ПРОГРАММА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ PSPICE

1. Ведение

PSpice является модификацией известной программы моделирования интегральных схем SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), разработанной в Калифорнийском Университете. В настоящее время SPICE стала эталонной программой моделирования аналоговых электронных цепей.

Первая версия SPICE была разработана в середине 70-х годов. Она позволяла анализировать линейные и нелинейные цепи во временной области, рассчитывать частотные характеристики линейных цепей. Для анализа линейных резистивных цепей использовался метод узловых напряжений. Библиотека моделей включала модели диода и биполярного транзистора (модель Эберса-Молла).

С течением времени программа совершенствовалась, появлялись новые версии, расширялся список моделей компонентов. В конце 70-х годов SPICE стала широко использоваться в промышленности для моделирования электронных схем.

В 1983 году появилась версия SPICE2G.6, разработанная в Калифорнийском университете (Беркли). Это была последняя версия, написанная на языке FORTRAN. Математический модуль подвергся существенной переработке. Для анализа линейных цепей в версии 2G.6 использовался модифицированный метод узловых напряжений. При расчете динамических цепей использовались алгоритмы с автоматическим выбором шага интегрирования. Были переработаны модели биполярных и МОП-транзисторов. Модель биполярного транзистора в версии 2G.6 основана на уравнениях Гуммеля-Пуна.

Заметим, что версия SPICE2G.6 оказалась очень надежной. Она используется и в некоторых современных программах схемотехнического моделирования.

В 1985 году была разработана следующая версия программы, SPICE3. Она базируется на версии SPICE2G.6 и является ее развитием. Математическое ядро программы было написано на языке С. Для представления результатов моделирования использовался графический интерфейс. В новой версии программы удалось преодолеть некоторые трудности, связанные с численной неустойчивостью алгоритмов, используемых при анализе нелинейных цепей. В программу были включены новые модели электронных компонентов: длинных линий с потерями, неидеальных ключей и т.д. Появились модели МОП-транзисторов, учитывающие физические эффекты, возникающие при уменьшении геометрических размеров приборов.

В середине 80-х годов появились программы схемотехнического моделирования, предназначенные для персональных компьютеров. Корпорация MicroSim представила версию SPICE для персональных компьютеров, назвав ее PSpice, в 1984 г. Эта и последующие версии используют используют математические модули SPICE, такой же формат представления входных и выходных данных.

Первые версии PSpice позволяли моделировать только аналоговые устройства. Рассчитывались переходные процессы при действии сигналов различной формы, частотные характеристики, рабочие точки нелинейных приборов. В начале 90-х годов были созданы версии, позволяющие моделировать не только аналоговые, но и смешанные аналого-цифровые устройства. Программа получила удобный интерфейс, обеспечивающий графический ввод схем.

Современные версии Pspice представляют вычислительную среду, предназначенную для моделирования аналоговых и цифровых электронных схем. Существенное достоинство программы заключается в возможности моделирования смешанных аналого-цифровых схем без применения вспомогательных устройств согласования аналоговых и цифровых сигналов. Это достигается за счет автоматического использования специальных интерфейсов и значительно облегчает моделирование смешанных аналого-цифровых устройств.

Процедура моделирования электронных схем в программе Pspice состоит из трёх этапов:

1. Создание принципиальной схемы;
2. Моделирование;
3. Представление результатов моделирования в удобной для пользователя форме.

Для создания графического изображения принципиальных схем в современных версиях Pspice служат редакторы Schematics и Capture. Они выполняют одновременно функции управляющей оболочки для запуска других модулей Pspice. Перед началом моделирования проверяется правильность соединения элементов схемы. Разумеется, программа может выявить только простейшие ошибки, такие как «висящий» узел, к которому подключен только один элемент, или отсутствие заземления.

Для представления результатов расчетов в удобной для пользователя форме служит графический постпроцессор Probe. Он выводит на экран графики результатов моделирования и выполняет их математическую обработку.

Базовый набор элементов Pspice включает резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки, диоды, биполярные транзисторы, полевые транзисторы с управляющим *p-n* переходом и изолированным затвором, длинные линии, источники напряжения и тока различной формы. Аналоговые интегральные схемы, а также некоторые компоненты

(тиристоры, некоторые виды полевых транзисторов) представляются подсхемами, параметры которых задает пользователь.

Базовый набор элементов Pspice содержит также цифровые функциональные блоки, выполняющие логические операции. Цифровые элементы могут реализовываться пользователем на основе функциональных блоков. Кроме того, существуют обширные библиотеки серийно выпускаемых цифровых компонентов.

2. Создание и редактирование принципиальных схем с помощью графического редактора Schematics

Процедура моделирования электронных схем в программе Pspice состоит из трёх этапов:

1. Создание принципиальной схемы;
2. Моделирование;
3. Представление результатов моделирования в удобной для пользователя форме.

Для создания графического изображения принципиальных схем служит редактор Schematics. Управление им осуществляется с помощью ниспадающих меню или комбинаций функциональных клавиш.

Для запуска схемного редактора необходимо выбрать **PSPICE** в меню **Programs**, расположенных в меню Start (Пуск).

После запуска схемного редактора на экран выводится наборное поле (рис. 1). В верхней части экрана расположено основное меню. Под основным меню находится панель инструментов, включающая кнопки, соответствующие наиболее часто выполняемым командам. Если подвести указатель мыши к любой из кнопок, на экране появится всплывающая подсказка с названием команды.

В верхней части экрана расположено горизонтальное меню, имеющее следующие разделы:

File – загрузка, создание и сохранение файлов описаний схем;

Edit – редактирование или удаление компонентов;

Draw – размещение компонентов и проводников;

View – изменение масштаба изображения;

Analysis – создание описания схемы, проверка правильности соединения, вызов программы моделирования Pspice.

Для вызова пункта меню достаточно нажать клавишу с соответствующей подчеркнутой буквой.

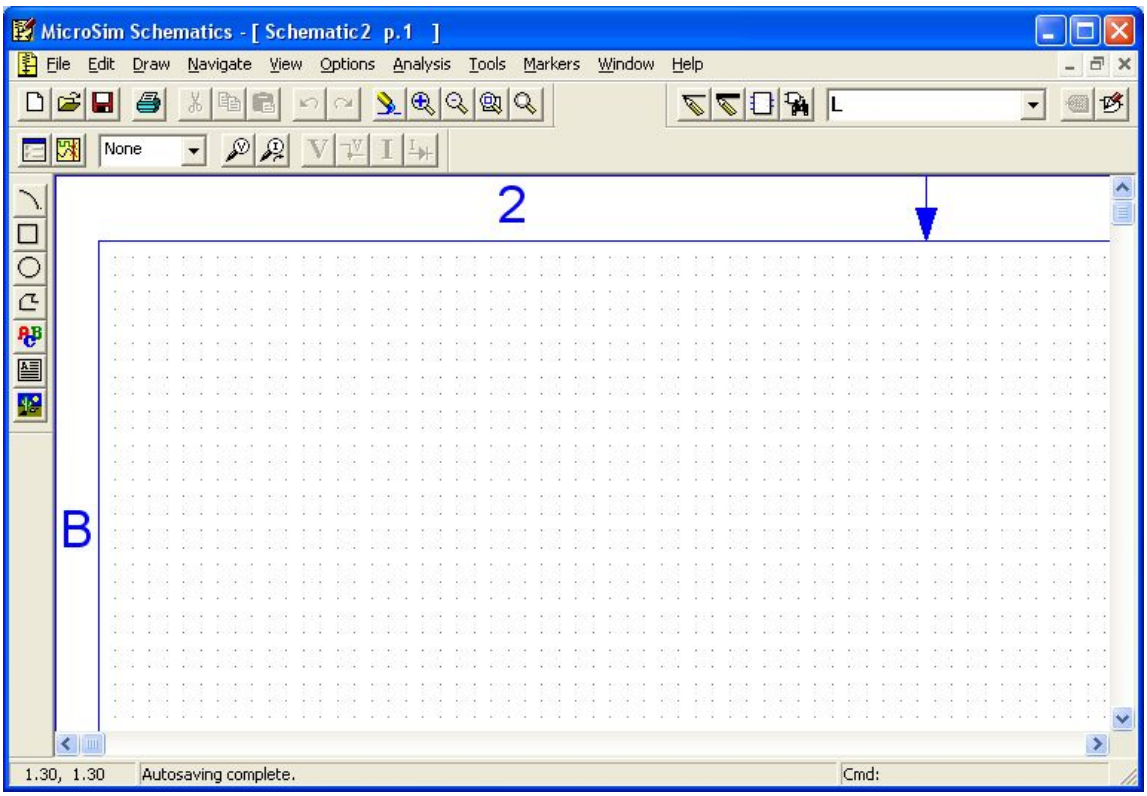


Рис. 1

В таблице 1 помещены основные операции и соответствующие комбинации клавиш, с помощью которых эти операции можно выполнить.

Таблица 1.

