

Эта директива используется для подключения библиотеки моделей или под-схем. При запуске моделирования из библиотеки считываются и помещаются в память машины только те модели или подсхемы, на которые были ссылки в описании схемы.

Имя файла может быть задано в абсолютном виде (диск:\путь\имя файла) или относительно каталога, в который установлена программа LTspice (по умолчанию программа устанавливается в каталог C:\Program Files\LTC\LTspiceIV). В последнем случае указанный файл сначала ищется в каталоге ..\lib\cmp, затем в ..\lib\sub, и только после этого в каталоге, который содержит описание схемы.

Необходимо явно указывать расширение файла. Например, если требуется подключить библиотеку myfile.lib, то следует указать .lib myfile.lib, а не .lib myfile.

Возможен вариант синтаксиса, позволяющий скачивать требуемую библиотеку из Интернета:

```
.LIB http://www.company.com/models/library.lib
```

В этом случае файл library.lib будет скачан по указанной ссылке, размещен в каталоге описания и подключен.

ПРИМЕЧАНИЕ

К сожалению, LTspice не анализирует ошибок скачивания и поэтому могут возникать неожиданные ситуации, когда программа попытается использовать в качестве библиотечного файла сообщение об ошибке, которое будет передано сервером в случае отсутствия указанного файла или "битой" ссылки.

4.12.1. Зашифрованные библиотеки

С целью защиты авторских прав в LTspice предусмотрена возможность создания и чтения специальных зашифрованных библиотек. Это позволяет многим пользователям использовать библиотеку, не имея доступа к ее содержанию. Разумеется, подобная форма сокрытия содержимого библиотеки не может считаться абсолютно надежной и не гарантирует от взлома при помощи специализированного программного обеспечения.

Для создания зашифрованной библиотеки необходимо выполнить следующую последовательность действий:

1. Сделать резервную копию шифруемой библиотеки, т. к. указанная библиотека будет удалена и заменена шифрованной версией.
2. В режиме командной строки набрать:

```
scad3.exe -encrypt <имя файла библиотеки>.
```

Процесс шифрования может занять несколько минут. По окончании будет получен зашифрованный ASCII-файл. При необходимости можно добавить в комментариях к файлу свое сообщение об авторских правах, оставив без изменения первые девять строк оригинальных комментариев, а также завершающую строку * Begin:. Каждая строка вашего сообщения должна начинаться с символа "*".

4.13. **LOADBIAS** — загрузить из файла состояние схемы

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Текстовый синтаксис: `.LOADBIAS <имя файла>.`

Директива `.LOADBIAS` используется совместно с директивой `.SAVEBIAS`, с помощью которой узловые потенциалы, вычисленные в результате моделирования, сохраняются в файл. Совместное использование директив `.SAVEBIAS` и `.LOADBIAS`, например, позволяет сократить общее время моделирования, исключив из него начальный участок.

4.14. **MEASURE** — измерить при определенных пользователем условиях

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Существуют два основных типа директивы `.MEASURE`. Один тип обращается к отдельной точке на абсциссе (независимой переменной, откладываемой по горизонтальной оси, т. е. к времени, в случае TRAN-анализа), а другой тип — к области абсциссы.

4.14.1. Первый тип директивы **.MEASURE**

Первый тип, который обращается к одной точке на абсциссе, используется для того, чтобы условно или безусловно выводить значение данных или выражение, соответствующее этой точке. Этот тип использует следующий синтаксис:

```
.MEAS[SURE] [AC|DC|OP|TRAN|TF|NOISE] <имя>
+ [< FIND|DERIV|PARAM > <выражение >]
+ [WHEN <выражение> | AT= <выражение>]]
+ [TD = <значение1>] [<RISE|FALL|CROSS> = [<счетчик1 > |LAST]]
```

Если указан конкретный тип анализа, то директива будет использоваться только при проведении этого анализа и игнорироваться при других типах анализа:

- ☐ AC — расчет частотных характеристик;
- ☐ DC — расчет режима по постоянному току;
- ☐ OP — поиск рабочей точки по постоянному току;
- ☐ TRAN — расчет переходного процесса;
- ☐ TF — расчет малосигнальной передаточной функции по постоянному току;
- ☐ NOISE — расчет внутреннего шума.

Затем, в обязательном порядке, необходимо присвоить <имя> выводимому значению. Это имя может использоваться в других директивах .MEAS.

Далее следует определиться с тем, что надо вывести:

- ☐ FIND — значение соответствующего выражения, использующего данные моделирования;
- ☐ DERIV — производную соответствующего выражения, использующего данные моделирования;
- ☐ PARAM — значение выражения, использующего результаты других директив .MEAS, но не данные моделирования.

Определившись с выходными данными, нужно определиться с моментом выборки данных:

- ☐ WHEN — данные выбираются в случае выполнения условного выражения;
- ☐ AT — данные выбираются в случае достижения определенной точки на абсциссе;
- ☐ TD — задержка выборки данных.

Кроме этого, можно оговорить дополнительные условия события выборки:

- RISE — событие выборки возникает при достижении определенной точки во время нарастания выводимого значения;
- FALL — событие выборки возникает при достижении определенной точки во время спада выводимого значения;
- CROSS — событие выборки возникает при достижении определенной точки.

