в ветви bc . Такой расчет проще сделать *методом эквивалентного генератора*. Для этого отключим временно резистор R_2 и найдем напряжение холостого хода $U_{bcxх}$ между точками bc . Затем найдем входное сопротивление $R_{bcвх}$ схемы относительно точек bc . Заменяем цепь с нагрузкой R_2 эквивалентным генератором рис.1.7, в котором $E_{\text{экв}} = U_{bcxх}$, $R_{\text{экв}} = R_{bcвх}$.

Можно доказать, что в нагрузке R_2 будет выделяться наибольшая активная мощность, если выполняется условие согласования нагрузки с генератором, а именно: $R_n = R_2 = R_{\text{экв}}$.

При этом максимальная мощность в нагрузке будет равна:

$$P_{max} = \frac{E_{эКВ}^2}{4R_{эКВ}}$$

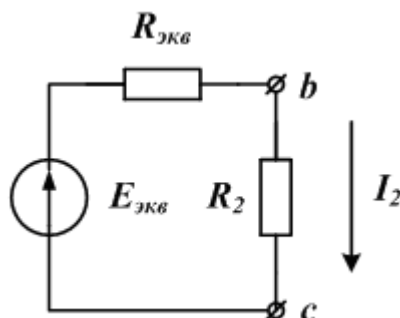


Рис.1.7. Схема эквивалентного генератора

Расчетное задание №2

В схеме рис.1.3 найти ток нагрузки I_2 и мощность в нагрузке методом эквивалентного генератора.

Рекомендации:

1. В режиме холостого хода ток в схеме рис.1.3 будет проходить только в источнике тока и резисторе R_1 . Напряжение холостого хода найдем по формуле: $U_{bcxx} = U_{abxx} + E = IR_1 + E$.

2. При расчете входного сопротивления $R_{bcвх}$ источник тока эквивалентен разрыву, а источник напряжения эквивалентен короткому замыканию.

Компьютерное моделирование задания №2

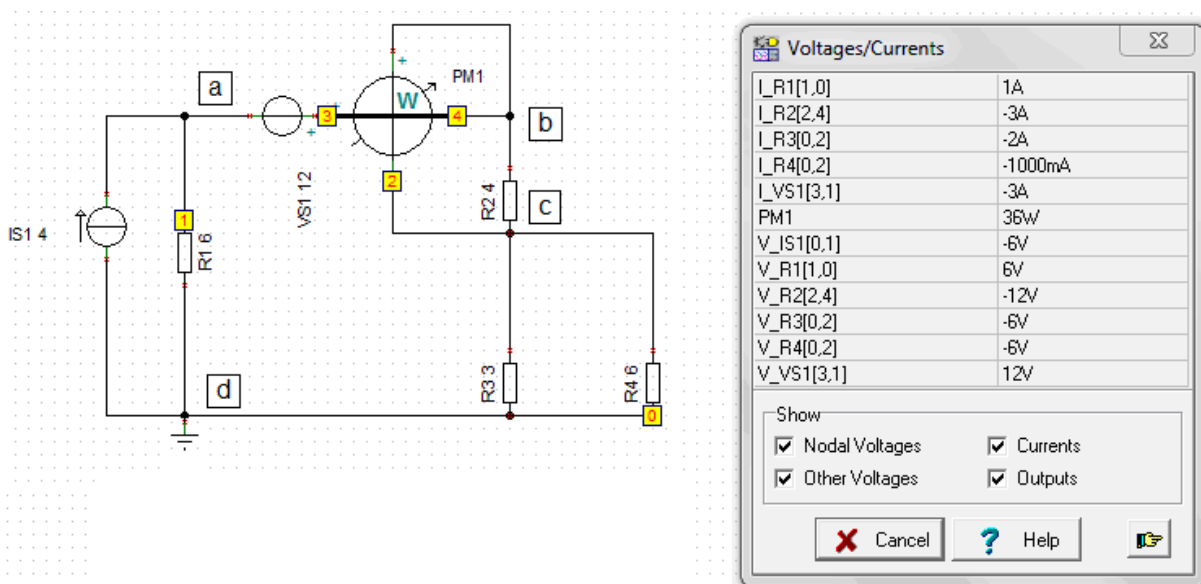



Рис. 1.8. Схема моделирования к заданию №2

В схему рис.1.8 включен ваттметр W для измерения мощности. В таблице результатов находим ток $I_2=3A$, мощность в нагрузке $P=PM1=36$ Вт.

Найдем оптимальное значение нагрузки R_2 . Для этого инструментом выбора цели оптимизации  выделяем ваттметр. В открывшемся окне Optimization – Target Setting выбираем DC Goal Function (рис.1.9).

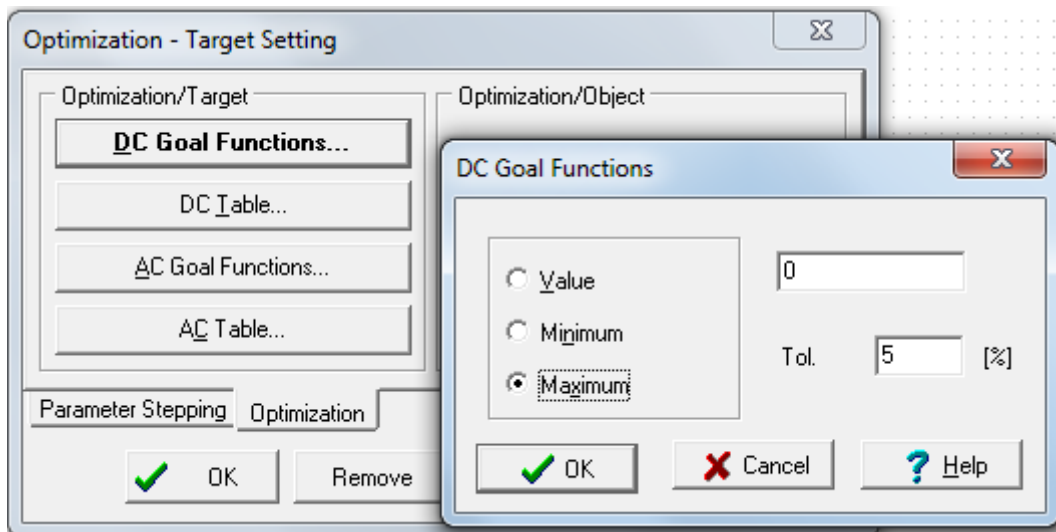



Рис.1.9. Окна установки целей оптимизации

Инструментом выбора управляемого элемента  выделяем резистор R_2 . В окне R_2 выбираем Select – Optimization, устанавливаем Start value=2, End value = 12, нажимаем Ok (рис.1.10).

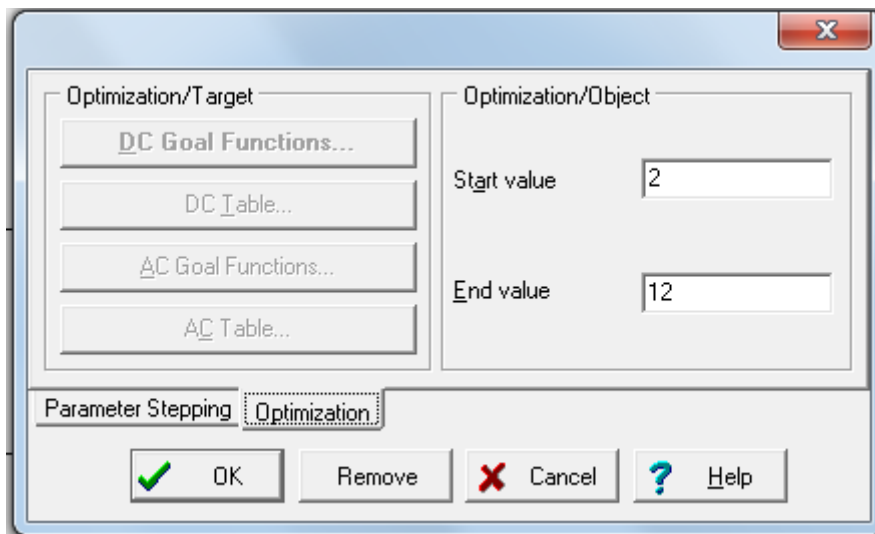


Рис.1.10. Установка границ параметров оптимизации

Далее в главном меню выбираем Analysis – Optimization – DC Optimization. В новом окне Optimization settings (рис.1.11) выбираем Simple Search и линейное сканирование. Нажимаем Ok.