Комбинация клавиш	**Операция**
Ctrl+C	Копирование в буфер обмена
Ctrl+G	Выбрать новый компонент
Ctrl+F	Зеркальное изображение
Ctrl+I	Увеличить изображение
Ctrl+L	Перерисовать
Ctrl+N	Перерисовать схему на весь экран
Ctrl+O	Уменьшить изображение
Ctrl+R	Повернуть символ на 90^0
Ctrl+S	Сохранить файл
Ctrl+T	Ввести текст
Ctrl+Z	Восстановить удаленный объект
Ctrl+V	Вставить объект из буфера
Ctrl+X	Вырезать объект и поместить в буфер обмена

Выбор и размещение компонентов на наборном поле. Компоненты электронных схем хранятся в специальных библиотеках. Список основных библиотек, используемых в студенческой версии Pspice, показан на рис. 2.

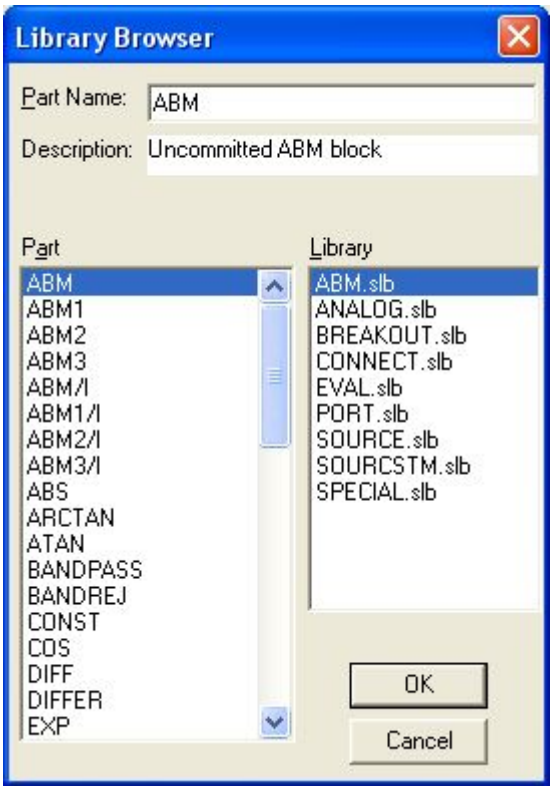


Рис. 2

Установка компонентов на наборном поле осуществляется с помощью следующих команд. В меню **Draw** выбрать команду **Get New Part**. На экране появится окно просмотра компонентов (рис. 3). Можно выбрать необходимый элемент из списка, расположенного слева в окне просмотра компонентов. Но удобнее сначала выбрать нужную библиотеку, щелкнув по кнопке Libraries.

В окне браузера библиотек выберите нужную библиотеку, откройте ее и выберите нужный компонент. Затем установите его на наборном поле с помощью команд Place или Place & Close. Щелкая мышью в разных местах наборного поля, можно разместить любое число компонентов одного вида. Режим размещения выбранного компонента отключается после нажатия на правую клавишу мыши.

Режим размещения компонентов отключается после нажатия на кнопку Close в окне просмотра компонентов (рис. 3).

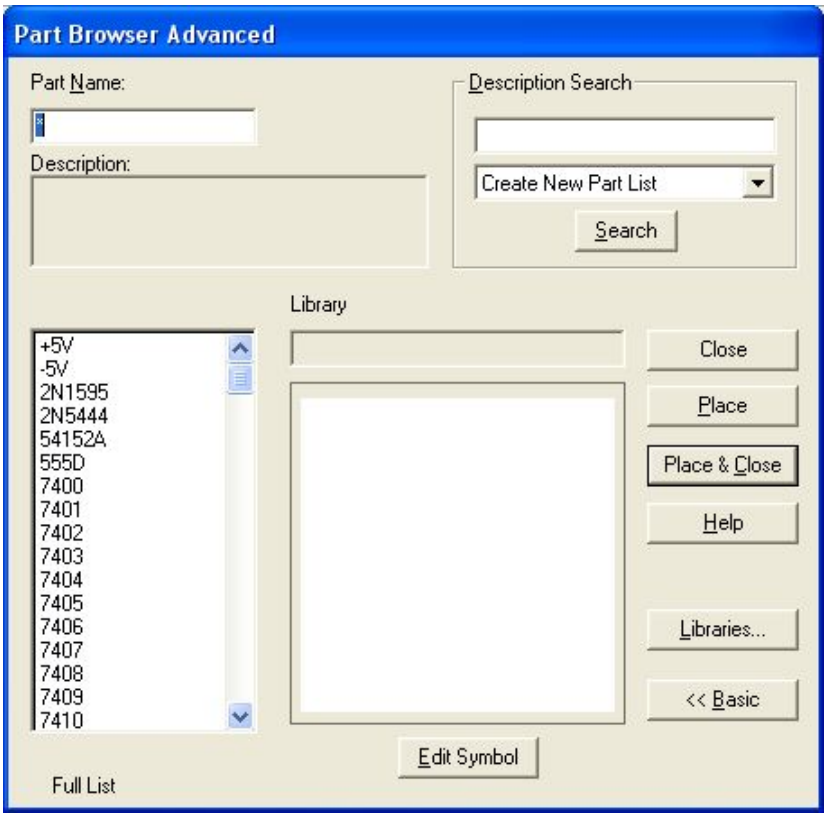


Рис. 3

Для выделения компонента, находящегося на наборном поле, нужно щелкнуть на нем левой клавишей мыши. Выделенный компонент станет красным. Все дальнейшие команды будут относиться только к нему. Выделенные компоненты можно перемещать, нажав левую клавишу мыши или поворачивать с помощью клавиш Ctrl+R.

Внимание! Каждая схема обязательно должна иметь по меньшей мере один элемент заземления из библиотеки Port.slb. В противном случае при проверке правильности схемы Pspice выдаст сообщение об ошибке. Причина в том, что Pspice использует для анализа метод узловых напряжений, и заземленный узел она рассматривает в качестве базисного.

Соединение компонентов проводниками. Режим рисования проводников, соединяющих компоненты, установленные на наборном поле, осуществляется командой **Draw/Wire** либо комбинацией клавиш Ctrl+W. После этого курсор примет форму карандаша. Для соединения двух элементов необходимо щелкнуть мышью на выводе одного из них и вести курсор до следующего вывода. Соединение появится после щелчка мышью на втором выводе. Так можно установить все соединения. Для отмены режима рисования соединений нужно нажать на правую клавишу мыши.

Соединения пересекающихся проводников обозначаются точкой. Если провести проводники, не останавливаясь в точке их пересечения, то электрическое соединение не образуется.

Установка параметров компонентов. В редакторе Schematics имена, значения и другие характеристики компонентов называются *атрибутами*. Для установки атрибутов какого-либо компонента необходимо дважды щелкнуть по его параметру (например, значению резистора). После этого откроется окно установки значения атрибута (рис. 4).

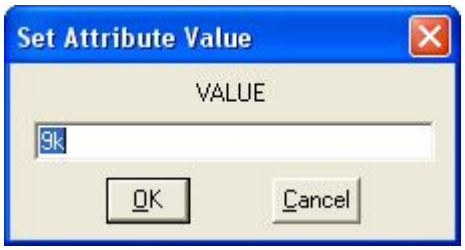


Рис. 4

В открывшемся окне необходимо установить требуемое сопротивление резистора и нажать ОК.

Многие компоненты имеют целый набор атрибутов, которые необходимо установить перед началом анализа. Такими компонентами являются, например, источники. Для того чтобы открыть окно установки атрибутов такого элемента, необходимо дважды щелкнуть мышью на его изображении. На рис. 5 в качестве примера показано окно установки атрибутов источника VPULCE из библиотеки Source.slb. Значение атрибута записывается в окне Value. После ввода требуемого значения необходимо нажать клавишу Save Attr.

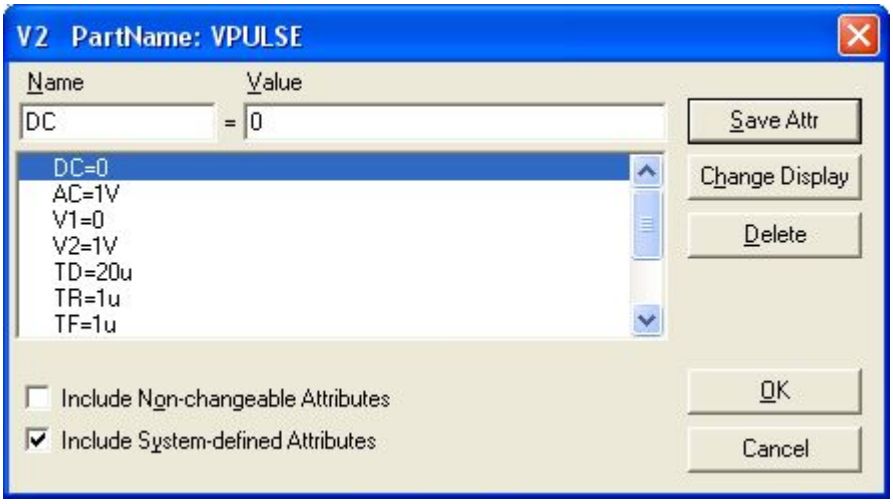


Рис. 5

3. Элементная база среды Pspice

Базовый набор элементов Pspice включает резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки, диоды, биполярные транзисторы, полевые транзисторы с управляющим *p-n* переходом и изолированным затвором, длинные линии, источники напряжения и тока различной формы. Аналоговые интегральные схемы, а также некоторые компоненты (тиристоры, некоторые виды полевых транзисторов) представляются подсхемами, параметры которых задает пользователь.

