

## Моделирование цепей переменного тока в среде ПК *Micro-Cap*

При моделировании процессов в цепях с переменными токами возможно применение нескольких видов анализа, которые выбираются в разделе *Analysis* (Анализ) основного меню или посредством «горячих» клавиш.

### 1. Виды моделирования.

*Transient Analysis* (горячие клавиши *Alt+1*) – анализ переходных процессов в схемах при подаче напряжения питания и (или) воздействий произвольной формы с построением графиков переменных состояния схемы и их функций:

- зависимости от времени;
- зависимости друг от друга;
- спектральные представления переменных (быстрый дискретный анализ Фурье).

Этот вид анализа используется при исследовании работы аналоговых, цифровых и аналого-цифровых устройств.

*AC Analysis* (горячие клавиши *Alt+2*) – анализ малосигнальных частотных характеристик схемы, линеаризованной в окрестности режима по постоянному току, при воздействии одного или нескольких источников гармонического сигнала с постоянной амплитудой и меняющейся (одновременно у всех источников) частотой. При этом возможен вывод графиков:

- зависимости комплексных значений переменных состояния (амплитуды, фазы, групповой задержки) от частоты в линейном или логарифмическом масштабах;
- зависимости составляющих величин переменных состояния друг от друга (например, построение годографа радиус-вектора переменной состояния при использовании в качестве переменной *X* частотно-зависимой действительной части, в качестве переменной *Y* – частотно-зависимой мнимой части);
- зависимости спектральных плотностей напряжений шума, приведенных к указанным входному и выходному узлам, от частоты.

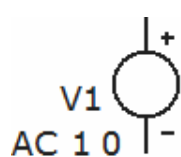
*Dynamic AC* (горячие клавиши *Alt+5*) – анализ режима схемы (линеаризована в окрестности режима по постоянному току) по переменному току и динамическое отображение на схеме величин (по выбору) комплексных переменных состояния схемы при различных частотах (задаваемых списком) и при изменении величин пассивных компонентов (резисторов, индуктивностей, конденсаторов) с помощью движковых регуляторов (*SLIDERS*).

Особенности практического использования *Transient Analysis* и *AC Analysis* подробно описаны в нашем пособии [4]. Поэтому при описании примеров применения этих режимов анализа будем полагать, что основные положения известны читателю.

В этой главе более подробно рассмотрен режим *Dynamic AC (Alt+5)*.

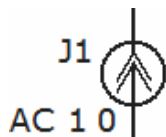
## 2. Источники сигналов, используемые при моделировании

В режиме **Dynamic AC** целесообразно использовать источники двух типов:



Источник напряжения (**Voltage Source**)

Многофункциональный источник напряжения в режиме функции "**None**" - источник гармонических колебаний (1 - амплитуда; 0 - начальная фаза).



Источник тока (**Current Source**)

Многофункциональный источник тока в режиме функции "**None**" - источник гармонических колебаний (1 - амплитуда; 0 - начальная фаза).

При задании параметров источников определяются только амплитуды и начальные фазы, а частота выбирается из списка частот, намеченных программой анализа (см. ниже)

## 3. Динамический анализ режимов

Режим анализа **Dynamic AC (Alt+5)** отображает величины переменного напряжения, тока и мощности непосредственно в схеме на рабочем поле по мере ступенчатого изменения частоты, значения которой определяется списком, составляемым перед началом анализа. Он также может отображать значения переменного тока, динамически реагирующие на изменения схемы цепи (параметров элементов и структуры).

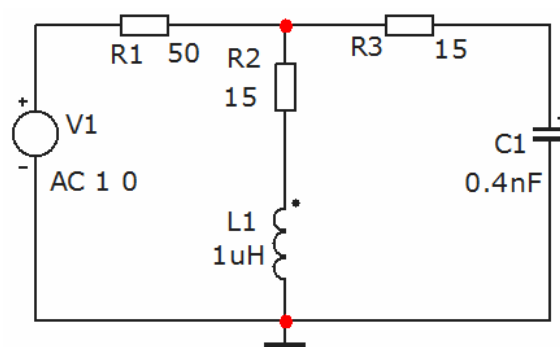


Рис.1. Вид схемы, предназначенной для анализа

При расчете используется **метод комплексных амплитуд**.

### Пример 1.

Пусть для анализа задана цепь, схему которой уже нарисовали на рабочем поле программного комплекса (ПК) **Micro-Cap 12** (рис. 1).

Вызываем режим анализа **Dynamic AC**, нажав комбинацию клавиш "**Alt+5**". На схеме цепи в рабочем поле отражаются (рис. 2) комплексные числовые значения узловых напряжений и токов в ветвях. Кроме этого, на рабочее поле выведено диалоговое окно "**Dynamic AC Limits**" для задания (или изменения) параметров режима анализа и текстовая область "**Grid Text**", где отражаются частота и другие параметры режима анализа, задаваемые первоначально по умолчанию.