Для перечисленных выше событий можно установить <счетчик> события выборки. Если счетчик не установлен, то выводится значение, соответствующее первому подходящему событию. Если требуется вывести значение для самого последнего события, то необходимо указать флаг LAST.

Ниже приведены примеры использования директивы .MEAS, которые обращаются к отдельной точке на абсциссе:

```
.MEAS TRAN res1 FIND V(n006) AT=5m
```

Данная директива обозначается как `res1` и выводит в файл отчета (с расширением `log`) значение напряжения `V(n006)` в момент времени $t = 5$ мс.

```
.MEAS TRAN res2 FIND V(n005)*I(V1) WHEN V(n002)=3*V(n003)
```

Данная директива обозначается как `res2` и выводит в файл отчета значение выражения `V(n005)*I(V1)`, когда в первый раз будет выполнено условие `V(n002)=3*V(n003)`.

```
.MEAS TRAN res3 PARAM res1*res2
```

Данная директива обозначается как `res3` и выводит в файл отчета значение выражения `res1*res2`. Эта форма полезна для вывода значения выражения, использующего результаты других директив .MEAS, но не предназначена для вывода значения выражения, содержащего данные моделирования.

Обратите внимание, что в приведенных ранее примерах выводимое значение основано на данных ординаты (зависимая переменная). Если выводимое значение не определено, то директива .MEAS выводит точку абсциссы, которая соответствует результатам измерения:

```
.MEAS TRAN res4 WHEN V(n003)=3*V(n004)
```

Данная директива обозначается как `res4` и выводит в файл отчета значение абсциссы, соответствующее первому моменту возникновения события `V(n003) = 3*V(n004)`.

В случае АС-анализа, используется амплитудное значение условного выражения, как это показано в этом примере:

```
.MEAS AC res5 WHEN V(n010)=1/sqrt(2)
```

Данная директива обозначается как `res5` и выводит в лог-файл значение частоты, соответствующее моменту, когда амплитуда переменного напряжения `V(n010)` была равна 0.7071 В.

4.14.2. Второй тип директивы **.MEASURE**

Второй тип директивы `.MEAS` обращается к области абсциссы и использует следующий синтаксис:

```
.MEAS [AC|DC|OP|TRAN|TF|NOISE] <имя>
+ [<AVG|MAX|MIN|PP|RMS|INTEG> <выражение>]
+ [TRIG <переменная1> [[VAL]=<порог1>] [TD=<значение1>]
+ [<RISE|FALL|CROSS>=<счетчик1>]
+ [TARG <переменная2> [[VAL]=<порог2>] [TD=<значение2>]
+ [<RISE|FALL|CROSS>=<счетчик2>]
```

Как и для первого типа, если указан конкретный тип анализа, то директива будет использоваться только при проведении этого анализа и игнорироваться при других типах анализов:

- ☐ AC — расчет частотных характеристик;
- ☐ DC — расчет режима по постоянному току;
- ☐ OP — поиск рабочей точки по постоянному току;
- ☐ TRAN — расчет переходного процесса;
- ☐ TF — расчет малосигнальной передаточной функции по постоянному току;
- ☐ NOISE — расчет внутреннего шума.

Затем, в обязательном порядке, необходимо присвоить `<имя>` выводимому значению. Это имя может использоваться в других директивах `.MEAS`.

Далее следует определиться с тем, что надо вывести:

- ☐ AVG — среднее значение выражения;
- ☐ MAX — максимальное значение выражения;
- ☐ MIN — минимальное значение выражения;
- ☐ PP — расстояние от минимального до максимального значения выражения;
- ☐ RMS — среднеквадратичное (действующее) значение выражения;
- ☐ INTEG — интеграл выражения.

Начало и конец исследуемой области абсциссы определяется точками TRIG и TARG соответственно. Если точка TRIG не определена, то по умолчанию она приравнивается моменту начала моделирования. Если не определена точка TARG, то по умолчанию она приравнивается моменту окончания моделирования. Если не определены точки начала и конца исследуемой области, то директива .MEAS работает с полным диапазоном данных.

Для начальной и конечной точек области абсциссы (TRIG и TARG) необходимо определить имя переменной запуска (это может быть напряжение узла или ток ветви), а также порог запуска VAL. Далее, с помощью параметра TD можно установить задержку выборки. Кроме этого, можно оговорить дополнительные условия события выборки:

- ❑ RISE — событие запуска возникает при достижении порога во время нарастания переменной запуска;
- ❑ FALL — событие запуска возникает при достижении порога во время спада переменной запуска;
- ❑ CROSS — событие запуска возникает при достижении порога переменной запуска.

Для перечисленных выше событий можно установить <счетчик> события запуска. Если счетчик не установлен, то запуск будет осуществлен первым подходящим событием.

Если операция измерения не определена, то в качестве результата директива .MEAS выведет расстояние между точками TRIG и TARG абсциссы.