Базовый набор элементов Pspice содержит также цифровые функциональные блоки, выполняющие логические операции. Цифровые элементы могут реализовываться пользователем на основе функциональных блоков. Кроме того, существуют обширные библиотеки серийно выпускаемых цифровых компонентов.

Для удобства пользования электронные компоненты хранятся в специализированных библиотеках. Pspice. Список основных библиотек и содержащихся в них компонентов приведен в табл. 2.

4. Режимы анализа

Возможны следующие виды анализа.

1. Bias - расчет рабочей точки нелинейной резистивной цепи постоянного тока (режим большого сигнала);
2. DC - Анализ резистивных цепей постоянного тока (расчет узловых напряжений, токов и напряжений ветвей);
3. AC - Расчет частотных характеристик линейных цепей (режим малого сигнала, анализируется линейная цепь);
4. Transient - Анализ временных характеристик нелинейных цепей при действии сигналов произвольной формы (режим большого сигнала);
5. Parametric Sweep – режим вариации параметров цепи;
6. Sensitivity - Расчет характеристик чувствительности линейных цепей к вариациям параметров компонентов в режимах постоянного и переменного тока;

Рассмотрим особенности перечисленных режимов.

5. Анализ резистивных цепей постоянного тока. Режим DC Sweep

Анализ резистивных цепей выполняется для определения рабочей точки нелинейной цепи, а также в режиме вариации параметров DC Sweep. При определении рабочей точки нелинейной цепи источники напряжений и токов полагаются постоянными. Иными словами, используется только атрибут VDC или IDC, остальные атрибуты игнорируются. В этом режиме индуктивные элементы заменяются коротким замыканием, а емкостные – разрывом.

Расчет рабочей точки ведется итеративным методом Ньютона-Рафсона. На каждой итерации нелинейные компоненты заменяются линеаризованными схемами замещения, соответствующими режиму этого компонента. Таким образом, анализ нелинейной цепи сводится к многократному расчету линейных резистивных схем. Результаты анализа представляются в табличной форме.

Расчет рабочей точки выполняется автоматически при других видах анализа (AC Sweep, Transient и т.д.).

В программе SPICE используется следующий способ проверки сходимости решения при анализе нелинейной цепи.

1. Изменение токов нелинейных ветвей на двух соседних итерациях не превышает 0.1% или 1 пА ($1 \cdot 10^{-12}$ А).
2. Изменение узловых напряжений не превышает 0.1% или 1 мкВ ($1 \cdot 10^{-6}$ В).

Расчет токов и напряжений резистивных цепей является простейшим видом анализа. Он выполняется автоматически и не требует никаких настроек. Достаточно в меню **Analysis** выбрать команду **Simulate** или нажать клавишу F11. Необходимо только предварительно запомнить собранную цепь с помощью команды **Save As**. Для вывода на экран значений напряжений и токов в меню **Analysis** необходимо выбрать строку **Display Results on Schematics** и выделить опции **Enable**, **Enable Voltage Display**, **Enable Current Display** (разрешить индикацию напряжений и токов).

Режим вариации параметров цепи постоянного тока DC Sweep. Этот режим является мощным инструментом исследования характеристик резистивных цепей. Он используется для анализа цепей при изменении какого-либо параметра (напряжения или тока источника, температуры, сопротивления резистора либо параметров модели).

Установка режима DC Sweep. Для установки режима в меню Analysis открыть окно Analysis Setup (рис. 6) и щелкнуть по кнопке «DC Sweep».

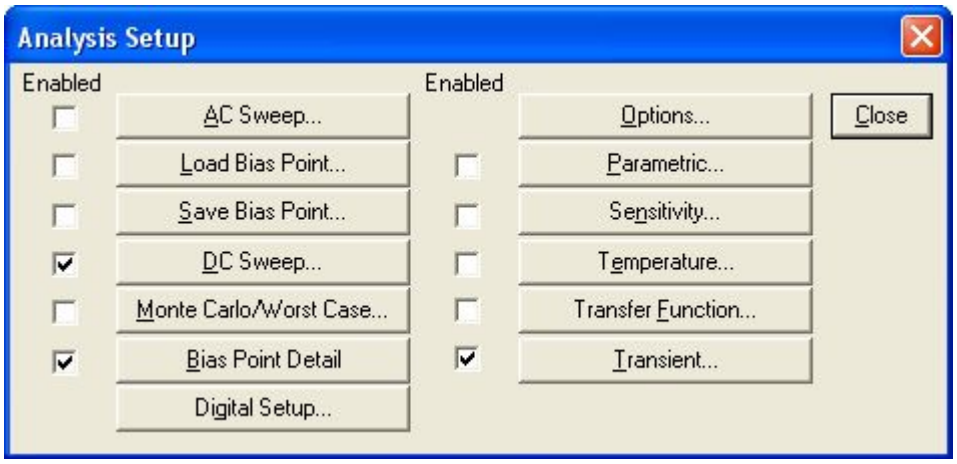


Рис. 6

Рассмотрим примеры использования режима DC Sweep.

Пример 1. Изменяемая переменная – источник постоянного напряжения.

Соберем резистивную цепь, показанную на рис. 7. Включим на входе источник постоянного напряжения.

6. Анализ частотных характеристик. Режим AC Sweep

Режим AC Sweep предназначен для расчета частотных характеристик линейных цепей.

Расчет частотных характеристик проводится в два этапа. Сначала автоматически определяется рабочая точка нелинейной резистивной цепи. Для этого выполняется анализ резистивной цепи, в которой исключены индуктивные и емкостные элементы. Затем нелинейные компоненты заменяются линеаризованными моделями с параметрами, соответствующими рабочей точке. После этого выполняется расчет частотных характеристик. Если в цепи действуют несколько синусоидальных источников, их частоты полагаются одинаковыми. Если действует только один источник, целесообразно установить атрибут AC = 1. В этом случае значение реакции будет равно значению передаточной функции.

Необходимо помнить, что в режиме AC Sweep анализируется линеаризованная схема замещения, искажения сигнала, обусловленные нелинейностью характеристик элементов, отсутствуют. Поэтому токи и напряжения достигают очень больших величин, совершенно не соответствующих реальной ситуации.

По результатам анализа программа PROBE строит частотные характеристики напряжений и токов, указанных пользователем.

Установка режима AC Sweep. Для установки режима расчета частотных характеристик в меню **Analysis** открыть окно **Analysis Setup** (рис. 8) и щелкнуть по кнопке «AC Sweep».

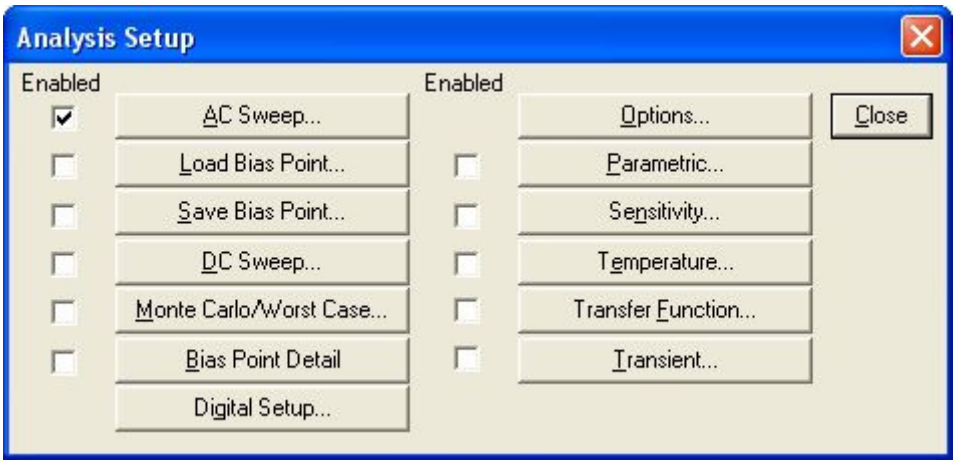


Рис. 8

В открывшемся окне установки параметров режима (рис. 9) необходимо установить следующие параметры:

Start Freq - начальная частота диапазона;

End Freq - конечная частота диапазона;

Pts/Decade – число точек на оси частот.