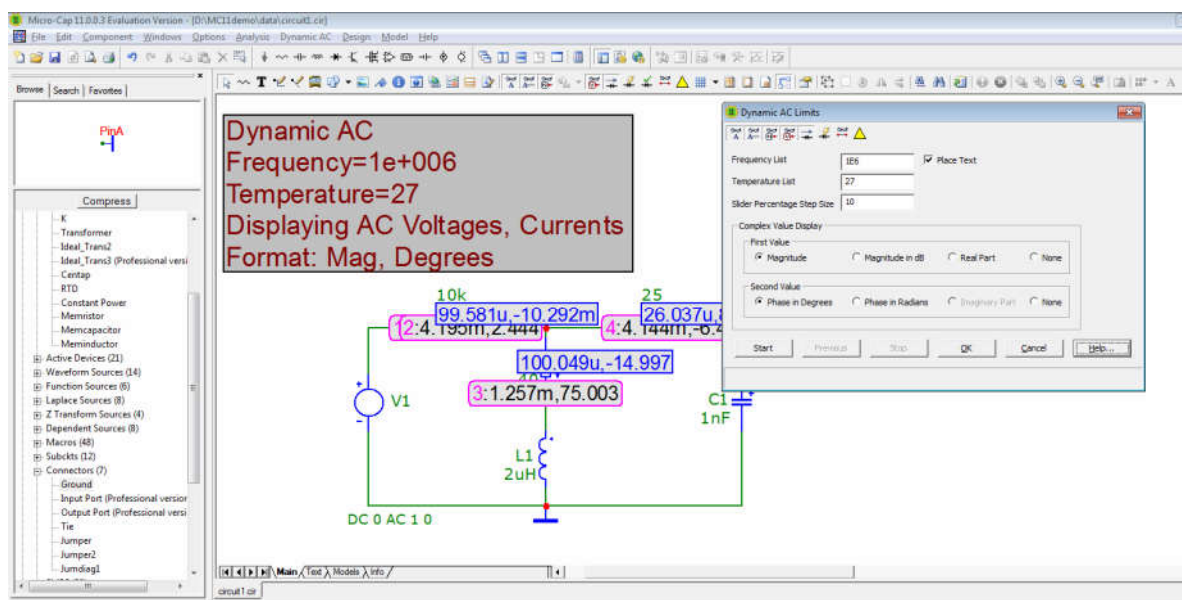


Рис. 2. Вид рабочего поля после выбора режима **Dynamic AC**

Сразу заметим, что все представленное на рис. 2 требует редактирования: прямоугольники со значения токов (синие) и узловых напряжений (с красным ободком) нужно раздвинуть для удобства считывания информации, а в текстовой области следует уменьшить размер шрифта до минимального (8 пунктов) и сделать фон светлее. Все эти изменения можно осуществить только при отсутствии диалогового окна. Поэтому определите параметры анализа в этом окне и, не приступая к выполнению анализа, нажмите "ОК" (или красный крестик в правом верхнем углу диалогового окна). Окно скроется, выполните указанное редактирование, и для выполнения анализа при ступенчатом изменении частоты снова вызывайте диалоговое окно нажатием клавиши **F9**.

Диалоговое окно «**Dynamic AC Limits**» (рис. 3) управляет параметрами динамического анализа режима цепи при переменном токе.

В верхнем ряду расположены инструментальные **кнопки отображения** для вывода (или удаления) на рабочее поле **текста сетки, текста атрибута** (обозначения элементов схемы), **номеров узлов, узловых напряжений, токов и стрелок направления, мощностей переменного тока**. Каждая из кнопок может быть включена индивидуально из диалогового окна или, после его закрытия, из панели инструментов.

**Frequency List** - список значений частоты для моделирования, разделяемых запятыми. В **Dynamic AC** всегда используется фиксированный список дискретных частот, а не линейный или логарифмический диапазон частот.

В данном примере задан список частот (в МГц): **2, 4, 6, 8, 10, 12, 14**.

**Temperature List** - список температур. Весь список частот будет проанализирован для каждого введенного здесь значения температуры.