Ниже приведен пример директивы .MEAS второго типа:

```
.MEAS TRAN res6 AVG V(n001) TRIG V(n005) VAL=1.5 TD=1.1u FALL=1  
+ TARG V(n003) VAL=1.5 TD=1.1u FALL=1
```

Данная директива обозначается как res6 и выводит в файл отчета (с расширением log) среднее значение V(n001) на участке абсциссы, начало которого задержано на 1.1 мкс относительно первого падения напряжения V(n005) ниже порога 1.5 В, а конец задержан на 1.1 мкс относительно первого падения напряжения V(n003) ниже порога 1.5 В.

Ниже приведен пример, где одна директива .MEAS использует результат другой директивы .MEAS:

```
.MEAS AC tmp MAX mag(V(n003))  
.MEAS AC bw TRIG mag(V(n003))=tmp/sqrt(2) RISE=1 TARG  
mag(V(n003))=tmp/sqrt(2) FALL=LAST
```

Здесь первая директива находит максимальное значение амплитуды напряжения $V(n003)$ и обозначает его как t_{mp} . Вторая директива обозначается как bw и выводит в файл отчета диапазон частот, в котором обеспечивается затухание менее 3 дБ относительно амплитудного значения t_{mp} , полученного первой директивой.

Директива `.MEAS` выполняется после завершения симуляции. Это позволяет записать скрипт директивы `.MEAS` в файл с расширением `meas` и выполнить его на полученных данных. Для этого надо щелкнуть левой кнопкой мышки в поле окна плоттера, чтобы сделать его активным, и активизировать команду меню **File** (Файл) | **Execute .MEAS Script** (Выполнить скрипт `.MEAS`). В результате появится окно **Execute .MEASURE statements from file** (Выполнение утверждений `.MEASURE` из файла), в котором нужно выбрать и открыть требуемый скрипт-файл. Так как результаты симуляции хранятся в сжатом виде, то точность выходного результата директивы `.MEAS` определяется степенью сжатия данных анализируемой кривой. Меняя настройки на вкладке **Compression** (Сжатие) панели **Control Panel** (Панель управления), можно регулировать степень сжатия данных.

4.15. *MODEL* — описание модели схемного элемента

Порой схемные элементы, такие как диоды, транзисторы, ключи, линии передачи и т. п., имеют множество параметров, которые описывают их свойства. В этом случае для уменьшения объема описания схемы имеет смысл при помощи директивы `.MODEL` группировать эти параметры в одном месте и по мере необходимости ссылаться на них.

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Текстовый синтаксис: `.MODEL <имя модели> <тип> [(перечень параметров)]`.

Само собой разумеется, что имя модели должно быть уникальным для различных типов схемных элементов. Например, диод и транзистор не могут иметь одно и то же имя.

Перечень параметров зависит от типа модели. Список типов моделей перечислен в табл. 4.3.

Таблица 4.3. Список типов моделей симулятора LTspice

Тип	Связанный схемный элемент
D	Диод
CSW	Ключ, управляемый током
LTRA	Линия передачи с потерями
NJF	N-канальный полевой транзистор с управляющим р-n-переходом
NMF	N-канальный MESFET-транзистор
NMOS	N-канальный полевой транзистор с изолированным затвором
NPN	NPN биполярный транзистор
PJF	P-канальный полевой транзистор с управляющим р-n-переходом
PMF	P-канальный MESFET-транзистор
PMOS	P-канальный полевой транзистор с изолированным затвором
PNP	PNP биполярный транзистор
SW	Ключ, управляемый напряжением
URC	Однородная RC-линия
VDMOS	MOSFET-транзистор с двухдиффузионной вертикальной структурой

Подробное описание моделей схемных элементов можно найти в *главе 3* этой книги.

4.16. NET — вычислить параметры четырехполюсника

Директива используется в течение малосигнального АС-анализа для расчета входной и выходной проводимости, сопротивления, а также Y, Z, H и S параметров четырехполюсника, имеющего два входных и два выходных выво-

да. С помощью этой же директивы можно рассчитать проводимость и сопротивление двухполюсника, имеющего два входных вывода.

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Текстовый синтаксис: `.NET [V(узел[,узел 2])|I(Rout)] <Vin|Iin> [Rin=<значение>] [Rout=<значение>].`