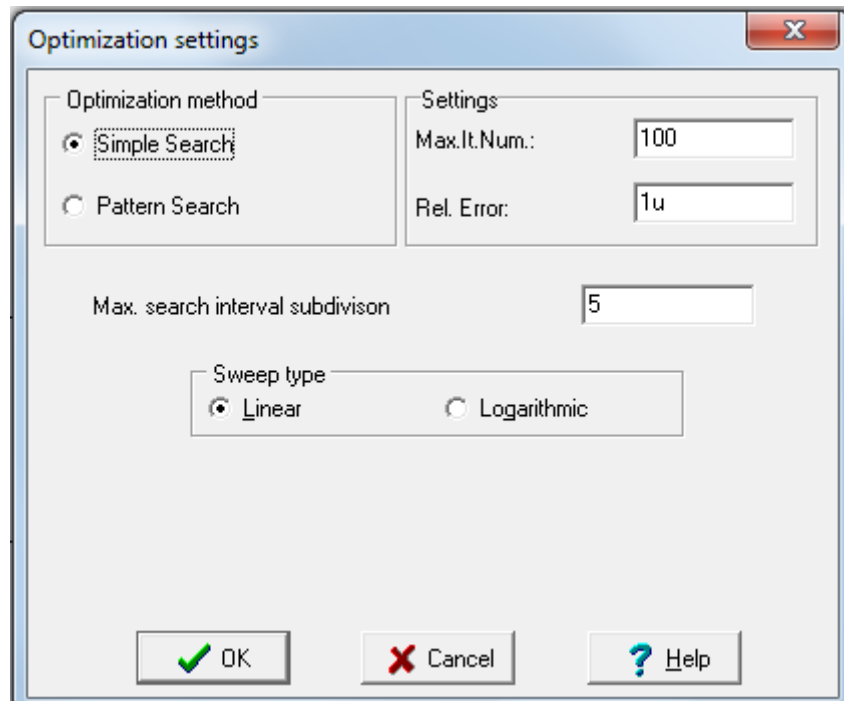


Рис. 1.11. Окно установок оптимизации

После вычислений получаем результат оптимального выбора сопротивления нагрузки (рис.1.12).

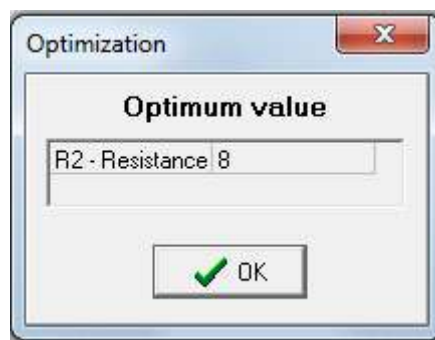


Рис.1.12. Результат оптимизации сопротивления нагрузки

Оптимальное значение резистора R2 автоматически устанавливается в схеме. Повторно проведем измерения и в *Table of DC results* получим значение мощности в нагрузке 40,5 Вт.

Можно получить график зависимости мощности от сопротивления нагрузки. Для этого в главном меню выбираем Analysis – DC Analysis - DC Transfer Characteristic. Устанавливаем в окне

(рис.1.13) изменяемый параметр *Input* - *R2*, начальные и конечные значения R2 и нажимаем Ok. Результатом исследований будут показания измерителя в схеме (ваттметра).

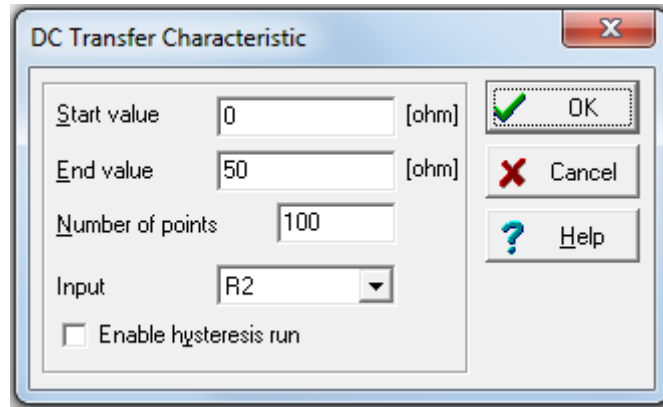


Рис. 1.13. Установка параметров для анализа переходных характеристик на постоянном токе

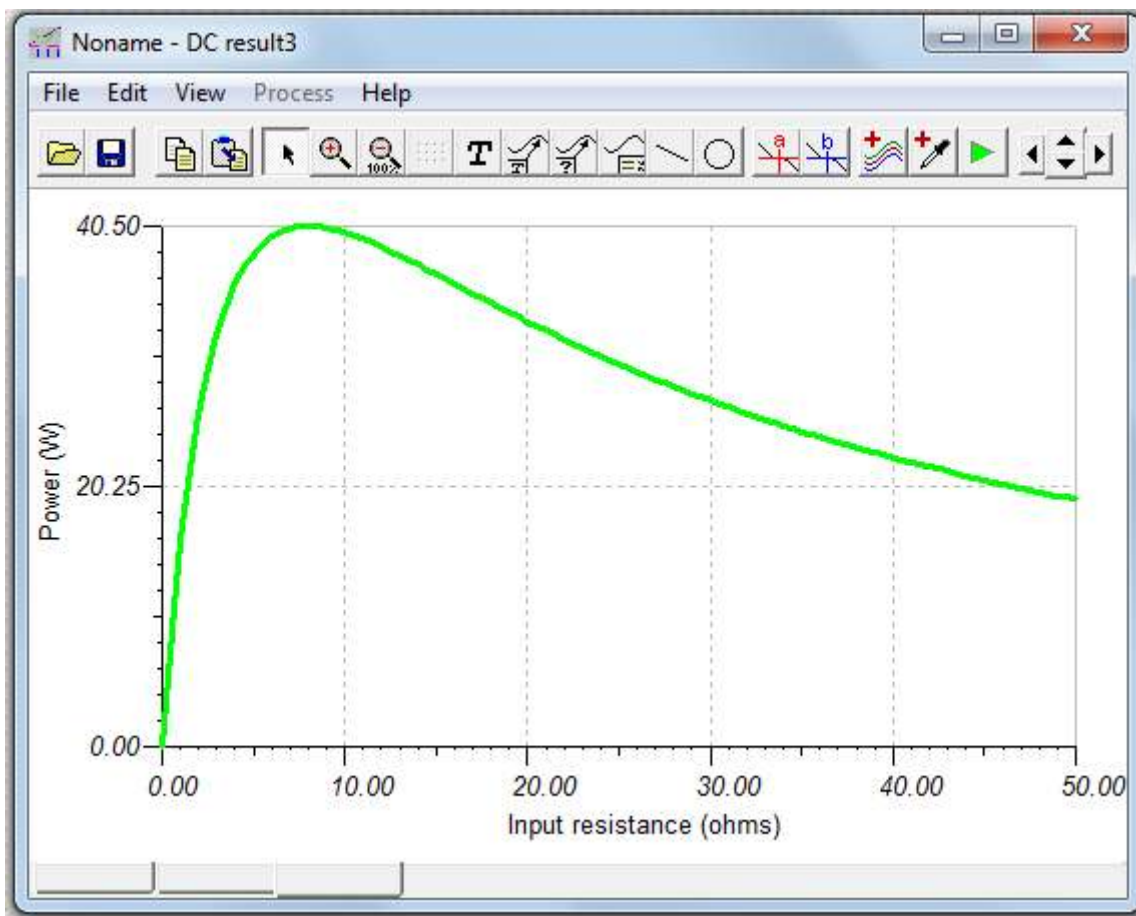



Рис.1.14. График зависимости мощности от сопротивления нагрузки

На рис. 1.15 показаны графики мощности в нагрузке при изменении R_2 и E (VST1). Напряжение E меняется от 8 В до 16 В с шагом 2 В и устанавливается инструментом выбора управляемого элемента . Изменение резистора устанавливается в режиме *DC Transfer Characteristic*.