**Процентный размер шага «Слайдера».**

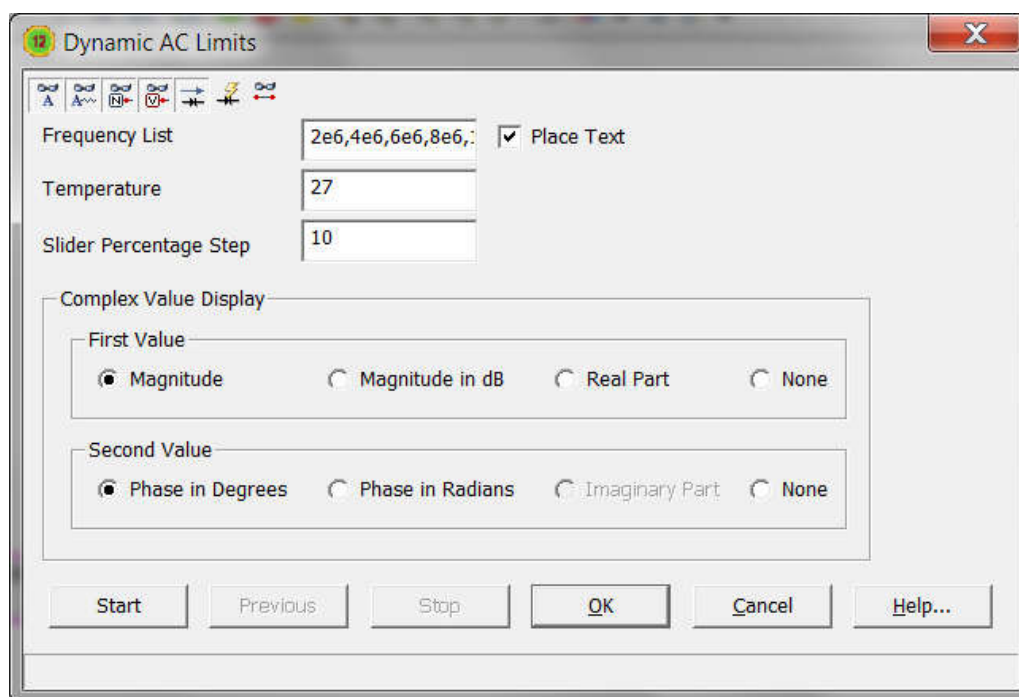


Рис. 3. Диалоговое окно *Dynamic AC Limits*

**Форматы отображения на дисплее комплексных значений**, которые отображаются с двумя числами. Вы выбираете, поставив метку, то, что будет отображаться в первой позиции:

*Magnitude* (Амплитуда); *Magnitude in dB*; *Real Part* (Действительная часть) или ничего (*None*). Затем выбираете то, что должно отображаться в позиции второго числа:

*Фаза в градусах*; *Фаза в радианах*; *Imaginary Part* (Мнимая часть) или ничего (*None*).

**Place Text:** этот флажок позволяет разместить на поле текст (**Grid text**), отображающей перечень вычисляемых динамических параметров переменного тока, включая частоту, температуру, используемый формат комплексных чисел и мощности источников (рис. 4.25).

Нижний ряд кнопок позволяет управлять анализом в режиме диалогового окна.

**Start:** начинается анализ на первой частоте из списка. После первого нажатия название кнопки меняется на **Next**. Каждое нажатие кнопки вызывает один анализ при очередном значении частоты в списке. Когда достигается конец списка, следующий расчет выполняется для первой частоты.

**Previous:** каждое нажатие этой кнопки производит один анализ при предыдущем значении частоты.

**Stop:** нажатие этой кнопки останавливает анализ на последней частоте, отключает кнопку **Previous** и восстанавливает имя кнопки для запуска (**Start**).

**OK:** это завершает работу диалогового окна (окно исчезает с экрана монитора), но динамический режим переменного тока все еще действует.

Изменения схемы теперь производят динамическое обновление выбранных величин переменного тока на последней частоте.

**Cancel:** этот параметр завершает работу диалогового окна и игнорирует любые изменения содержимого диалогового окна. Динамический режим переменного тока все еще действует.

Изменения схемы теперь производят динамическое обновление выбранных величин переменного тока на последней частоте.

**Help:** доступ к справочной информации для диалогового окна.

В то время, когда отображается диалоговое окно «*Dynamic AC Limits*», после каждого нажатия кнопок *Start / Next* или *Previous* рассчитывается режим на одной частоте, и выбранные результаты отображаются на схеме. Использовать эти результаты для помещения в отчет можно только, если скопировать все изображение на экране монитора и обрезать излишки (рис. 4.25).

Нажмите кнопку **OK**, чтобы выйти из диалогового окна. Процесс расчетов в диалоговом окне можно прервать на любой стадии. Тогда на схеме отображаются результаты расчета на этой стадии.

Если диалоговое окно «*Dynamic AC Limits*» не отображается на рабочем поле, то программа динамически реагирует на изменения, выполняя новый анализ и затем обновляя режимные значения на схеме. Любые изменения схемы, такие как добавление или удаление деталей, а также использование клавиш курсора для управления значением выбранных