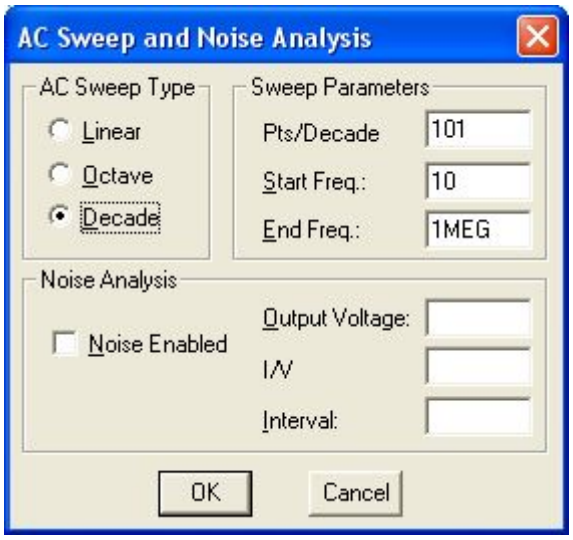


Рис. 9

Шкала частот определяется в разделе AC Sweep Type. Она может быть линейной или логарифмической. В случае логарифмической шкалы частота может изменяться октавами или декадами.

Следует помнить, что для расчета частотных характеристик анализируемая цепь должна содержать по меньшей мере один источник гармонического сигнала: источники VSIN, ISIN, VPULCE, IPULCE из библиотеки Source.slb. Атрибут AC этих источников должен быть ненулевым. Проще всего задать AC = 1. Остальные атрибуты этих источников используются в других видах анализа и при расчете частотных характеристик игнорируются. Тем не менее значения этих атрибутов должны быть заданы. Если другие виды анализа не предусматриваются, можно установить нулевые значения. В качестве примера на рис. 10 показано окно атрибутов источника синусоидального напряжения VSIN.

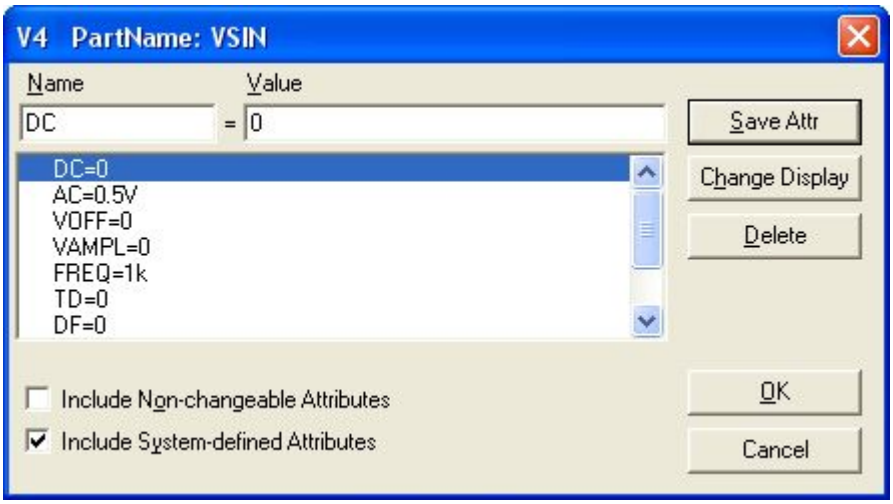


Рис. 10

Анализируемую переменную целесообразно отметить маркером на схеме. В этом случае после завершения расчета она автоматически будет выводиться на экран PROBE.

Пример 2. Расчет частотных характеристик *LC*-фильтра.

1. Соберем схему фильтра нижних частот Чебышева (рис. 11) с частотой среза 3.4 кГц и установим значения его компонентов. На входе включим импульсный источник VPULCE. Конечно, можно было бы включить источник синусоидального напряжения VSIN. Однако источник VPULCE является более универсальным. С его помощью можно анализировать не только частотные характеристики, но в дальнейшем исследовать динамические характеристики цепи при действии на входе импульсов заданной формы. На выходе схемы мы установили маркер напряжения. Поэтому после завершения анализа на экран PROBE будет выведен амплитудно-частотная характеристика фильтра.

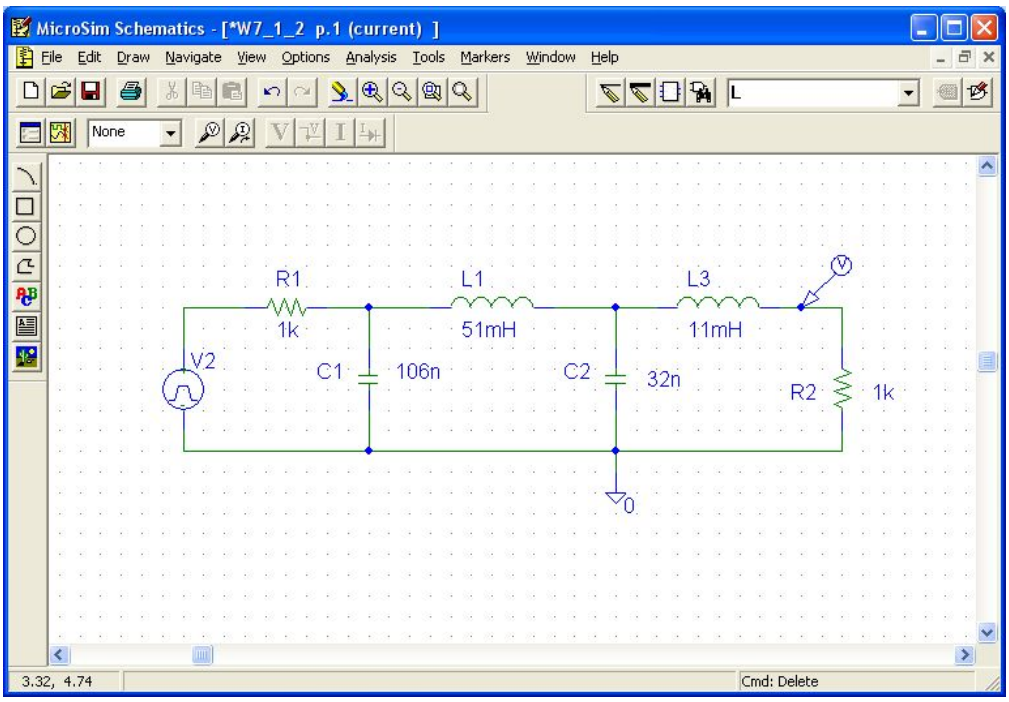


Рис. 11

2. Установим атрибут источника AC = 1. Остальные атрибуты в этом примере нам не понадобятся, и мы установим их нулевыми (рис. 12).

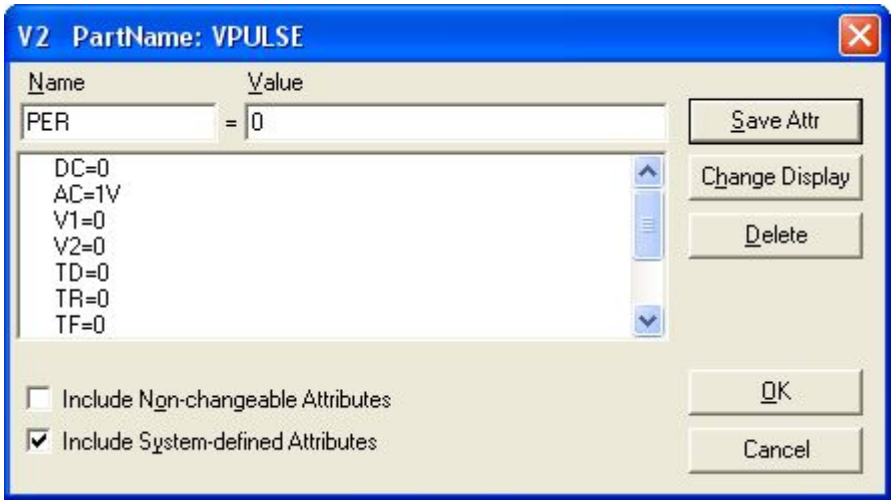


Рис. 12

3. Установим параметры режима AC_Sweep. В окне установки параметров режима определим параметры так, как показано на рис. 13

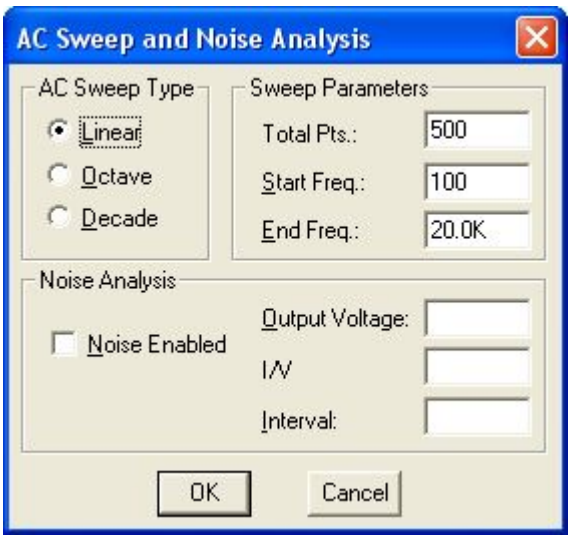


Рис. 13

4. Сохраним схему под именем Example.sch и запустим режим моделирования, нажав клавишу F11. На экране появится график амплитудно-частотной характеристики фильтра (рис. 14).