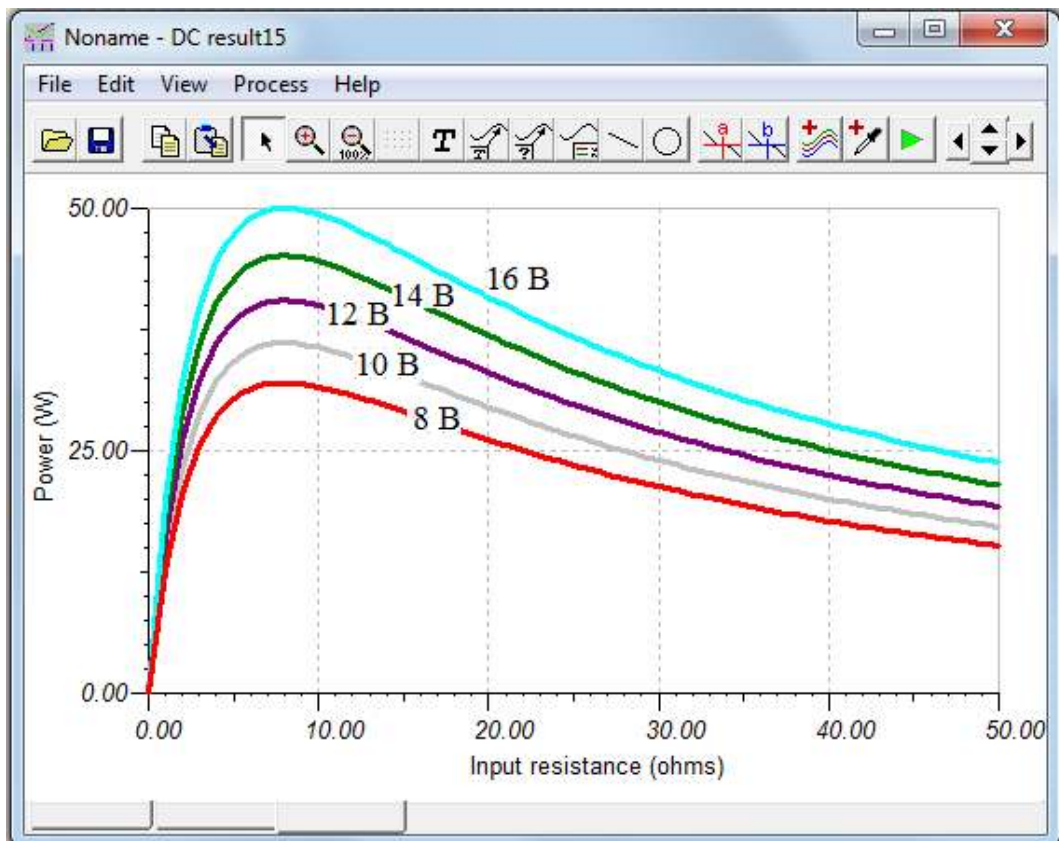


Рис.1.15. Графики мощности в нагрузке при изменении R_2 и E

Контрольное задание №1

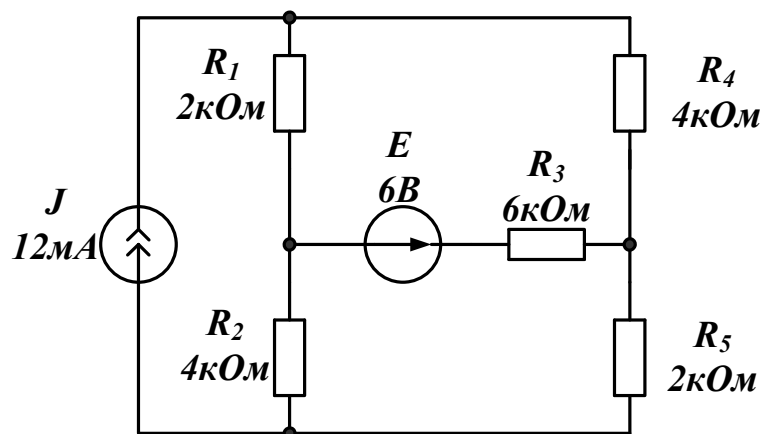


Рис.1.16. Схема к контрольному заданию №1

1. Рассчитать токи в ветвях схемы рис.1.16. Рекомендуется использовать метод контурных токов.
2. Собрать компьютерную модель схемы. Сравнить результаты моделирования с результатами расчета.
3. Используя режим *DC Optimization*, определить при каком значении E ток в резисторе R_3 будет минимальным.
4. Используя режим *DC Transfer Characteristic*, получить график зависимости тока в резисторе R_3 от величины E . Рекомендуем менять E в пределах (-24В, +24В).

Лабораторно-практическое занятие №2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1. Краткие теоретические сведения и методы расчета

В электрических цепях переменного тока токи и напряжения меняются во времени и могут иметь синусоидальную гармоническую форму или периодическую несинусоидальную форму. Поэтому электрические цепи переменного тока разделяют на цепи синусоидального тока и цепи несинусоидального тока.

Расчет электрической цепи при синусоидальном сигнале

При гармоническом синусоидальном сигнале $e(t) = E_m \cdot \sin(\omega t + \psi_E)$ расчет электрических цепей проводят символически методом с использованием комплексных амплитуд токов и напряжений и комплексных сопротивлений.

Рассмотрим пример расчета простой цепи синусоидального тока (Рис.2.1.). Для расчета символическим методом исходную цепь для мгновенных значений напряжений и токов рис.2.1.а заменяют символической схемой замещения для комплексных амплитуд напряжений и токов и комплексных сопротивлений рис.2.1.б.

В символической схеме замещения **комплексная амплитуда** входного напряжения $\underline{E}_m = E_m \cdot e^{j\psi}$.

Сопротивление каждой ветви цепи характеризуют **комплексным сопротивлением**:

$$\underline{Z} = R + jX = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = Z \cdot e^{j\varphi} \quad (2.1)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ - модуль комплексного сопротивления, $\varphi = \arctg\left(\frac{X}{R}\right)$ - аргумент комплексного сопротивления. В ветви без индуктивности $L = 0$, а в ветви без емкости $C = \infty$.

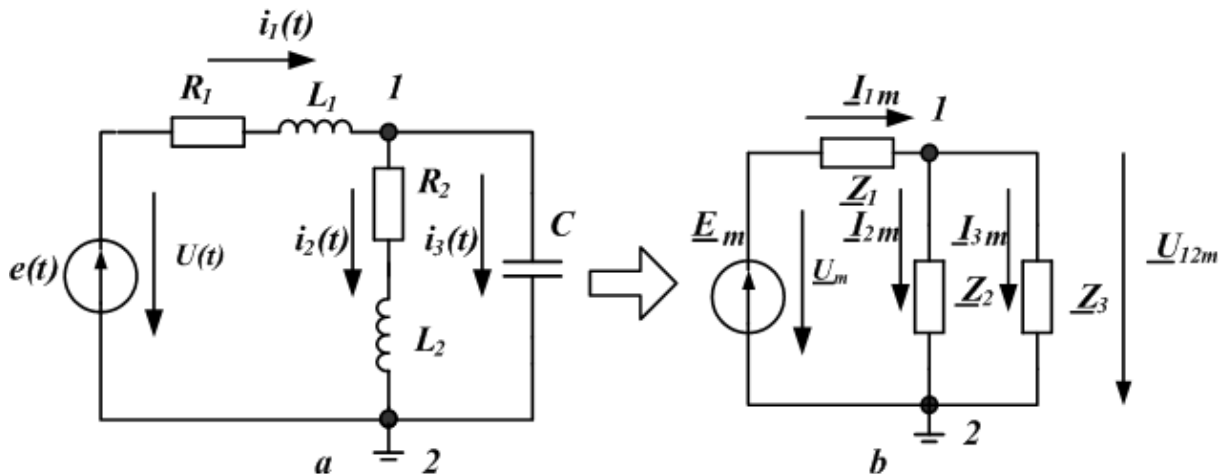


Рис. 2.1. Схема простой цепи синусоидального тока

Комплексной проводимостью ветви называется величина, обратная комплексному сопротивлению:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = g - jb = Ye^{-j\varphi} \quad (2.2)$$

где $Y = \sqrt{g^2 + b^2}$ - модуль комплексной проводимости, $\varphi = \arctg\left(\frac{b}{g}\right)$ - аргумент комплексной проводимости.