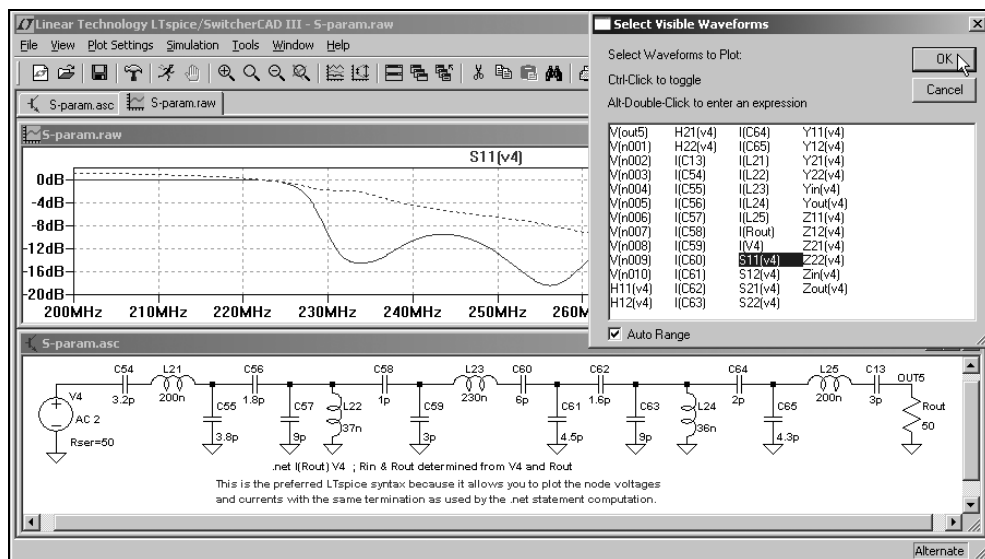


Рис. 4.12. Определение параметров полосового фильтра как четырехполюсника

На вход двухполюсника или четырехполюсника подается сигнал от независимого источника напряжения V_{in} или независимого источника тока I_{in} . Если исследуется четырехполюсник, то необходимо указать точки приложения сигнала выходного напряжения (напряжение узла $V(\text{узел})$ или напряжение между узлами $V(\text{узел}, \text{узел } 2)$) или сопротивление для выходного токового сигнала $I(Rout)$. Вход двухполюсника, а также вход и выход четырехполюсника нагружены терминальными резисторами R_{in} и R_{out} . Если величины этих резисторов не указаны, то по умолчанию считается, что они равны 1 Ом. Исключением является случай, когда указано внутреннее сопротивление R_{SER} независимого источника напряжения, подключенного к входу, и/или величина резистора, подключенного к выходу четырехполюсника. В этих случаях

указанные сопротивления выполняют роль терминальных резисторов. Если же значения R_{in} и R_{out} явно указаны в строке директивы, то именно эти значения используются во время анализа параметров двухполюсника или четырехполюсника. Что касается самого АС-анализа, то там будут использоваться внутренние сопротивления источника и нагрузки. То есть параметры директивы `.NET` не оказывают влияния на АС-анализ.

В качестве примера можно рассмотреть схему **S-param.asc** (рис. 4.12), которая по умолчанию расположена в каталоге `C:\Program Files\LTC\LTspiceIV\examples\Educational`.

```
.NET I(Rout) V4
```

В примере в качестве источника входного сигнала выбран независимый источник тока $V4$, а в качестве нагрузки — резистор R_{out} . С помощью параметра $R_{ser}=50$ источника напряжения $V4$ установлено желаемое сопротивление источника сигнала, а с помощью резистора R_{out} — желаемое сопротивление нагрузки четырехполюсника. Параметры четырехполюсника вместе с результатами АС-анализа расположены в окне **Select Visible Waveforms** (Выбор видимости диаграмм), которое можно вызвать командой меню **Plot Setting** (Настройка плоттера) | **Visible Traces** (Видимость диаграмм).

4.17. NODESET — начальная инициализация узловых потенциалов

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Текстовый синтаксис: `.NODESET <V(узел1)=напряжение>
[V(узел2)=<напряжение> [...]]`.

Директива `.NODESET` назначает начальное значение узловых потенциалов на нулевой итерации при расчете режима по постоянному току. Если заданные значения узловых потенциалов близки к точному решению, то время расчета ускорится, что уменьшит общее время моделирования. Директива также может оказаться полезной, если схема имеет множество стабильных состояний по постоянному току, как например триггер. В этом случае директиву `.NODESET` можно использовать, чтобы сразу ввести схему в одно из устойчивых состояний.

4.18. NOISE — выполнить анализ шума

Текстовый синтаксис: `.NOISE V(<узел>[,узел 2]) <источник>`
`<ОСТ,DEC,LIN> <число точек> <начальная частота> <конечная частота>.`

С помощью этой директивы делается частотный анализ, учитывающий тепловые (джонсоновские), дробовые и фликкер-шумы. Несмотря на то, что анализ частотный, директивы `.АС` не требуется.

Источниками шума являются резисторы и полупроводниковые приборы. Шумы от отдельных источников суммируются на выходе по среднеквадратичному закону. Рассчитывается коэффициент усиления `GAIN` от входного источника на выход и из этого коэффициента и общего шума на выходе `V(onoise)` рассчитывается эквивалентный входной шум `V(inoise)`. Уровень выходного шума нормализован относительно квадратного корня частотного диапазона шума и измеряется в $B/\sqrt{Гц}$.

Выходные узлы определяются с помощью конструкции `V(<узел>[,узел 2])`. Если выходное напряжение прикладывается между узлами, то через запятую необходимо ввести имена обоих узлов `V(узел,узел 2)`. Если выходным является только один узел, то необходимо ввести имя только этого узла `V(узел)`. Обязательный параметр `<источник>` определяет независимый источник, который хоть и не является генератором шума, но позволяет показать симулятору входные узлы, для которых рассчитывается эквивалентный входной шум. Кроме этого, если выбран независимый источник напряжения, то рассчитывается эквивалентный входной шум напряжения, если независимый источник тока, то эквивалентный входной шум тока. С помощью обязательных параметров `<начальная частота>` и `<конечная частота>` соответственно определяются нижняя и верхняя частоты исследуемого частотного диапазона. Кроме границ частотного диапазона необходимо указать `<число точек>` частотной характеристики. Распределение точек определяется при помощи ключевых слов `ОСТ`, `DEC` или `LIN` (табл. 4.4).