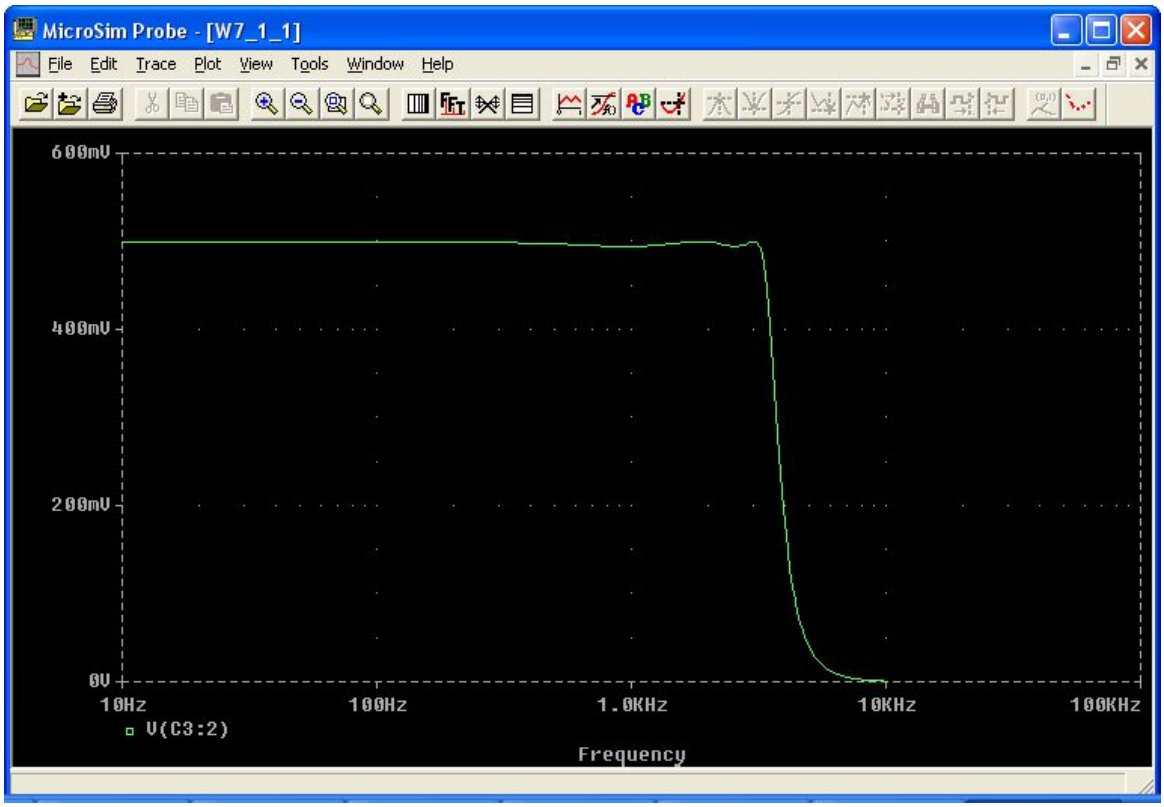


Рис. 14

7. Анализ нелинейных динамических цепей. Режим Transient

Для расчета переходных процессов используются неявные методы численного интегрирования - методы трапеций, Гира второго порядка или неявный метод Эйлера. По умолчанию используется метод трапеций. Максимальный шаг интегрирования выбирается пользователем или устанавливается автоматически.

Интегрирование начинается с момента $t = 0$. Каждый из источников, действующих в схеме, может иметь свою форму. Если источники синусоидальные, их частоты могут быть разными. В режиме большого сигнала выходная реакция учитывает искажения, обусловленные нелинейностью характеристик элементов. На каждом шаге интегрирования автоматически определяется рабочая точка – токи и напряжения нелинейных компонентов. При определении рабочей точки нелинейной цепи напряжения и токи источников сигнала полагаются равными нулю, индуктивные элементы заменяются коротким замыканием, а емкостные – разрывом. Расчет рабочей точки ведется итеративным методом Ньютона-Рафсона. На каждой итерации нелинейные компоненты заменяются линеаризованными схемами замещения, соответствующими режиму этого компонента. Кроме того, для расчета временной характеристики в каждой точке временной оси проводится анализ линеаризованной схемы. Поэтому расчет в режиме Transient занимает значительно большее время, чем в других режимах, в которых рабочая точка определяется только один раз.

Установка параметров режима Transient. Для установки режима расчета динамических режимов в меню **Analysis** открыть окно **Analysis Setup** (рис. 15) и щелкнуть по кнопке «Transient».

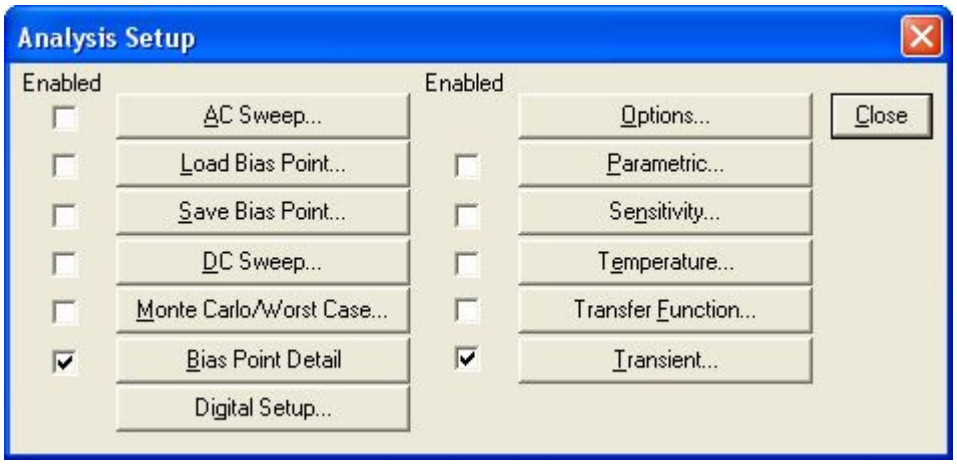


Рис. 15

В открывшемся окне установки параметров режима (рис. 16) необходимо установить следующие обязательные параметры:

Final Time – интервал моделирования, сек.

Step Seiling – максимальный шаг интегрирования, сек;

No-Print Delay – начальный временной интервал, на котором результаты расчета не выводятся на печать.

Параметры Step Ceiling и No-Print Delay являются необязательными. Если максимальный шаг интегрирования не задан, программа автоматически разобьет временной интервал на 50 шагов и выведет график временной характеристики.

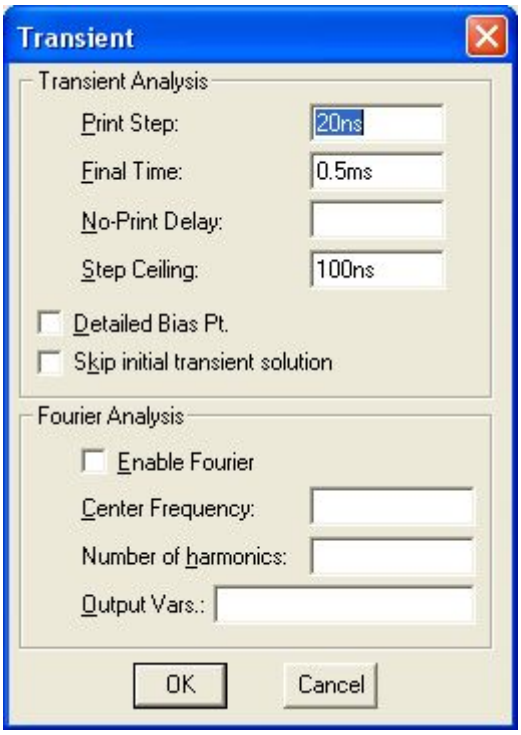


Рис. 16

8. Многовариантный анализ. Режим Parametric Sweep

Помимо рассмотренных методов анализа частотных и временных характеристик программы схемотехнического моделирования дают проектировщику еще один мощный инструмент исследования электронных схем – параметрический анализ. В этом режиме пользователь имеет возможность проводить многовариантный анализ частотных или временных характеристик. Результатом такого анализа являются семейства кривых, наглядно показывающие, как влияет изменение того или иного параметра на характеристики цепи.

На каждом шаге вариации параметров могут выполняться различные виды анализа. Варьироваться могут напряжения и токи источников, температура компонентов, параметры моделей, глобальные параметры.

Настройки режима Parametric Sweep.

Настройки режима удобно рассмотреть на примерах.

Пример 3. Необходимо выполнить многовариантный анализ *LC*-фильтра нижних частот при изменении сопротивления резистора *R1* (рис. 17).

1. Соберем схему фильтра на наборном поле и установим требуемые значения элементов (рис. 17). На входе включим источник VPULSE. Такой источник позволит провести анализ как частотных, так и временных характеристик.