Часть цепи, содержащая одну или несколько ветвей и имеющая два входных зажима, называется двухполюсником. **Входное эквивалентное сопротивление двухполюсника** рассчитывают сверткой цепи. Например, для схемы, изображённой на рис 2.1b:

$$\underline{Z}_{\text{эKB}} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}$$

$$\text{Входной ток } \underline{I}_{1m} = \frac{\underline{E}_m}{\underline{Z}_{\text{эKB}}} = \frac{E_m \cdot e^{j\psi_E}}{\underline{Z}_{\text{эKB}} \cdot e^{j\varphi}} = I_{1m}(\omega) \cdot e^{j\psi_I(\omega)}$$

Здесь зависимость амплитуды тока от частоты $I_{1m}(\omega)$ - **амплитудно-частотная характеристика тока**, $\psi_I(\omega) = \psi_E(\omega) - \varphi(\omega)$ - **фазо-частотная характеристика тока**. Если принять $\psi_E = 0$, то $\psi_I(\omega) = -\varphi(\omega)$. В цепи с индуктивным сопротивлением $[-\varphi(\omega)]$ меньше нуля и напряжение опережает ток по фазе. В цепи с емкостным сопротивлением $[-\varphi(\omega)]$ больше нуля и напряжение отстает от тока по фазе. В цепи с чисто активным сопротивлением, а также в резонансных режимах, когда $X_{эkv} = 0$, ток совпадает с напряжением по фазе. Мгновенное значение тока на входе двухполюсника (рис.2.1.а) равно $i_I(t) = I_{1m} \cdot \sin(\omega t + \psi_I)$. **Мгновенная мощность** будет равна:

$$p(t) = u(t) \cdot i_I(t) = \frac{U_m \cdot I_{1m}}{2} \cos \varphi - \frac{U_m \cdot I_{1m}}{2} \cos(2\omega t + 2\psi_U - \varphi) \quad (2.3)$$

В этой формуле $u(t) = e(t)$ - напряжение на входе двухполюсника.

Средняя мощность за период или **активная мощность** $P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \cdot dt = UI \cos \varphi$. Здесь $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ и $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ - **действующие значения напряжения и тока** на входе двухполюсника.

В расчетах символическим методом применяют комплексную мощность $\tilde{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = P + jQ$, где \underline{U} - комплексное действующее значение напряжения на входе пассивного двухполюсника, \underline{I}^* - комплексно-сопряженный ток, P - активная мощность, Q - реактивная мощность. Активная мощность потребляется в цепи. Реактивная мощность обменивается между источниками энергии и накопительными элементами.

Расчет цепи методом узловых напряжений

Метод узловых напряжений целесообразно применять, когда число независимых узлов меньше числа независимых контуров. Так в схеме рис.2.2 всего два узла. Один узел b можно заземлить.

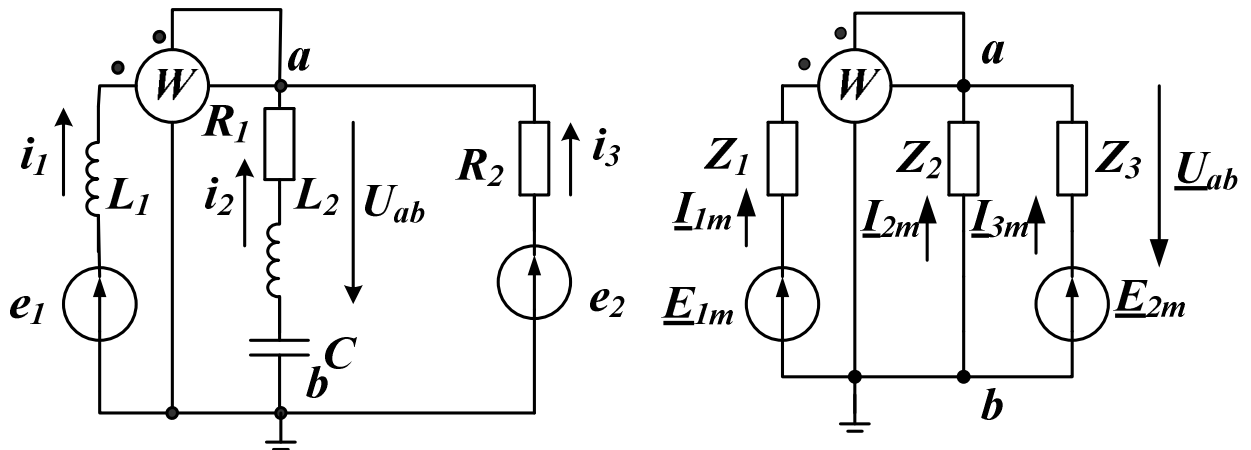


Рис. 2.2. Схема исходной цепи с двумя узлами и схема замещения

В схеме замещения (справа) $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ - комплексные сопротивления ветвей; $\underline{E}_{1m}, \underline{E}_{2m}$ - результирующие комплексные амплитуды ЭДС в ветвях; $\underline{I}_{1m}, \underline{I}_{2m}, \underline{I}_{3m}$ - комплексные амплитуды токов в ветвях. Напряжение между узлами a и b можно рассчитать по формуле метода двух узлов (частный случай метода узловых напряжений):

$$\underline{U}_{abm} = \frac{\underline{E}_{1m}\underline{Y}_1 + \underline{E}_{2m}\underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} \quad (2.4)$$

После расчета напряжения \underline{U}_{abm} токи в ветвях можно найти по обобщенному закону Ома.

Простую цепь гармонического тока надо уметь рассчитывать «в ручную», используя комплексные числа и калькулятор. Расчет сложных цепей можно выполнить в *Mathcad* или исследовать, используя программу TINA-8.

Расчетное задание №3

В цепи рис. 2.3 действует синусоидальный источник напряжения $e(t) = 8 \sin 1000t$ ($f = 159,15$ Гц). Номинальные значения пассивных элементов цепи указаны на схеме. Найти ток в цепи, напряжения на всех элементах. Построить графики напряжений и тока. Построить векторную диаграмму.

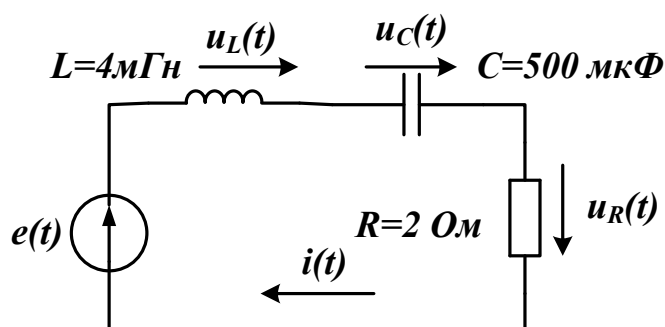



Рис. 2.3. Расчетная схема к заданию №3

Рекомендации:

1. Вычислить комплексную амплитуду источника напряжения и комплексные сопротивления всех элементов.
2. Вычислить комплексную амплитуду тока.
3. Вычислить комплексные амплитуды напряжений на элементах цепи.
4. Построить векторную диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов.
5. Записать выражения для мгновенных значений напряжений и токов.

Компьютерное моделирование задания №3

Схема компьютерного моделирования показана на рис. 2.4. Выделим генератор напряжения VG1, выберем *Properties*. В окне настроек генератора надо выбрать *Signal* и щелкнуть по кнопке . В окне Signal Editor установим форму сигнала «синусоидальную», амплитуду 8В, частоту 159,155 Гц, фазу 0°.

Ток и напряжения в цепи можно найти, не используя приборы VM1-VM4. Для этого в главном меню выбираем *Analysis – AC Analysis – Table of AC results*. Таблица результатов показана на рис. 2.6. В таблице указаны амплитуды и фазы напряжений и токов. Сравните полученные Вами результаты расчета и компьютерного моделирования. Обратите внимание, что напряжение $V_R1[0,2] = 5,66/135^\circ = -U_R$ на схеме рис.2.3 так как направлено

противоположно. Поэтому по результатам моделирования комплексная амплитуда $\underline{U}_{Rm} = 5,66e^{j(135^\circ - 180^\circ)} = 5,66e^{-j45^\circ}$