Таблица 4.4. Распределение точек частотной характеристики шума

Ключевое слово	Число точек	Примечание
ОСТ	Число точек на октаву	Логарифмический масштаб
DEC	Число точек на декаду	Логарифмический масштаб

Таблица 4.4 (окончание)

Ключевое слово	Число точек	Примечание
LIN	Общее количество линейно размещенных точек между нижней и верхней частотой исследуемого диапазона	

В качестве примера можно рассмотреть схему NoiseFigure.asc, которая по умолчанию расположена в каталоге C:\Program Files\LTC\LTspiceIV\examples\Educational.

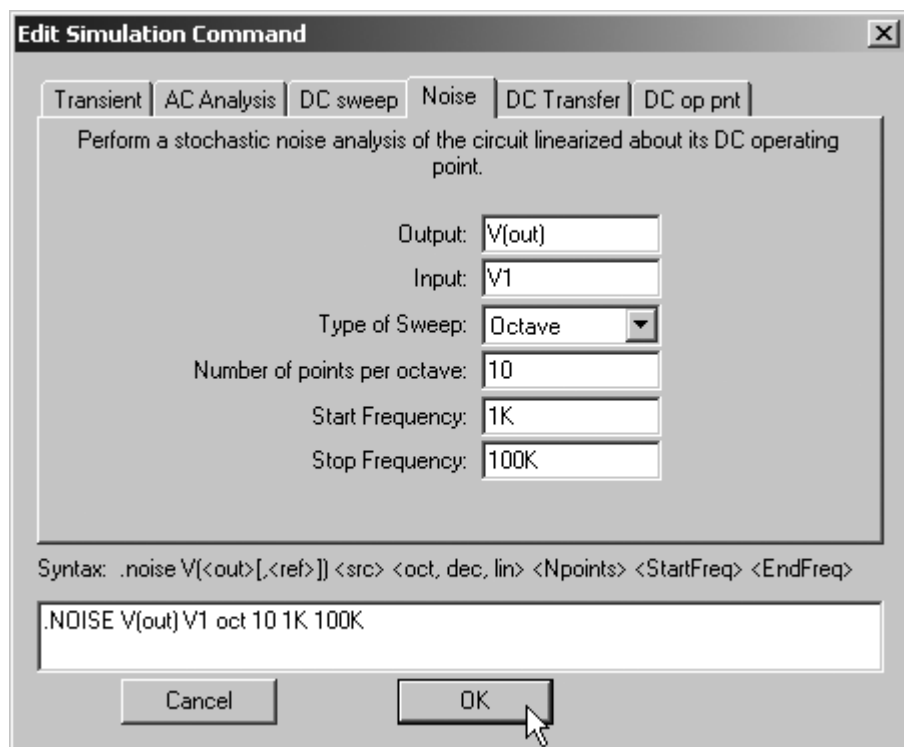


Рис. 4.13. Редактирование директивы .NOISE

В отличие от других директив, которые размещаются на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изобраа-

женного на рис. 4.1, для настройки и размещения директивы `.NOISE` можно использовать окно **Edit Simulation Command** (Редактирование команды моделирования), изображенное на рис. 4.13, которое вызывается командой меню **Simulate** (Моделирование) | **Edit Simulation Cmd** (Редактировать команду моделирования).

Для настройки анализа шумов выбираем вкладку **Noise** (Шум).

В поле **Output** (Выход) вводим имя выходного узла. Если выходным является только один узел, то в этом поле вводится его имя. Если выходное напряжение прикладывается между узлами, то в поле, через запятую, нужно указать имена обоих узлов.


В поле **Input** (Вход) необходимо указать имя независимого источника, подключенного к входу анализируемого участка схемы.

В поле **Type of Sweep** (Тип развертки) необходимо выбрать один из вариантов распределения точек частотной характеристики шума, которые указаны в табл. 4.4. Если требуется определить шумовые характеристики для одной или нескольких частот, то можно выбрать не учтенное в табл. 4.4 распределение частот **LIST** (Список).

Название следующего ниже поля зависит от типа распределения точек частотной характеристики шума и соответствует принципу, заложенному в табл. 4.4. Согласно этому принципу, если выбрано распределение **Octave** (Октава), то поле называется **Number of points per octave** (Число точек на октаву) и позволяет выбрать количество точек частотной характеристики в пределах одной октавы.

В поле **Start Frequency** (Начальная частота) вписываем нижнюю, а в поле **Stop Frequency** (Конечная частота) верхнюю частоты исследуемого частотного диапазона.