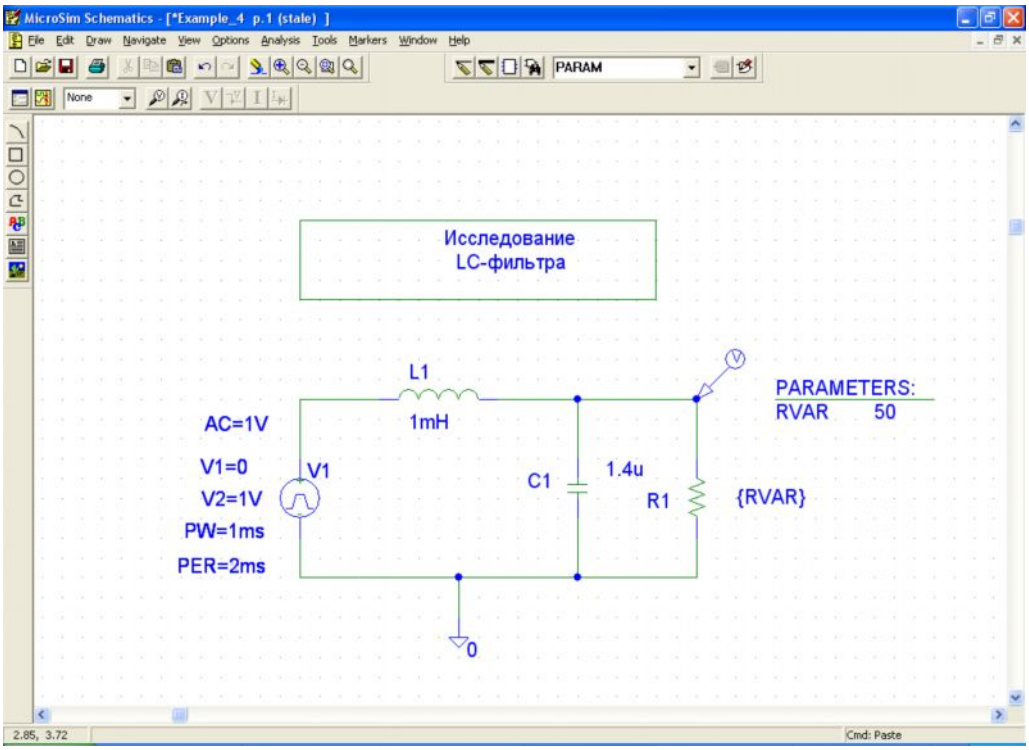


Рис. 17

2. Значение сопротивления *R* будет варьироваться в ходе моделирования. Поэтому в окне установки значений сопротивления введем имя варьируемой переменной в фигурных скобках (RVAR на рис. 18).

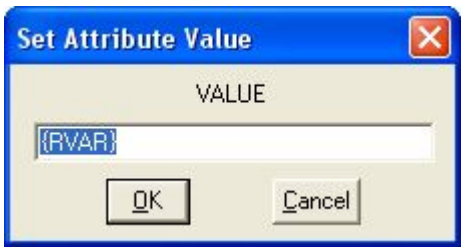
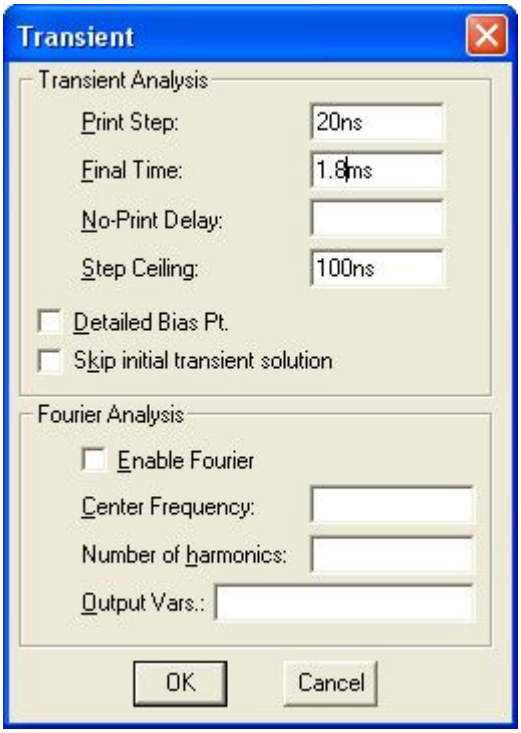
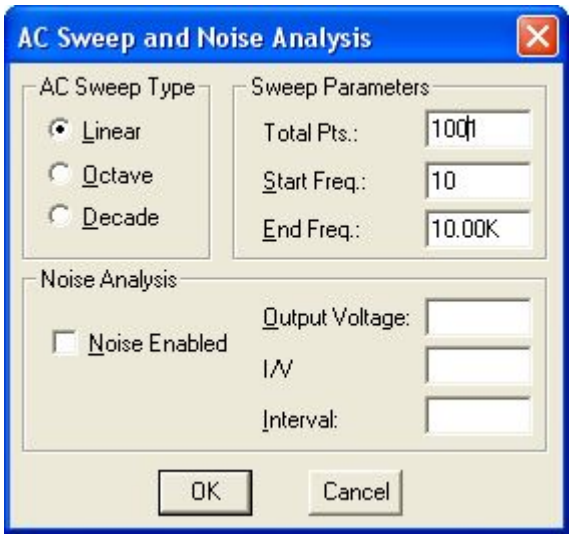


Рис. 18

3. Определим параметры режимов AC Sweep Transient так же, как мы это делали в предыдущих случаях (рис. 19 а, б).





а б

Рис. 19

4. Установим на наборном поле вспомогательный элемент PARAMETERS из библиотеки SPECIAL.slb. Откроем окно установки атрибутов этого элемента, зарегистрируем переменную RVAR как глобальный параметр и зададим ее значение. Окно установки атрибутов элемента PARAMETERS показано на рис. 20. Значение RVAR может быть любым.

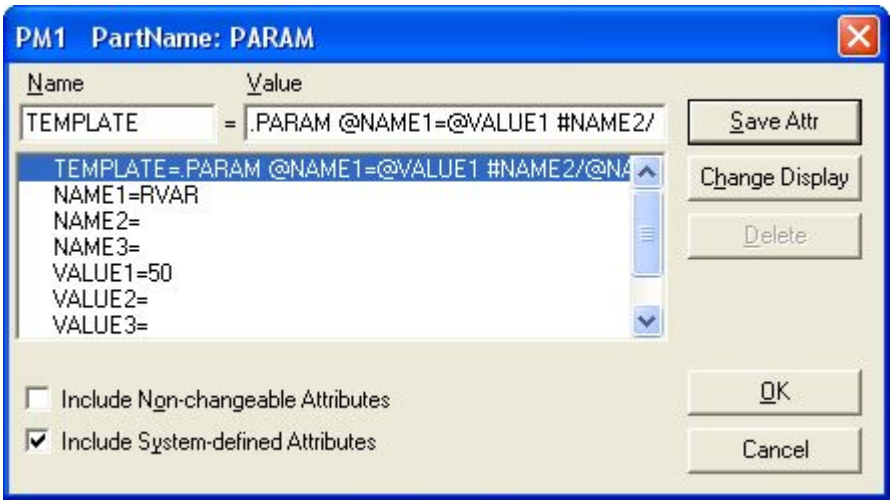


Рис. 20

5. Установим параметры режима Parametric Sweep. Для этого в окне установки параметров определим параметры режима так, как показано на рис. 21. Мы указали тип варьируемой переменной (Global Parameter), ее имя (RVAR), характер изменения (линейный). В соответствии с установленными параметрами программа должна рассчитать частотные и временные характеристики для пяти значений сопротивления резистора с шагом (increment) 10 Ом.

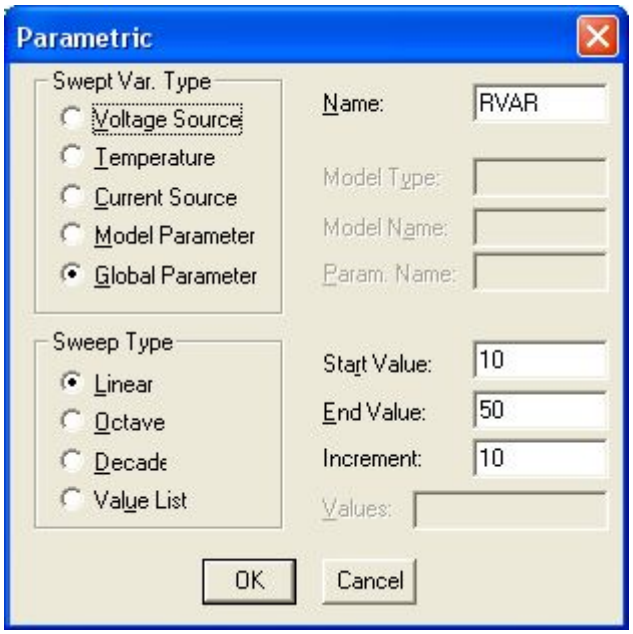


Рис. 21

Семейство амплитудно-частотных характеристик фильтра показано на рис. 22. На рис. 23 показаны временные характеристики. Проведенный анализ показывает, что с ростом сопротивления резистора увеличивается добротность цепи. При этом с ростом добротности временная характеристика приобретает колебательный характер, а амплитудно-частотная характеристика имеет всплеск на частоте 3.7 кГц.