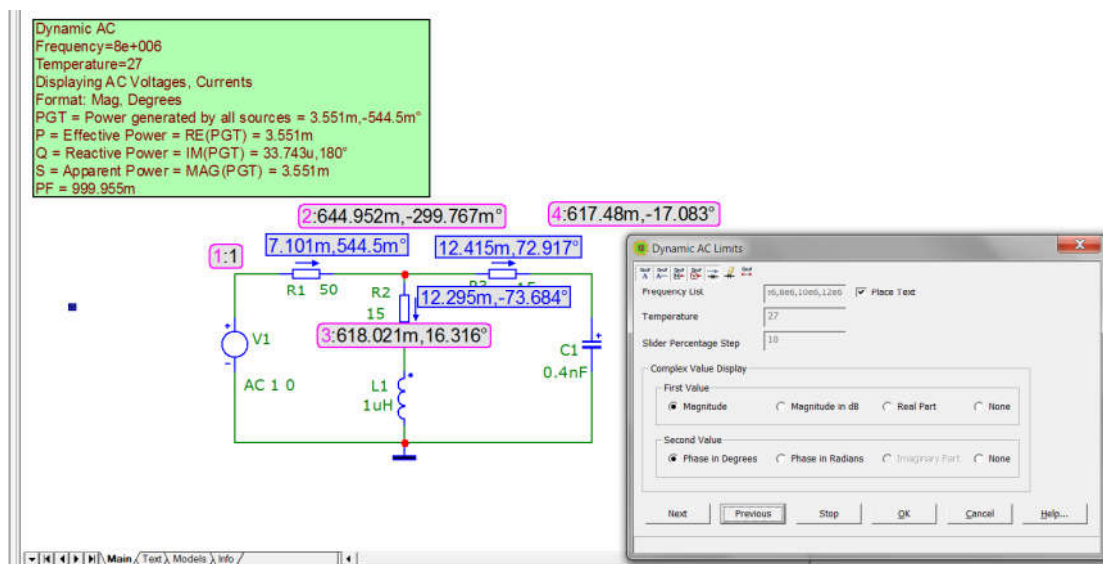


Рис. 4. Вид рабочего поля при анализе режима на частоте 8 МГц - резонансной частоте параллельного контура

резисторов, конденсаторов, индуктивностей, источников *Voltage source* и *Current source*, вызывают новый анализ на последней частоте.

При отсутствии на рабочем поле диалогового окна имеется возможность выделить содержимое рабочего поля и вставить в отчет об исследованиях, если выполнить следующие действия:

***“Edit”=>“Copy to Clipboard”=>“Copy the Visible Portion of Window in BMP format”.***

После копирования можно вставлять копию в документ так, как обычно, используя комбинацию ***“Ctrl+V”***, и обрезать лишние белые поля (рис. 5 и рис. 6).

Диалоговое окно можно вызвать, работая в режиме ***Dynamic AC***, снова нажатием клавиши **F9** и начать прохождение списка частот

Если Вы желаете помещать в отчет результаты анализа на каждой частоте из намеченного списка, то рекомендуется после каждого шага в расчетах выходить из диалогового окна, копировать результаты на рабочем поле, вставлять в отчет, а потом опять вызывать диалоговое окно клавишей **F9** и продолжать анализ, используя список частот.

Динамические значения переменного тока всегда представляются с затененной заливкой, чтобы легко отличать их от динамических величин постоянного тока, которые представляются с четкой заливкой.

Для выхода из режима анализа ***Dynamic AC*** нужно нажать сочетание клавиш ***“Shift+F3”***. После этого все числовые значения исчезают с экрана..

Теперь проанализируем полученные результаты анализа на одной из частот списка. Эта частота **8 МГц** выбрана потому, что она почти совпадает с резонансной частотой параллельного контура, состоящего из двух параллельных ветвей:  $R_2, L_1$  и  $R_3, C_1$ . Истинное значение резонансной частоты **7,952 МГц** определено в следующем разделе при

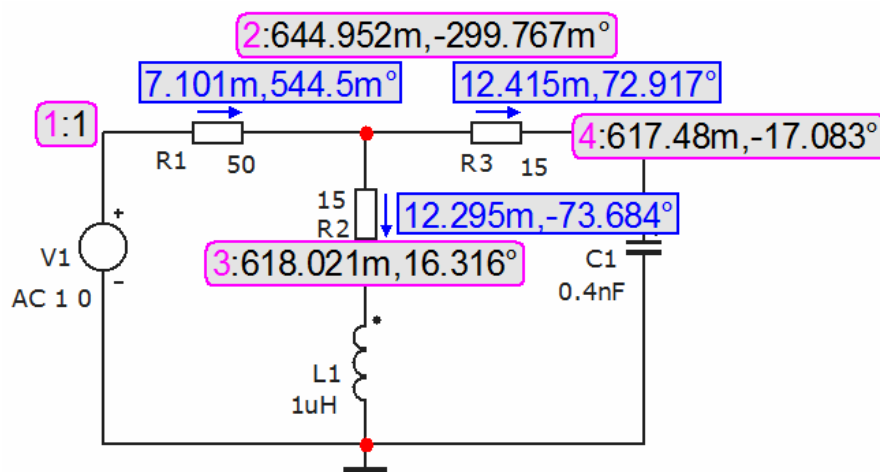


Рис. 5. Токи и узловые напряжения в цепи на частоте 8 МГц при резонансе параллельного контура

анализе частотных характеристик, а теоретические основы резонанса рассмотрены в главе 5.

При резонансе эквивалентное сопротивление контура является чисто активным и полное сопротивление цепи тоже. Поэтому (см. рис. 4.26) угол сдвига фазы тока через  $R_1$  относительно фазы ЭДС источника  $V_1$  очень мал ( $0,5^\circ$ ), у напряжения узла "2"

(напряжения на контуре) фазовый угол  $0,3^\circ$ , а активная мощность источника почти равна полной мощности (см. рис. 4.25 и рис. 4.27).

Токи в ветвях контура (через сопротивления  $R_2$  и  $R_3$ ) практически имеют одинаковые амплитуды и симметричные фазовые сдвиги по  $73^\circ$  относительно направления действительной оси, что свидетельствует о **резонансе токов**.