Одновременно с заполнением информационных полей в нижнем поле **Syntax** (Синтакс) формируется строка директивы `.NOISE V(out) V1 oct 10 1K 100K`. Заполнив все поля, щелкнем по кнопке **OK** и поместим директиву в схему модели. Далее, воспользовавшись командой меню **Simulate** (Моделирование) |

Run (Запустить) или щелкнув по иконке  на панели инструментов, запустим выполнение анализа шума. После окончания симуляции будет получено окно, изображенное на рис. 4.14.

В окне плоттера можно построить график шумового вклада каждого элемента, приведенный к выходу. При необходимости можно привести этот шум к

входу, разделив его на коэффициент усиления **GAIN**. Требуемый график выбирается в окне **Select Visible Waveforms** (Выбор видимости диаграмм), которое можно вызвать, активизируя команду меню **Plot Setting** (Настройки плоттера) | **Visible Traces** (Видимость диаграмм).

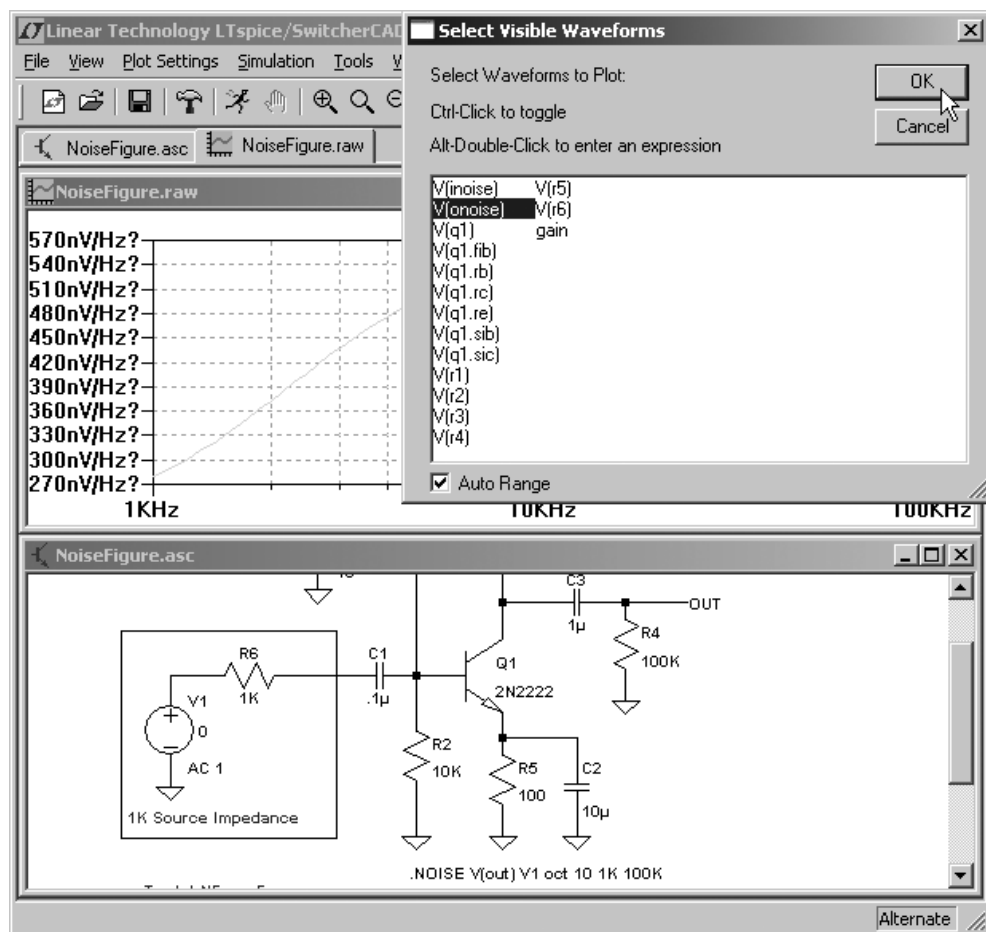


Рис. 4.14. Отображение результатов анализа шума

Чтобы найти среднеквадратичное значение шума в выбранном частотном диапазоне, необходимо нажать клавишу <Ctrl> и затем щелкнуть левой кнопкой мышки по названию соответствующего графика.

4.19. ОР — найти рабочую точку по постоянному току

Позволяет рассчитать режим по постоянному току, заменив все конденсаторы обрывами, а индуктивности короткими замыканиями. Обычно расчет режима по постоянному току предшествует всем другим анализам, но с помощью директивы `.OP` этим можно и ограничиться. Результат расчета появится в диалоговом окне. После завершения ОР-симуляции напряжения узлов и токи ветвей можно увидеть, если навести на них курсор мышки. В этом случае контролируемые параметры будут отображаться в строке состояния.