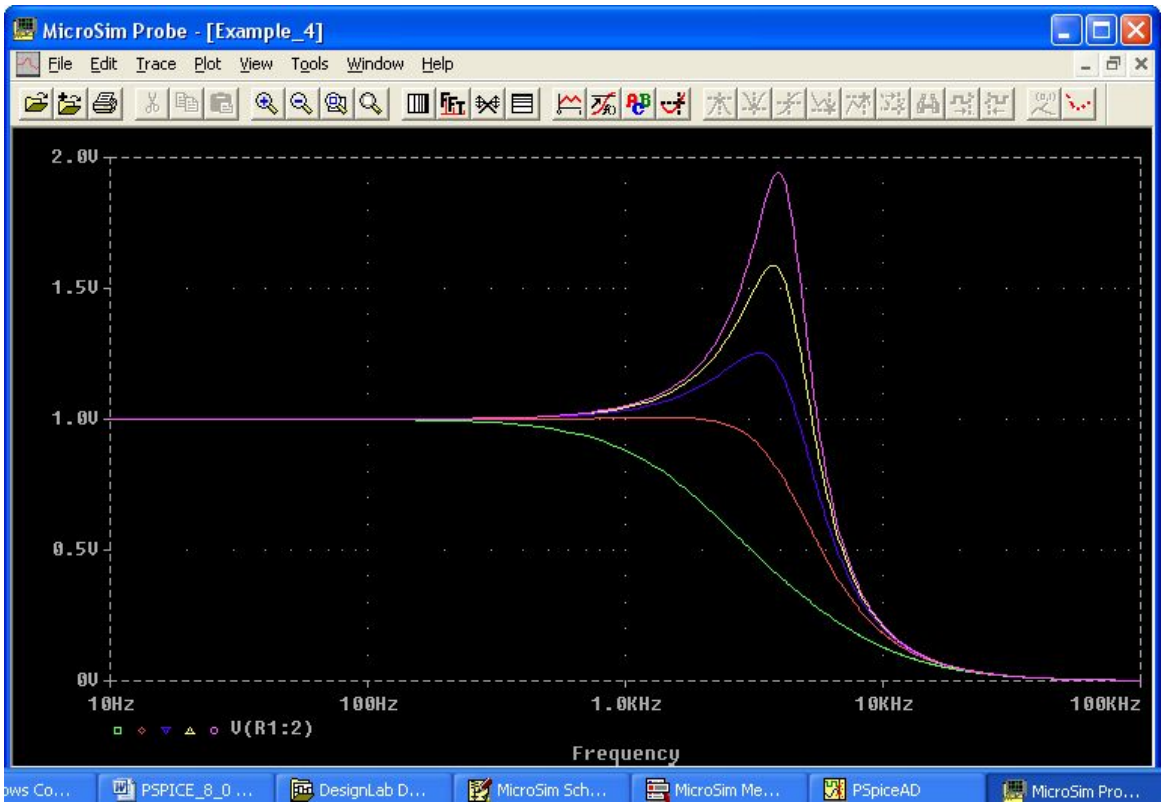

MicroSim Probe - [Example_4]
File Edit Trace Plot View Tools Window Help
2.0V
1.5V
1.0V
0.5V
0V
10Hz
100Hz
1.0KHz
10KHz
100KHz
V(R1:2)
Frequency
PSPICE_8_0 ...
DesignLab D...
MicroSim Sch...
MicroSim Me...
PSpiceAD
MicroSim Pro...

Рис. 22

MicroSim Probe - [Example_4]
File Edit Trace Plot View Tools Window Help
1.5V
1.0V
0.5V
0V
-0.5V
0s
0.2ms
0.4ms
0.6ms
0.8ms
1.0ms
1.2ms
1.4ms
1.6ms
1.8ms
V(R1:2)
Time
PSPICE_8_0 ...
DesignLab D...
MicroSim Sch...
MicroSim Me...
PSpiceAD
MicroSim Pro...

Рис. 23

10. Специальные виды анализа

Статистический анализ

До сих пор мы проводили анализ, полагая, что все компоненты электронной схемы имеют номинальные значения. Однако элементы реальных цепей всегда имеют случайные отклонения от номинальных значений. Программа Pspice позволяет моделировать характеристики электронных цепей с учетом статистического разброса параметров компонентов. В ходе одного цикла статистического анализа цепь может моделироваться несколько сотен раз. При этом каждый раз моделирование осуществляется с новым набором параметров, задаваемых случайным образом. Например, если предусмотрен графический вывод испытаний с помощью программы Probe, максимальное количество испытаний $n = 400$. На одну диаграмму Probe могут быть выведены результаты 399 испытаний. Отклонения значений элементов от номинальных задаются с помощью генератора случайных чисел. Случайное значение параметра x рассчитывается по формуле

$$x = x_{\text{ном}}\left(1 + \zeta\,\Delta\right),$$

где $x_{\text{ном}}$ – номинальное значение параметра, указанное пользователем;

Δ – относительный разброс параметра x;

ζ – центрированная случайная величина, принимающая значения на отрезке (-1, + 1).

В программе Pspice имеются генераторы случайных чисел с двумя законами распределения:

UNIFORM – равномерное распределение на отрезке (-1, + 1);

GAUSS – гауссовское распределение на отрезке (-1, + 1) с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0.25$.

По умолчанию выбирается равномерное распределение.

Статистические испытания по методу Монте-Карло могут проводиться при расчете режима по постоянному току, анализе переходных процессов или расчете частотных характеристик. Проведение статистического анализа по методу Монте-Карло позволяет определить многие важные характеристики электронных цепей. Например, по величине отклонения частотных характеристик можно судить о чувствительности цепи.

При статистическом анализе предусматривается разнообразная статистическая обработка результатов моделирования. Возможны следующие виды обработки:

- расчет максимального отклонения текущей реализации от номинальной;

- расчет максимального значения в каждой реализации;
- расчет минимального значения в каждой реализации;

11. Графический постпроцессор Probe

Результаты моделирования, полученные с помощью программы Pspice, записываются в файл с расширением .dat. Для представления результатов расчета в графической форме служит программа Probe**.** Экран программы показан на рис. 24. В верхней части окна расположено имя файла данных, на следующей строке – горизонтальное меню команд программы.

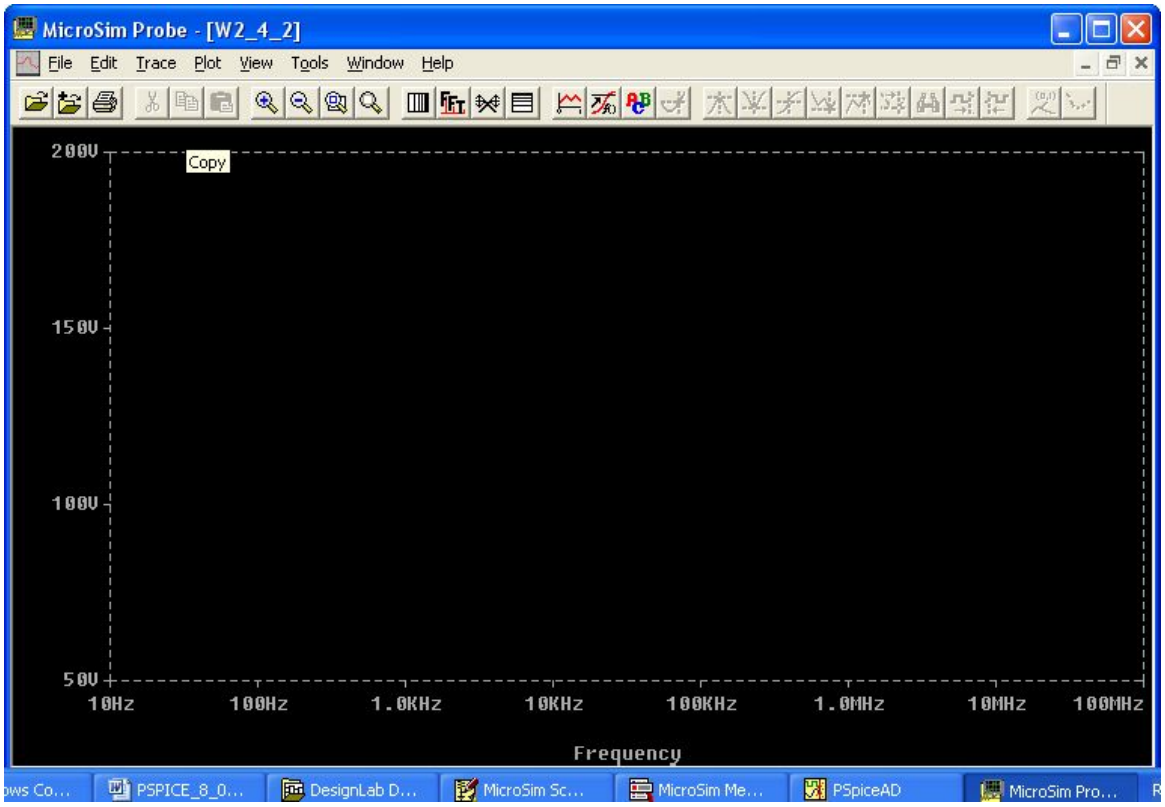


Рис. 24

При выполнении предварительной установки запуск Probe осуществляется автоматически после завершения моделирования.