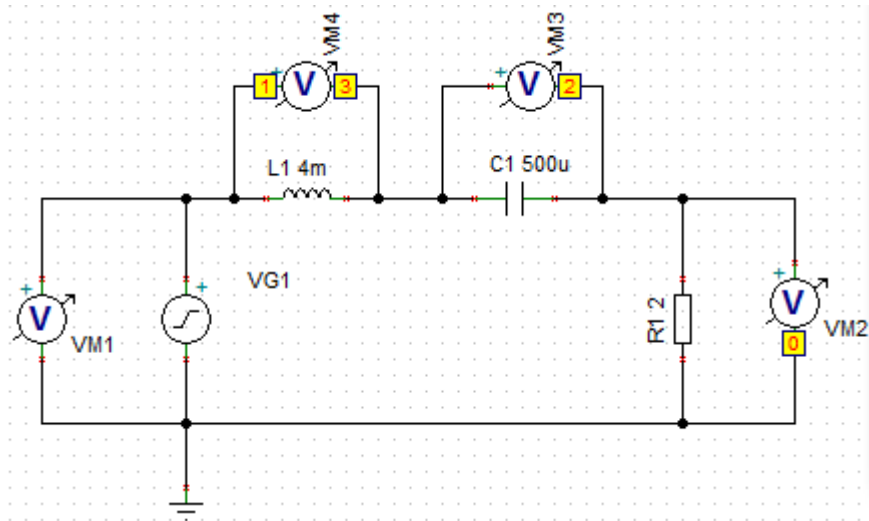


Рис. 2.4. Схема компьютерного моделирования

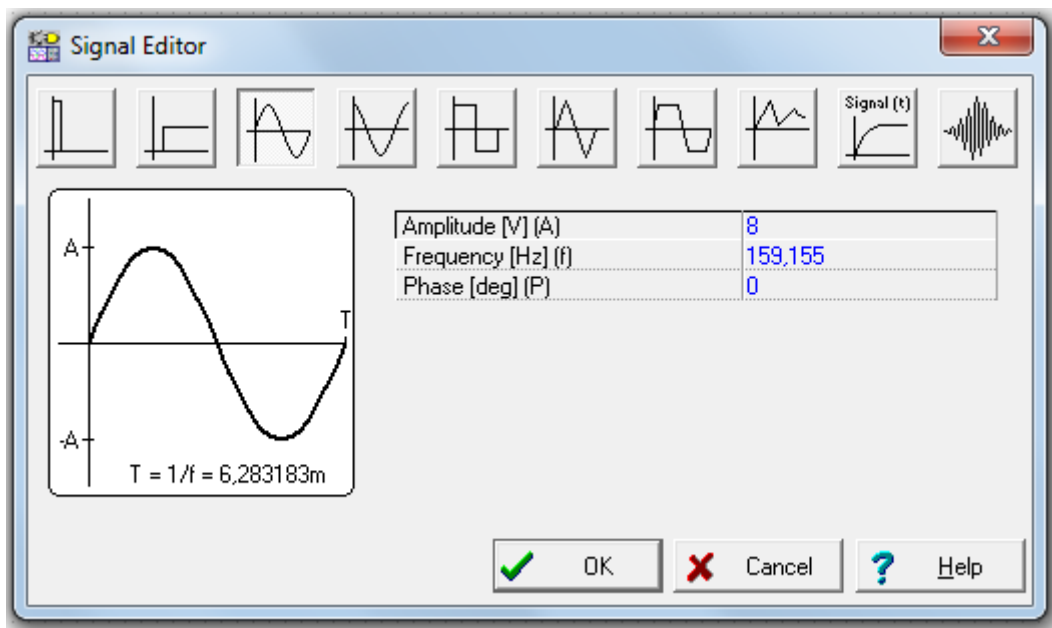
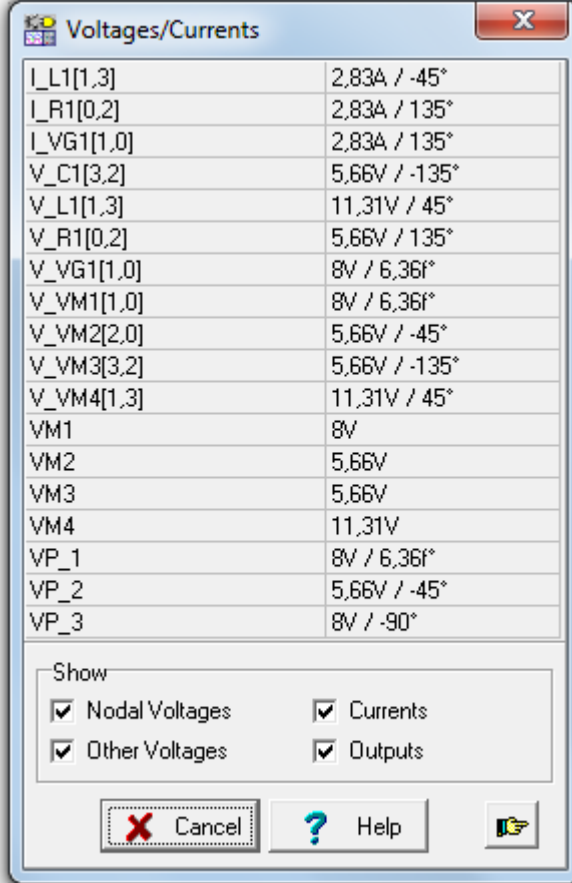


Рис.2.5. Окно редактора сигналов генератора

Подключение вольтметров к элементам цепи (рис.2.4) позволяет получить графики всех напряжений. Для этого в главном меню выбираем *Analysis – AC Analysis – Time Function*. В окне *Time Function* (рис.2.7) устанавливаем время наблюдения с учетом частоты генератора так, чтобы на графиках было 2-3 периода колебаний. Нажимаем *Ok* и получаем семейство графиков напря-

жений (рис. 2.8). В окне графиков кнопкой Legend вызываем таблицу цветовой маркировки каждого напряжения. Используя кнопку T , можно подписать все графики.

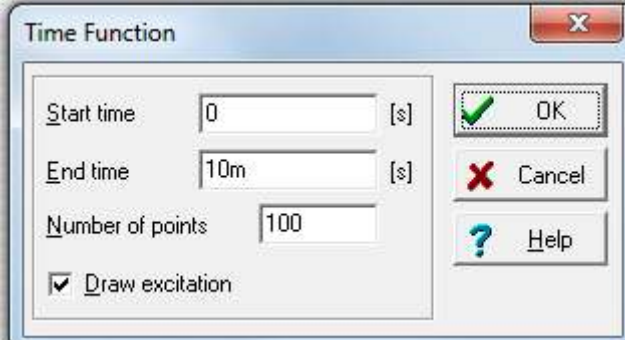


Component	Value
I_L1[1,3]	2,83A / -45°
I_R1[0,2]	2,83A / 135°
I_VG1[1,0]	2,83A / 135°
V_C1[3,2]	5,66V / -135°
V_L1[1,3]	11,31V / 45°
V_R1[0,2]	5,66V / 135°
V_VG1[1,0]	8V / 6,36f°
V_VM1[1,0]	8V / 6,36f°
V_VM2[2,0]	5,66V / -45°
V_VM3[3,2]	5,66V / -135°
V_VM4[1,3]	11,31V / 45°
VM1	8V
VM2	5,66V
VM3	5,66V
VM4	11,31V
VP_1	8V / 6,36f°
VP_2	5,66V / -45°
VP_3	8V / -90°

Show
 Nodal Voltages Currents
 Other Voltages Outputs

Buttons: Cancel, Help, [Icon]

Рис.2.6. Таблица напряжений и токов в схеме рис.2.4.



Start time: [s]
 End time: [s]
 Number of points:
 Draw excitation

Buttons: OK, Cancel, Help

Рис.2.7. Окно установки времени наблюдения

Графики напряжений (рис.2.8) показывают, что напряжение на индуктивности $U_L(t)$ опережает напряжение на резисторе $U_R(t)$

(и, следовательно, ток в цепи) на $T/4$ (90°). Напряжение на емкости $U_C(t)$ отстает от напряжения $U_R(t)$ на 90° .