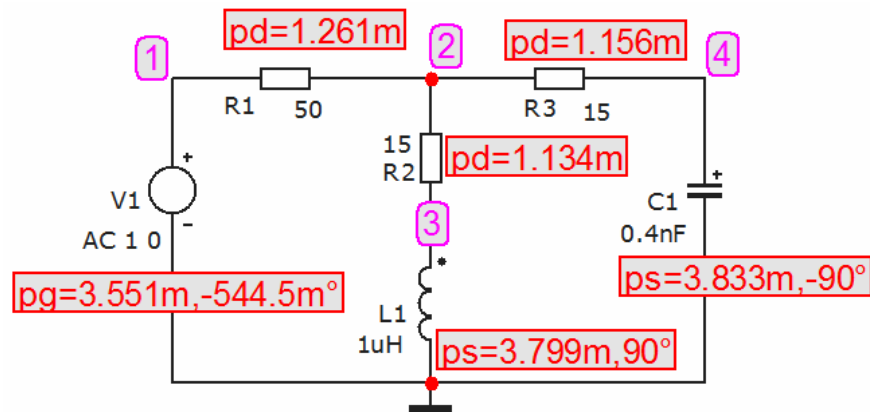


Рис. 6. Мощности в цепи на частоте 8 МГц - резонансной частоте параллельного контура

Обратите внимание (рис. 6), что на активных сопротивлениях указываются активные мощности, а на источнике и реактивных элементах цепи - комплексные (полные) мощности, причем мощности на индуктивности и на емкости имеют фазовые углы  $90^\circ$  и  $-90^\circ$  соответственно, что свидетельствует о реактивном характере этих мощностей.

#### 4. Анализ режимов в частотном диапазоне

Будем анализировать свойства той же цепи (рис.1), как в предыдущем примере.

Приступая к выполнению программы *AC Analysis*, ПК *Micro-Cap* заменяет любые источники, которые стояли в схеме цепи на источник гармонических колебаний напряжения с амплитудой 1 вольт и нулевой начальной фазой. Затем проводится расчет режима в цепи при дискретных значениях частоты, которая увеличивается с весьма малым шагом, достаточным для заданной точности. Массивы числовых значений помещаются в специальный файл и используются при построении графических зависимостей. Как и в *Dynamic AC*, используется **метод комплексных амплитуд**, но рассчитываются комплексные значения не всех переменных состояния цепи, а только выбранных.

Итак, вызываем *AC Analysis*, используя комбинацию клавиш "Alt+2". На рабочем поле появляется диалоговое окно "*AC Analysis Limits*" (рис. 7), где в строке **Frequency Range** в первом окошке устанавливаем логарифмический масштаб по оси частот (на графиках) и во втором окошке - диапазон частот (50 МГц, 1 МГц - верхняя и нижняя границы).

Выбираем автоматическую установку пределов на графиках по вертикали.

В нижней половине диалогового окна намечаем, что на всех графиках по оси "X" будет выводиться частота, а по оси "Y" – следующие переменные: напряжение узла "2"; фаза этого



напряжения; нулевой уровень для отсчета фазы; три тока через сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .  
Отмечаем цвета и номера графиков, на которых будут строиться эти частотные зависимости.  
Нажимаем кнопку **"Run"** в диалоговом окне или **"F2"** на клавиатуре, получаем графики.