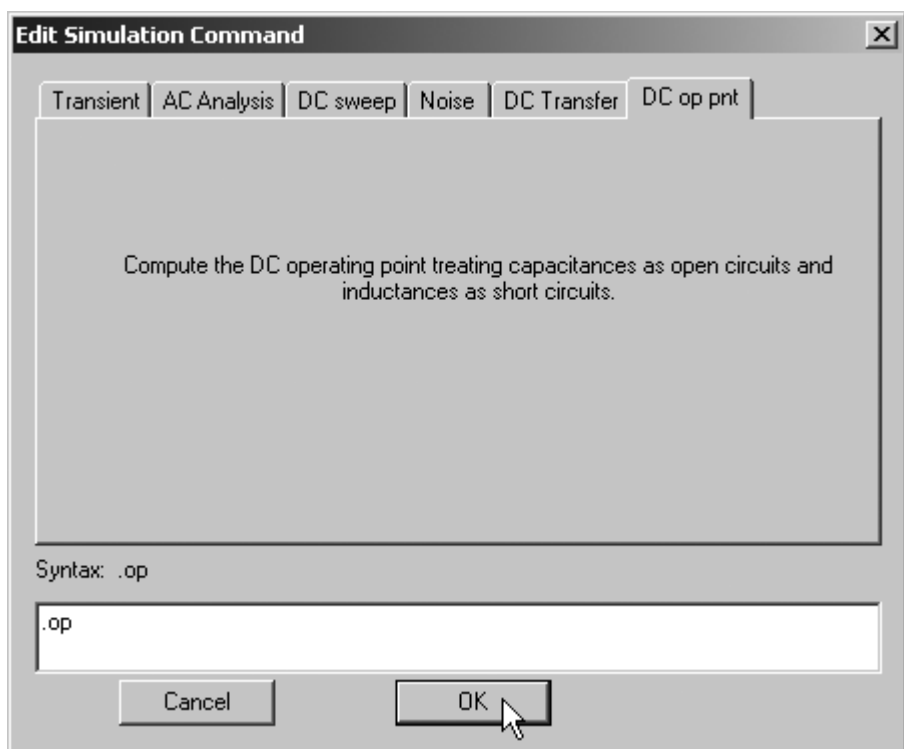


Рис. 4.15. Вкладка директивы `.OP` в окне **Edit Simulation Command**

В отличие от других директив, которые размещаются на схеме только с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1, для размещения директивы `.OP` можно использовать окно **Edit Simulation Command** (Редактирование команды моделирова-

ния), изображенное на рис. 4.15, которое вызывается командой меню **Simulate** (Моделирование) | **Edit Simulation Cmd** (Редактирование команды моделирования).

Выбираем вкладку **DC op pnt**. В нижнем поле уже введена директива `.OP`. Чтобы перенести ее на схему, достаточно щелкнуть по кнопке **OK**.

4.20. *OPTIONS* — установить параметры моделирования

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Текстовый синтаксис: `.OPTIONS [флаг] [параметр=<x> [...]]`.

В строке директивы `.OPTIONS` можно указывать различные параметры и флаги, где параметрам могут присваиваться различные числовые значения или текстовые строки. Флаги не требуют присвоения какого-то значения. Если флаг указан в строке, то это равносильно *истинному* состоянию (true), а если не указан, то *ложному* (false). Параметры и флаги можно перечислять в произвольном порядке. Директивы `.OPTIONS` являются кумулятивными. Это значит, что если имеется несколько директив `.OPTIONS`, то это равносильно одной директиве, в которую входят все параметры и флаги, перечисленные в отдельных директивах. Если какой-то параметр определен несколько раз, то используется его последнее значение.

Перечень параметров и флагов директивы `.OPTIONS` приведен в табл. 4.5.

Таблица 4.5. Полный перечень допустимых параметров и флагов директивы `.OPTIONS`

Ключевое слово	Размерность	По умолчанию	Описание
Abstol	A	$1 \cdot 10^{-12}$	Абсолютная ошибка расчета тока для DC-анализа
baudrate	—	0	Используется для исследования диаграмм. Сообщает плоттеру, каким образом свернуть абсциссу времени. Позволяет многократно отображать переходной процесс в ограниченном временном промежутке

Таблица 4.5 (продолжение)

Ключевое слово	Размерность	По умолчанию	Описание
chgtol	Кл	$10 \cdot 10^{-15}$	Абсолютная ошибка расчета заряда для TRAN-анализа
Cshunt	Ф	0	Добавляет дополнительную емкость между каждым узлом и "землей", что позволяет решить некоторые проблемы сообщения "internal timestep too small", вызванные высокочастотными генерациями или числовым шумом
cshuntintern	Ф	cshunt	Добавляет дополнительную емкость между внешними выводами схемных элементов и "землей", что позволяет решить некоторые проблемы сообщения "internal timestep too small", вызванные высокочастотными генерациями или числовым шумом
defad	м^2	0	Диффузионная площадь стока в модели MOSFET
defas	м^2	0	Диффузионная площадь истока в модели MOSFET
defl	м	$100 \cdot 10^{-6}$	Длина канала в модели MOSFET
defw	м	$100 \cdot 10^{-6}$	Ширина канала в модели MOSFET
delay	—	0	Используется для исследования диаграмм. Позволяет смещать фрагмент переходного процесса
fastaccess	флаг	false	В конце симуляции данные конвертируются в формат файла быстрого доступа
flagloads	флаг	false	Внешние источники тока используются в качестве нагрузки
Gmin	см	$1 \cdot 10^{-12}$	Проводимость, добавленная в каждый р-п-переход для улучшения сходимости