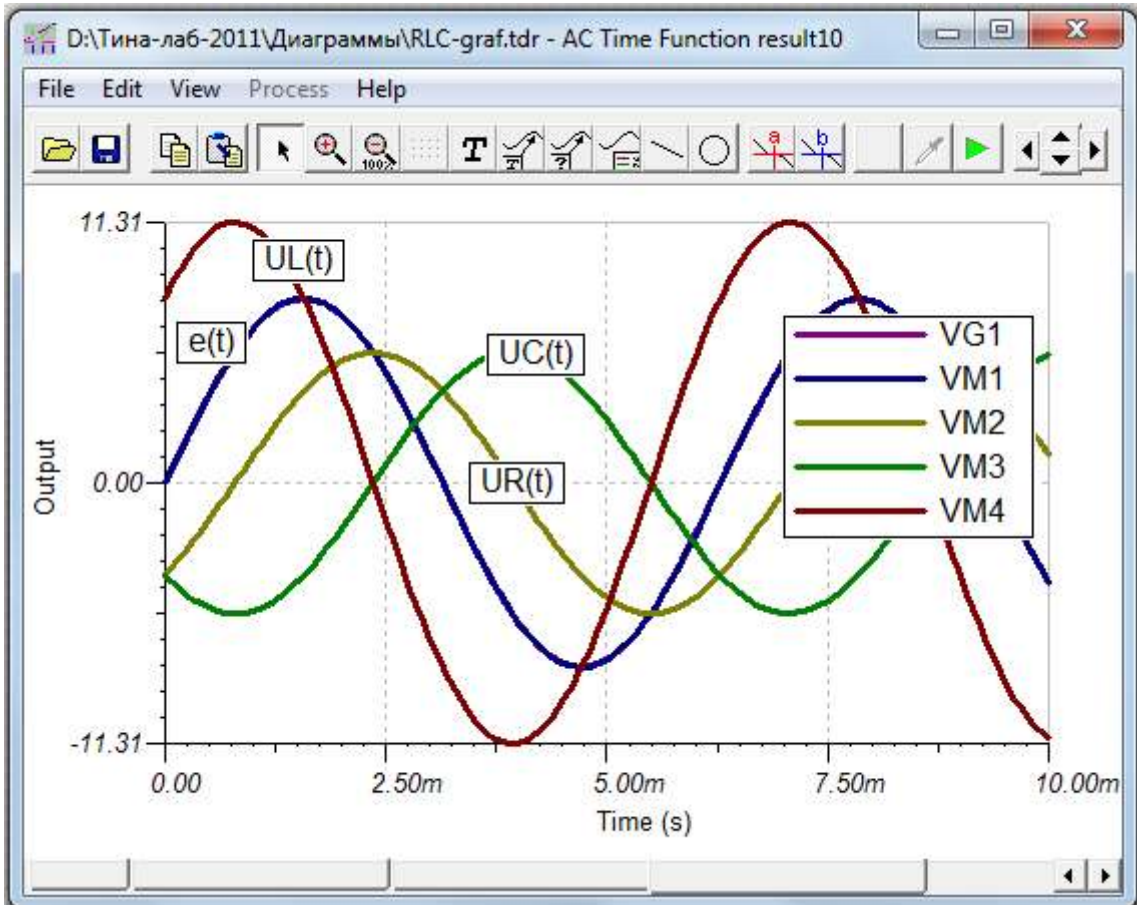


Рис.2.8. Графики напряжений на элементах RLC - цепи

Векторную диаграмму напряжений получим, выбрав в главном меню *Analysis – AC Analysis- Phasor Diagram* (рис.2.9). На векторной диаграмме, выделив оси, следует установить симметричные пределы по осям. Выделив любой вектор, можно назначить цвет, стиль, нарисовать дугу до другого вектора с указанием величины угла. Используя кнопку *Legend*, можно обозначить вектора и указать их длину.

Для схемы рис.2.4 получим амплитудно-частотные (рис.2.10) и фазо-частотные (рис. 2.11) характеристики. Для этого в главном меню выбираем *Analysis – AC Analysis-AC Transfer Characteristic*. В окне *AC Transfer Characteristic* (рис.2.10) устанавливаем начальную частоту, конечную частоту, линейную развертку и виды диаграмм. Нажав *Ok*, получим АЧХ (рис.2.11) и

ФЧХ (рис.2.12) напряжений в RLC -цепи. Кнопкой *Avto Label*  обозначим графики.

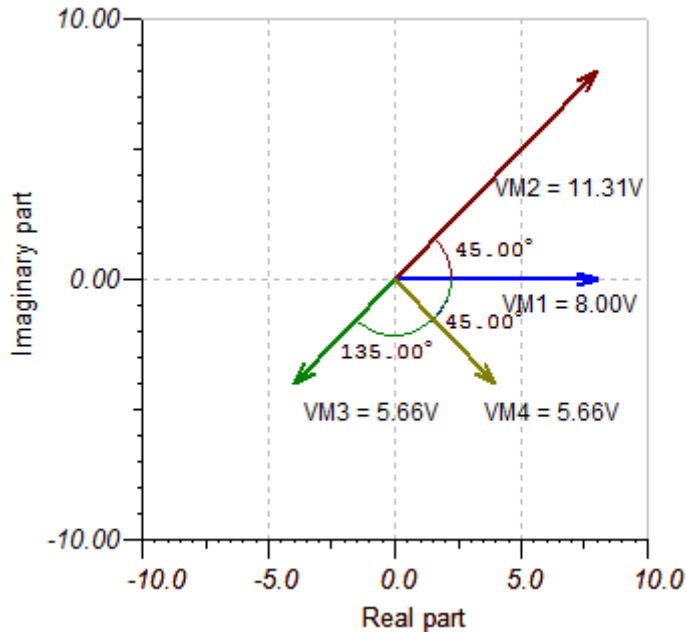


Рис. 2.9. Векторная диаграмма

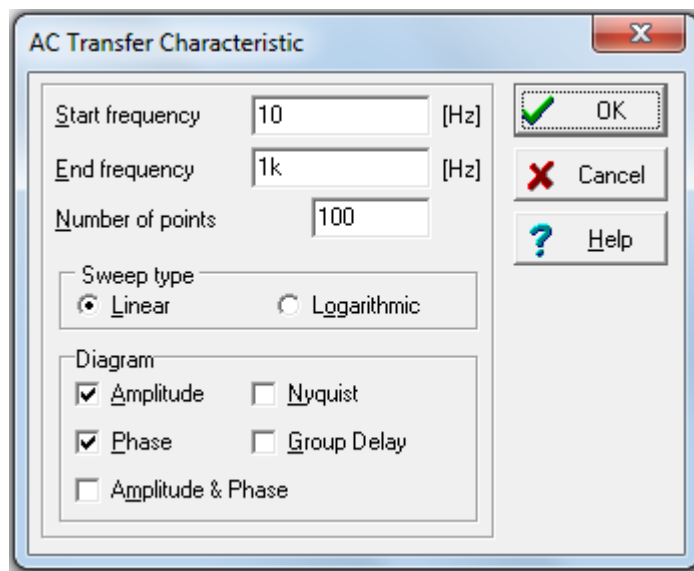


Рис.2.10. Установка режимов моделирования АЧХ и ФЧХ

Из графиков АЧХ видно, что на частоте около 113 Гц в цепи возникает последовательный резонанс. При этом напряжение на резисторе VM4 становится максимальным и равным входному напряжению VM1. Максимум напряжения на конденсаторе VM3

опережает по частоте максимум тока, а максимум напряжения на индуктивности VM2 отстает по частоте от максимума тока.

По фазо-частотным характеристикам видно, что при резонансе разность фаз между входным напряжением и током равна нулю. Фаза напряжения на индуктивности меняется от $+180^\circ$ до 0° , а фаза напряжения на емкости меняется от 0° до -180° .