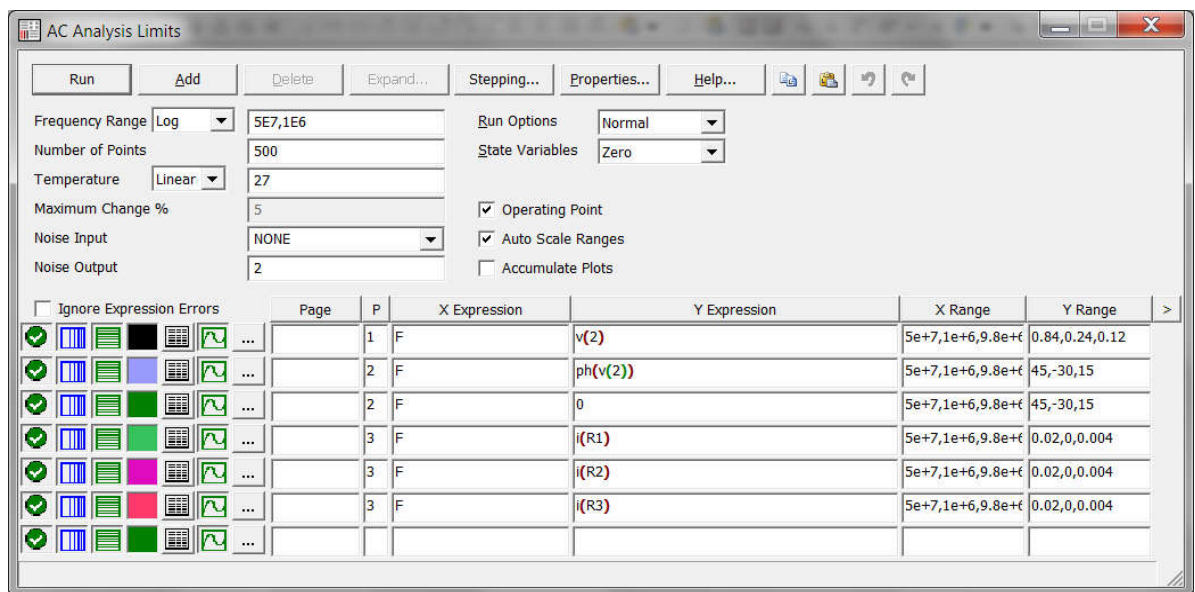


Рис. 7. Диалоговая окно *AC Analysis Limits*

Часто толщина линий характеристик не устраивает пользователей. Тогда нужно поместить стрелку мышки на любой из графиков и щелкнуть два раза.

Откроется окно **"Properties for AC Analysis"**, в котором следует выбрать третью закладку **"Color, Fonts and Lines"**, где появится возможность поменять цвета линий и установить их ширину.

В окончательном виде графики представлены на рис. 8. Напомним, что здесь отмечены значения амплитуд переменных на разных частотах.

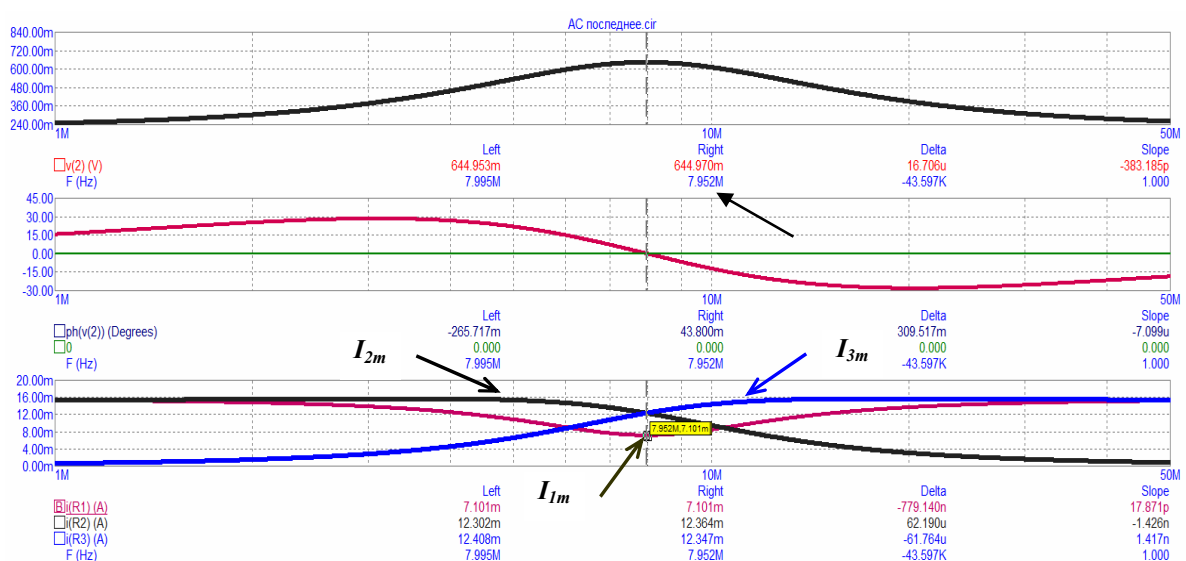


Рис. 8. Частотные зависимости напряжений и токов в цепи, представленной на рис. 4.22



Частотные характеристики обладают большой информативностью - сразу видно, что амплитуда напряжения  $U_{2m}$  на контуре имеет хорошо выраженный максимум, вследствие резонанса контура на частоте, которая отмечена правым курсором автоматически. Значение резонансной частоты указывает стрелка. Рассматриваемая цепь обладает избирательными свойствами по частоте сигнала.

На частоте резонанса фаза этого напряжения равна нулю, так как график фазы (второй график) пересекает нулевой уровень.

Амплитуды токов  $I_{2m}$  и  $I_{3m}$  в ветвях контура (третий график, черная и синяя характеристики) имеют равные значения при резонансе (резонанс токов), а амплитуда тока  $I_{1m}$  через источник - минимальное значение.

### 5. Анализ изменения режимов во времени

При работе в *Transient Analysis* требуется, чтобы все параметры источников были заданы полностью. Следовательно, у источника гармонических колебаний нужно задавать амплитуду, частоту и начальную фазу.