Установки Probe выполняются следующим образом.

1. Откройте меню **Analysis** программы Schematics.
2. Щелкните мышью по строке **Probe Setup** и откройте окно **Probe Setup Options** (рис. 25).
3. В открывшемся окне выберите опцию **Automatically Run Probe After Simulation** (автоматически запускать Probe после моделирования).

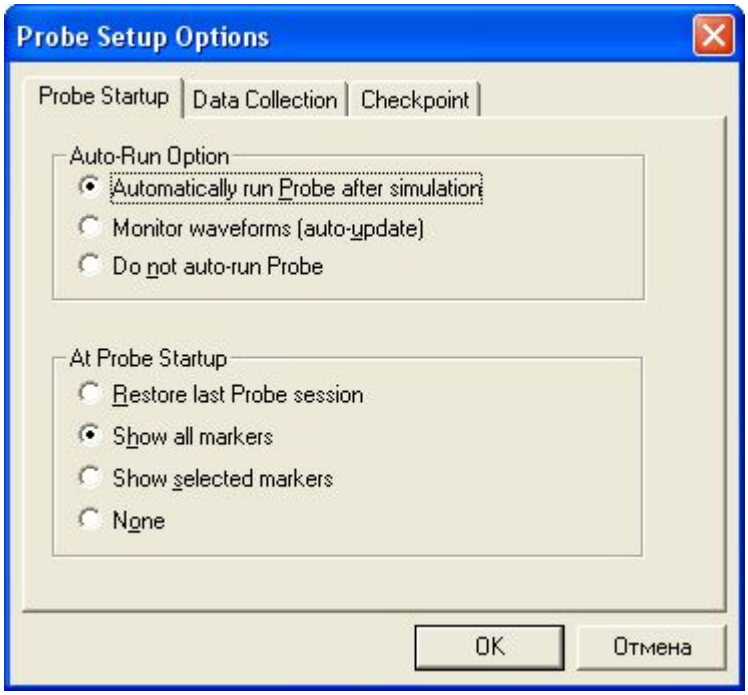


Рис. 25

На экран Probe автоматически выводятся графики переменных, отмеченных на схеме маркерами.

Если на схеме нет маркеров, экран Probe будет пустым. Для вывода нужной диаграммы необходимо:

1. Открыть меню **Trace**;
2. Выбрать опцию **Add**, после чего откроется окно **Add traces** (рис. 26);
3. Выбрать в левой части окна нужную переменную.

Имя выбранной переменной появится в списке **Trace Expression**, расположенном в нижней части окна **Add traces**. Необходимо закрыть окно **Add traces**, щелкнув кнопку **OK**. На экране появится нужная диаграмма.

Probe не только отображает результаты моделирования в виде диаграмм, но и выполняет математическую обработку результатов, включая арифметические и алгебраические преобразования, преобразование Фурье, измерение параметров импульсов и т.д. Список математических операций, которые может выполнять Probe, приведен в правой части окна выбора переменных (рис. 26).

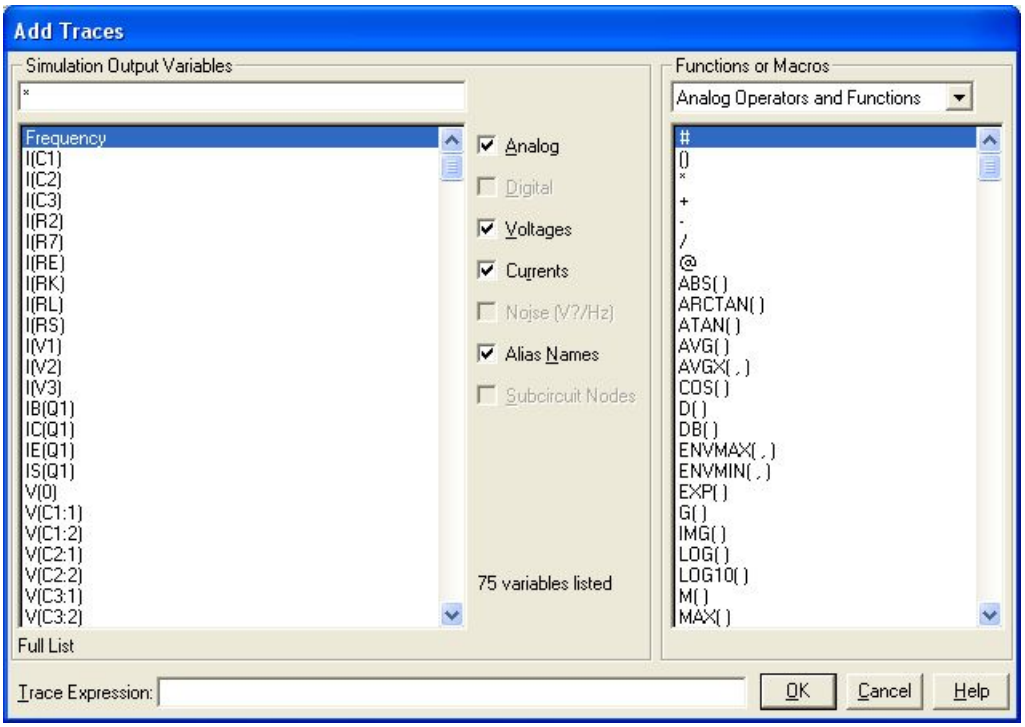


Рис. 26

12. Масштабирование координатных осей

Масштабирование координатной оси Y. По умолчанию действует автоматическая установка масштаба. Для ручной установки необходимо открыть меню **Plot** и выбрать опцию **Y axis Setting**. В окне установок по оси Y (рис. 27) выберите «**User Defined**», установите диапазон изменения переменных и масштаб (линейный или логарифмический).

Использование курсоров. Координаты графиков, построенных Probe, можно считывать с помощью двух курсоров. Для активизации первого курсора нужно щелкнуть по кнопке {}. Второй курсор включается после нажатия на правую клавишу мыши.

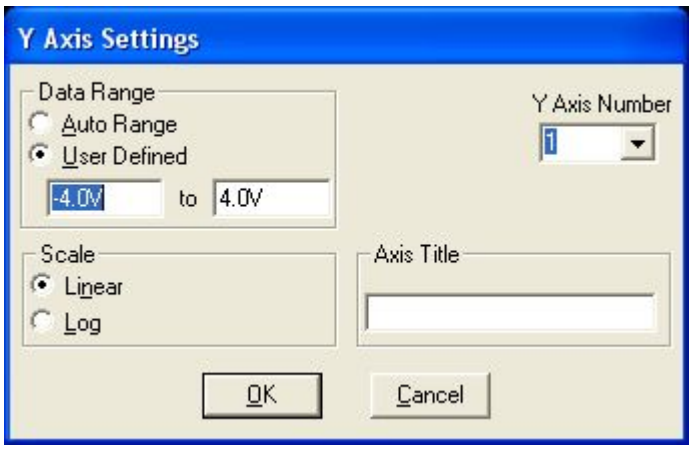


Рис. 27

Масштабирование координатной оси X. Во многих случаях необходима только часть диаграммы, построенной Probe. Для изменения масштаба по оси x в меню **Plot** выбрать опцию **X axis Setting**. В открывшемся окне (рис. 28) выберите «**User Defined**» и установите диапазон изменения переменных по оси x.

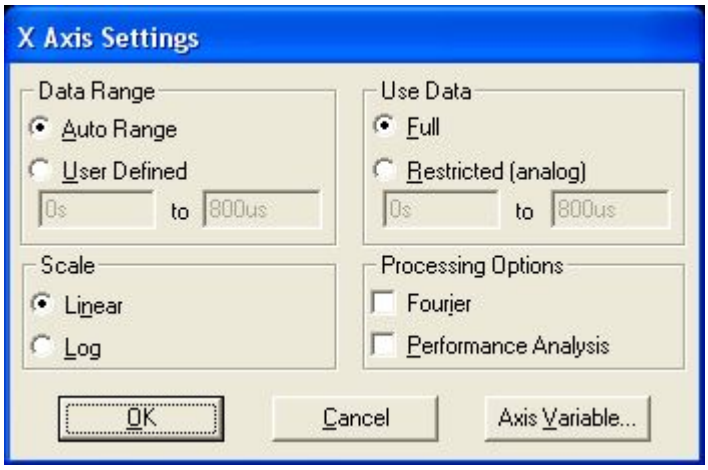


Рис. 28

Увеличение фрагментов диаграмм. Probe позволяет масштабировать выбранные участки диаграмм одновременно по обеим осям координат. Для этого в меню **View** необходимо выбрать опцию **Area.** Курсор примет форму креста. Необходимо подвести курсор к правому верхнему углу увеличиваемого фрагмента диаграммы и нажать левую клавишу мыши. После этого переместите курсор в правый нижний угол фрагмента, не отпуская клавишу мыши. В правом нижнем углу отпустите клавишу. Выбранный фрагмент диаграммы заимеет весь экран Probe.