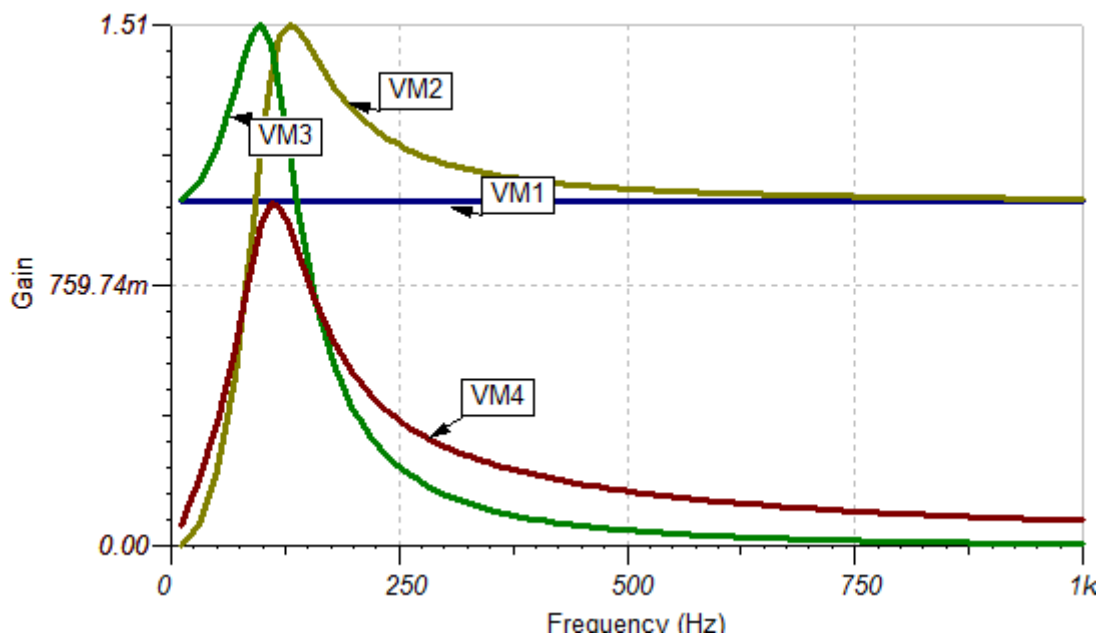


Рис.2.11. Амплитудно-частотные характеристики RLC- цепи

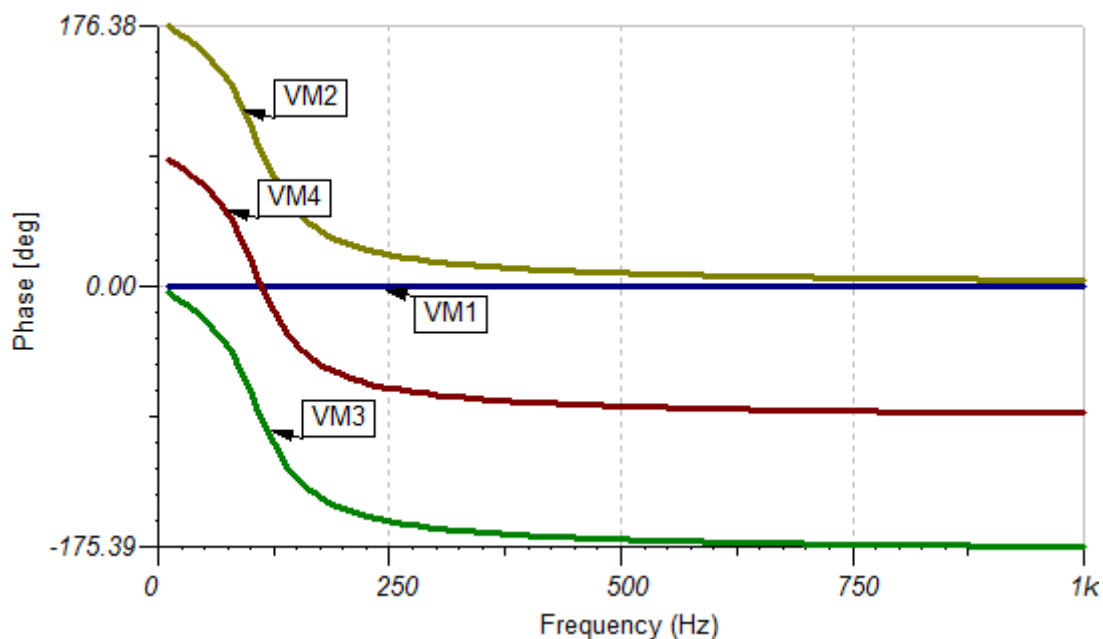


Рис.2.12. Фазо-частотные характеристики RLC- цепи

Расчетное задание №4

1. Рассчитать схему рис.2.2 методом двух узлов. Параметры схемы: $e_1(t) = 90 \sin 6280t \text{ В}$, $e_2(t) = 60 \sin(6280t - 30^\circ) \text{ В}$, $L_1 = 1 \text{ мГн}$, $L_2 = 3 \text{ мГн}$, $C = 5 \text{ мкФ}$, $R_1 = 20 \text{ Ом}$, $R_2 = 25 \text{ Ом}$. Определить токи в ветвях, напряжения на элементах. Рассчитать комплексную мощность в цепи ваттметра. Построить векторную диаграмму напряжений.

Компьютерное моделирование задания №4

1. Собрать модель схемы (рис. 2.13). Провести моделирование и получить таблицу результатов. Подключить ко всем элементам схемы рис.2.13 вольтметры. Входные клеммы вольтметров со знаком + должны быть ориентированы так, чтобы токи по схеме рис.2.2 входили в клеммы +.

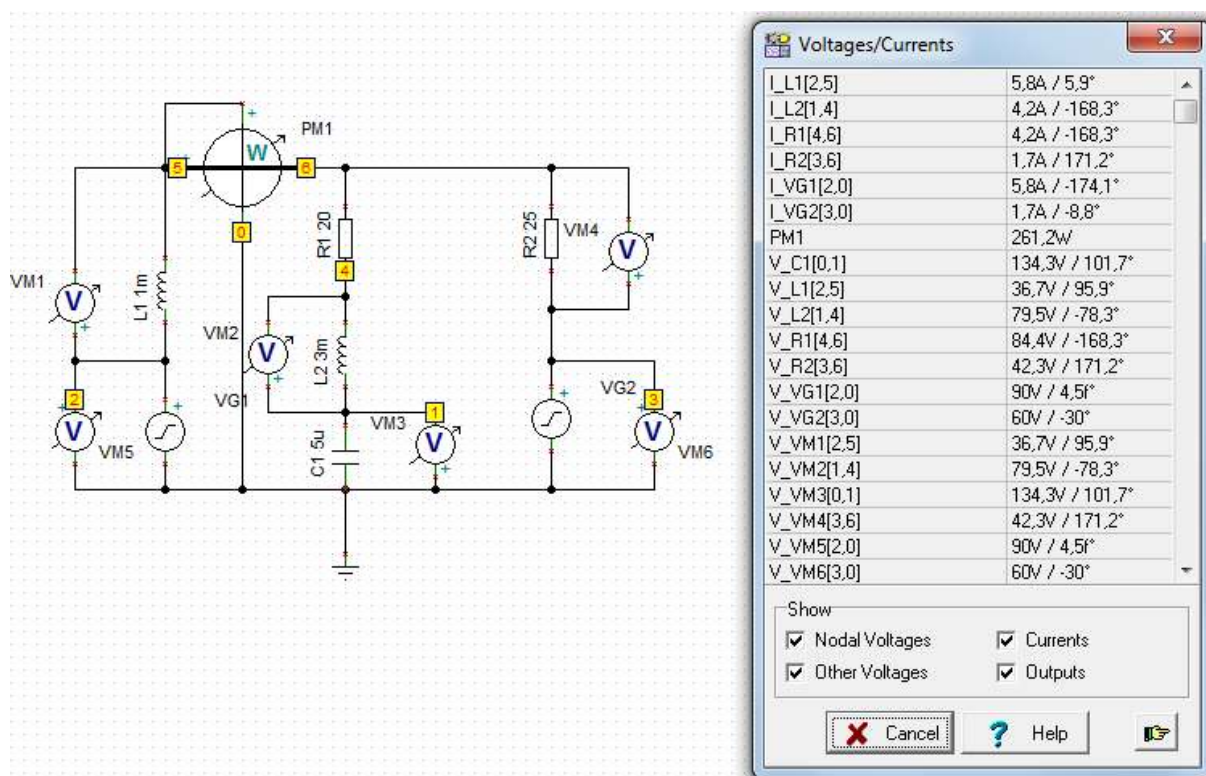


Рис. 2.13. Компьютерная модель схемы с таблицей результатов

Сравнить результаты расчета и результаты моделирования.

2. Выбрать в главном меню *Analysis – AC Analysis- Phasor Diagram* и построить векторную диаграмму (рис.2.14). На фазовой диаграмме обозначить вектора напряжений и комплексной

мощности. Проекция вектора комплексной мощности на ось $+1$ даст активную мощность $P= 261,16$ Вт. Проекция вектора комплексной мощности на ось $+j$ даст значение реактивной мощности $Q= - 133,93$ ВАР.

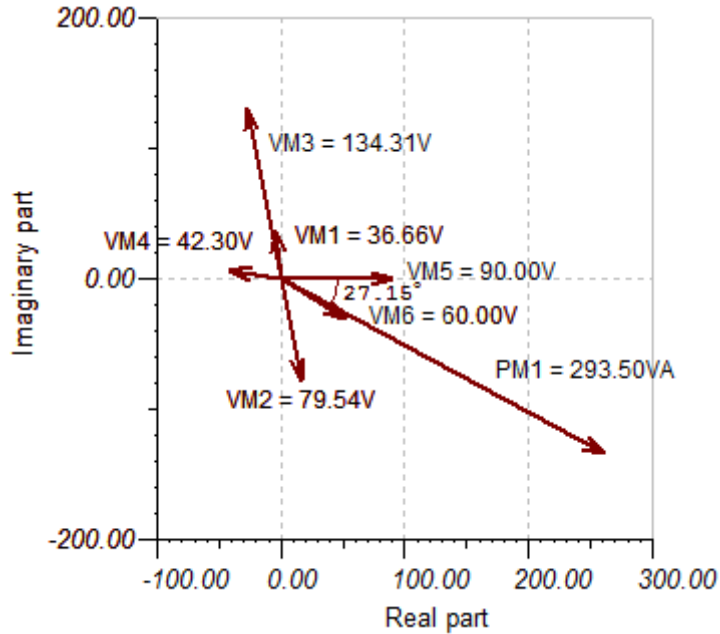


Рис.2.14. Векторная диаграмма напряжений и мощности

Расчетное задание №5

1. Рассчитать амплитудный спектр негармонической последовательности прямоугольных импульсов рис.2.15.