Для продолжения исследований той же цепи (рис. 1) подходят: источник напряжения

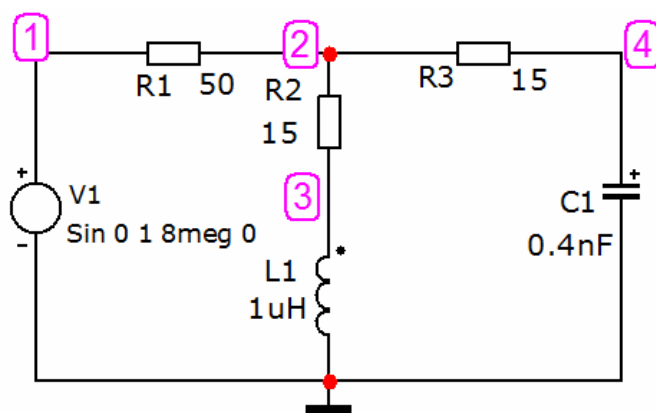


Рис. 9. Схема цепи, подготовленная для исследования процессов во времени

типа *Sine Source* и многофункциональный источник напряжения *Voltage Source*. Используем источник второго типа, поскольку он уже нарисован в схеме на рабочем поле ПК *Micro-Cap 12*, оставшейся после предыдущих исследований.

Двойным щелчком мыши по источнику V1 вызываем диалоговое окно (рис. 10), в котором выбираем функцию источника "Sin" и устанавливаем параметры: постоянная составляющая - 0,

амплитуда - 1, частота - 8 МГц, фаза - 0 (по умолчанию). Получаем схему, вид которой представлен на рис. 9.

Затем, используя комбинацию клавиш "*Alt+I*", вызываем на рабочее поле диалоговое окно *Transient Analysis Limits* (рис. 11), где в верхнем левом окошке устанавливаем длительность анализа 0,25 мкс (два периода колебания с частотой 8 МГц).

Ниже в окошке устанавливаем величину максимального шага при расчетах состояния цепи в дискретные моменты времени (обеспечивает плавность кривых на графиках).

Затем выбираем автоматическую установку "пределов" на графиках.

В нижней половине диалогового окна определяем режимные переменные, значения которых будут выводиться на графики, и распределяем эти переменные по графикам. Теперь по оси "X" откладываются значения моментов времени.

Нажимаем кнопку **Run** , получаем графики, представленные на рис. 12. Редактируем толщину линий и их цвет.

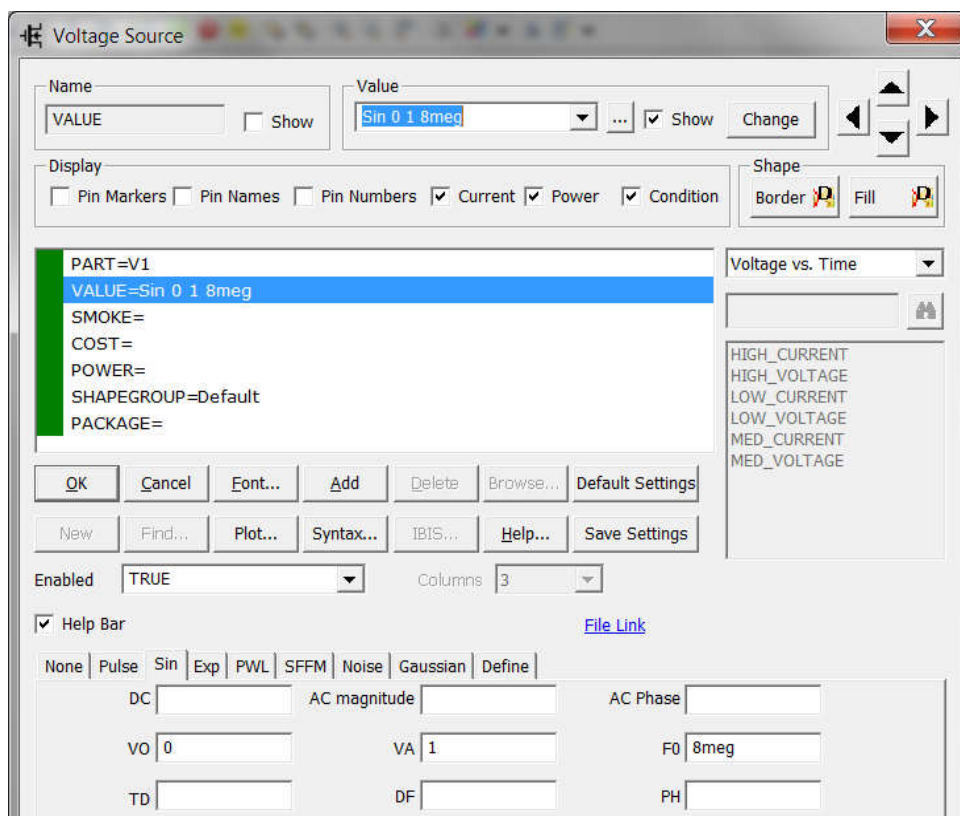


Рис. 10. Определение параметров *Voltage source* как источника гармонических колебаний