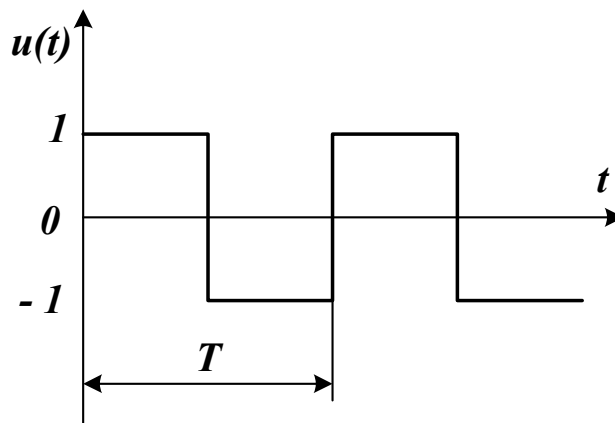


Рис.2.15. Форма последовательности импульсов

Периодический негармонический сигнал $u(t)$ можно представить в виде ряда Фурье:

$$u(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t) =$$

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\Omega t + \Psi_n) \quad (2.5)$$

где: угловая частота первой гармоники $\Omega = \frac{2\pi}{T}$, постоянная составляющая $\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt$, амплитуды гармоник косинусных и синусных составляющих ряда Фурье $a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cos n\Omega t dt$, $b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \sin n\Omega t dt$, амплитуды n -ой гармоники ряда Фурье $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, фаза n -ой гармоники ряда Фурье $\Psi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}$.

Амплитудным спектром называют совокупность амплитуд гармоник A_n , отнесенных к их частотам (расположенным на частотной оси).

Фазовым спектром называют совокупность фаз гармоник Ψ_n , отнесенных к их частотам.

Для заданной функции рис.2.15 примите $T=10$ мС и проведите расчеты амплитуд гармоник спектра $A_1 - A_5$. Обратите внимание, что эта функция имеет симметрию относительно нуля. Поэтому амплитудный спектр будет содержать только синусные составляющие с нечетными номерами.

Компьютерное моделирование задания №4

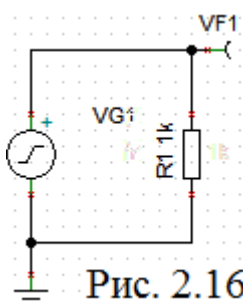


Рис. 2.16

Соберите схему рис. 2.16. В генераторе установите прямоугольные импульсы с амплитудой 1В и частотой 100 Гц. В главном меню выберите *Analysis – Fourier Analysis – Fourier Spectrum*. Сделайте установки (рис.2.17). Амплитудный спектр показан на рис. 2.18. Гармоники спектра имеют частоты 100

Гц, 300 Гц, 500 Гц, 700 Гц, 900 Гц ... и амплитуды 1,27 В, 0,424 В, 0,255 В, 0,18 В, 0,14 В. Сравните результаты расчета и моделирования.

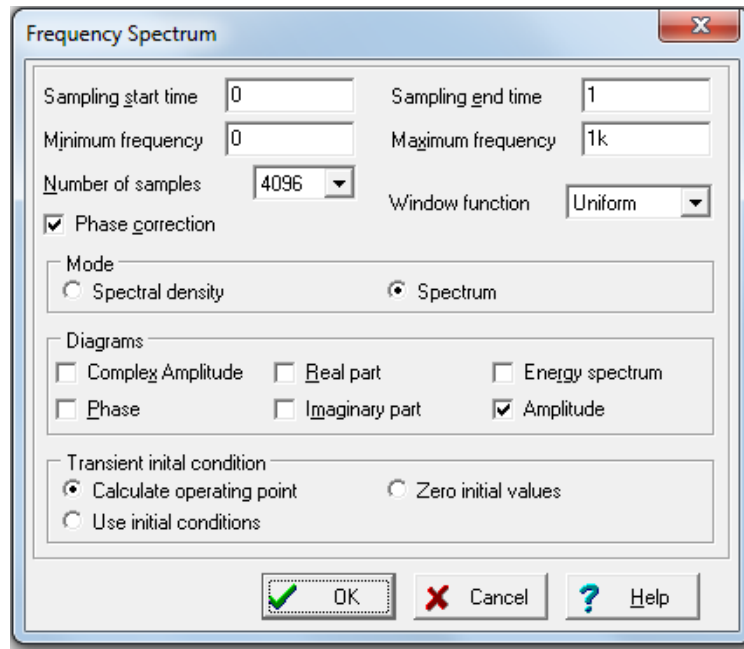


Рис. 2.17. Установки для моделирования амплитудного спектра

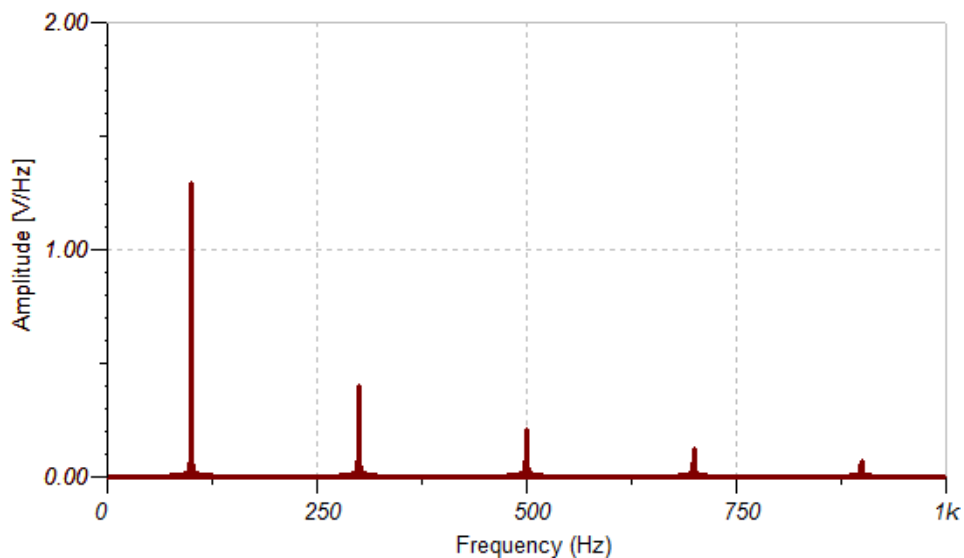


Рис.2.18. Амплитудный спектр прямоугольных импульсов

Контрольное задание №2

1. Выполнить расчет токов по методу двух узлов для схемы из Задачи 1.2 [5]. Номер варианта должен соответствовать двум последним цифрам шифра студента. Рекомендуется использовать программу расчета в *Mathcad* для универсальной схемы рис.2.19.

В листинге программы использованы исходные данные схемы рис. 2.13. При отсутствии индуктивности или резистора в ветви в исходных данных устанавливаются нулевые значения. При отсутствии емкости в ветви в исходных данных надо установить очень большое значение емкости $C=10^6$ Ф.

Сравните результаты расчета токов в листинге с результатами моделирования (рис.2.13) и убедитесь, что они совпадают.

2. После выполнения расчетов токов для своего варианта в *Mathcad* проведите компьютерное моделирование схемы, получите таблицу результатов и сравните их с расчетными.

3. С учетом расположения зажимов ваттметра определите активную мощность, которую измеряет ваттметр.

Библиографический список.

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Гардарики, 2006. – 701 с.

2. Алехин В.А. Моделирование электрических цепей и электронных схем в среде «TINA-8». – М: МИРЭА, 2010 г., № 0986.

3. Миленина С.А. Теоретические основы электротехники. Установившиеся и переходные процессы в линейных электрических цепях. Учебное пособие. М.: МИРЭА, 2009 - 327с.

4. Алехин В.А. Электротехника и электроника. Лабораторный практикум с использованием миниатюрной электротехнической лаборатории МЭЛ, компьютерного моделирования, Mathcad и LabView. Учебное пособие. М.: МИРЭА, 2010 г. - 224 с.

5. . Теоретические основы электротехники. Методические указания и контрольные задания. Для студентов технических специальностей вузов. Под ред. Бессонова Л.А. М.: Высшая школа, 2001.

6. TINA. Design Suite. The Complete Electronics Lab for Windows. Quick Start manual. - <http://www.designsoftware.com/>

7. TINA PRO ADVANCED TOPICS. - <http://www.tina.com/>

8. TINA PCB Design manuals.-<http://www.designsoftware.com/>