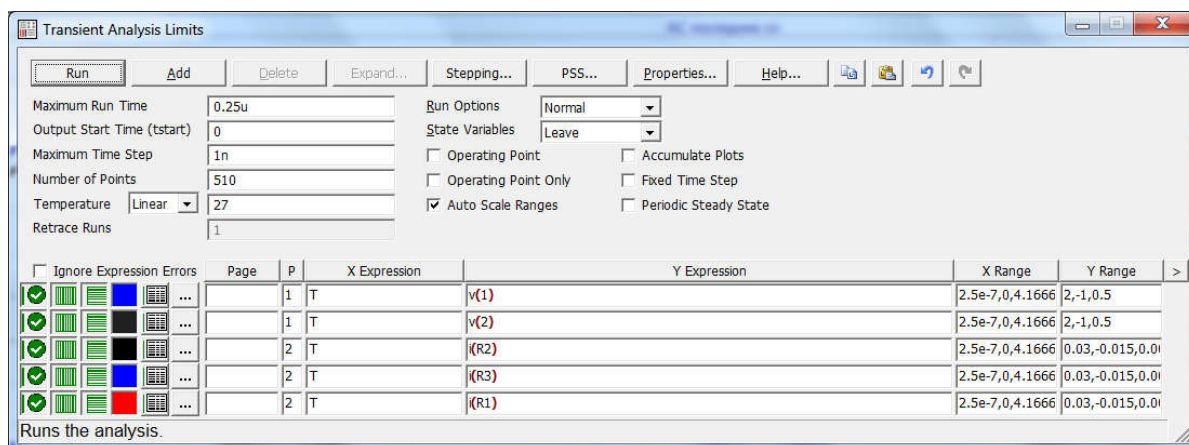


Рис. 11. Диалоговое окно *Transient Analysis Limits* для задания параметров анализа

На верхнем графике показаны напряжение источника  $V1$  (синий график) и напряжение узла «2» (черный график), которые изменяются синфазно. На втором графике изображены токи, причем ток через сопротивление  $R_1$  (красный график) совпадает по фазе с напряжением источника.

Токи в ветвях контура имеют одинаковые амплитуды, но ток через  $R_2$  в ветви с индуктивностью (черный график) отстает по фазе от напряжения источника на  $73^\circ$ , как определено на рис. 5, а ток через  $R_3$  (синий график) опережает на такой же угол это напряжение.

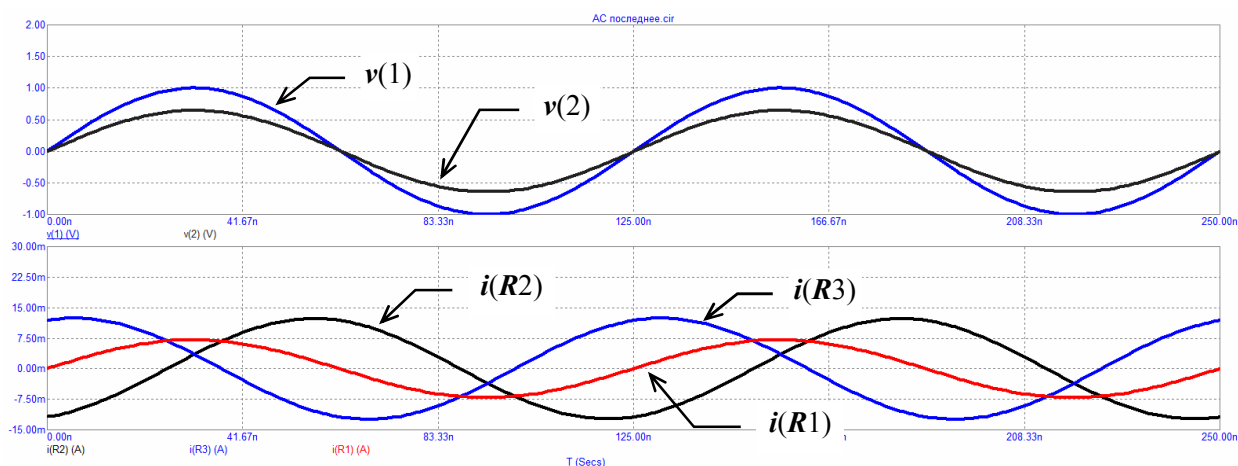


Рис. 12. Временные зависимости напряжений и токов в цепи

### Контрольные вопросы к теме «Электрические цепи с гармоническими токами»

- Условие квазистационарности. Как оно используется в теории электрических цепей?
- Какие особенности имеет установившийся режим в линейной цепи при гармоническом воздействии?
- Что характеризует комплексная амплитуда?
- Метод комплексных амплитуд (область применения, алгоритм).
- В чем сходство и различие векторных и векторно-топографических диаграмм?
- В какой цепи активная и полная мощности равны по величине?
- Почему стараются уменьшить реактивную мощность?
- Поясните смысл действующего значения переменного гармонического напряжения.
- Согласование источника сигнала и нагрузки (условия и применение).

### Задача 1.пт

Известен комплекс действующего значения тока:  $\underline{I} = 0.5 + j0.5$ .

Определить комплексную амплитуду тока, построить вектор и записать выражение для мгновенных значений.

### Задача 2.пт

Известно переменное напряжение  $u_L(t) = 14 \cos(500t + 23^\circ)$  на индуктивности  $L = 20 \text{ мГн}$ . Определить комплексную амплитуду тока, построить векторы напряжения и тока, записать выражение для мгновенных значений.