Таблица 4.5 (продолжение)

Ключевое слово	Размерность	По умолчанию	Описание
gminsteps	—	25	Устанавливает количество приращений G_{min} , используемых в течение DC-анализа. Подбор G_{min} вызывается автоматически, если возникают проблемы сходимости
gshunt	см	0	Добавляет проводимость между каждым узлом и "землей", что позволяет решить некоторые проблемы сообщения "internal timestep too small", вызванные высокочастотными генерациями или числовым шумом
itl1	—	100	Максимальное количество итераций в режиме DC-анализа
itl2	—	50	Максимальное количество итераций при расчете передаточной функции по постоянному току
itl4	—	10	Максимальное количество итераций при переходе к следующему моменту времени в режиме TRAN-анализа
Itl6	—	25	Количество шагов итерации источников напряжения для поиска рабочей точки
srcsteps	—	25	Альтернативный синтаксис для ITL6
maxclocks	—	Бесконечное	Максимальное количество временных циклов сохранения
maxstep	—	Бесконечный	Максимальный размер шага для TRAN-анализа
measclxfmt	строка	bode	<p>Формат комплексного числа для результата директивы .MEAS. Возможные форматы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> polar — полярный (вещественная и мнимая часть); <input type="checkbox"/> cartesian — декартов (вещественная часть и мнимая часть в зависимости от частоты); <input type="checkbox"/> bode — диаграмма Бode (АФЧХ)

Таблица 4.5 (продолжение)

Ключевое слово	Размерность	По умолчанию	Описание
measdgt	—	6	Число значащих цифр, используемых для выходных данных директивы .MEASURE
method	строка	trap	Численное интегрирование: <input type="checkbox"/> TRAP — методом трапеций; <input type="checkbox"/> GEAR — методом Гира
minclocks	—	10	Минимальное количество временных циклов сохранения
MinDeltaGmin	—	$1 \cdot 10^{-4}$	Устанавливает предел для окончания адаптации шага G_{min}
nomarch	флаг	false	Не активизировать окно плоттера во время симуляции
noopiter	флаг	false	Идти напрямую к подбору G_{min}
numdgt	—	6	Устанавливает число значащих цифр для выходных данных. В LTspice, если NUMDGT > 6, используется двойная точность для зависимых переменных
pivrel	—	$1 \cdot 10^{-3}$	Относительный коэффициент между наибольшим элементом матрицы и приемлемым значением ведущего элемента. Подбор pivrel лучше начинать с маленьких значений, ориентируясь на сходимость и точность
pivtol	—	$1 \cdot 10^{-13}$	Абсолютное минимальное значение матричного элемента, допустимое для его выделения в качестве ведущего элемента. pivtol всегда должен быть меньше G_{min}
reltol	—	$1 \cdot 10^{-3}$	Допустимая относительная ошибка расчета напряжений и токов в режиме TRAN-анализа

Таблица 4.5 (продолжение)

Ключевое слово	Размерность	По умолчанию	Описание
srcstepmethod	—	0	Стартовый пошаговый алгоритм источника
sstol	—	$1 \cdot 10^{-3}$	Относительная ошибка определения устойчивого состояния
startclocks	—	5	Число тактов ожидания перед поиском устойчивого состояния
temp	°C	27	Температура схемных элементов по умолчанию (если не указана явно)
tnom	°C	27	Температура измерения параметров модели по умолчанию (если не указана явно)
topologycheck	—	1	Если установить в ноль, то можно отключить проверку подвешенных узлов, коротких замыканий источников напряжения и недопустимых топологий обмоток трансформаторов
trtol	—	1	Устанавливает допустимую ошибку TRAN-анализа. Допустимые значения <code>trtol</code> лежат в диапазоне от 0.01 до 100, где меньшее значение соответствует меньшему временному шагу и обычно имеет значение от 1 до 10
trytocompact	—	1	Когда не равен нулю, симулятор пытается хранить в компактной форме входные напряжения и токи линии с потерями
vntol	В	$1 \cdot 10^{-6}$ В	Допустимая ошибка расчета напряжений в режиме TRAN-анализа
plotreltol	—	$2.5 \cdot 10^{-3}$	Устанавливает относительную ошибку сжатия графика
plotvntol	В	$10 \cdot 10^{-6}$ В	Устанавливает абсолютную ошибку сжатия графика напряжения

Таблица 4.5 (окончание)

Ключевое слово	Размерность	По умолчанию	Описание
plotabstol	A	$1 \cdot 10^{-9}$ A	Устанавливает абсолютную ошибку сжатия графика тока
plotwinsize	—	300	До какого числа пикселей данных сжимается окно. Для отключения компрессии установить в 0

4.21. PARAM — параметры, определяемые пользователем

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Текстовый синтаксис: `.PARAM [переменная= <значение>] [переменная={<выражение>}]`.

Директива `.PARAM` позволяет создавать переменные, определенные пользователем. Это полезно для создания ассоциаций имени переменной со значением или выражением, что улучшает читабельность схемного описания, а также позволяет определять в абстрактном виде параметры подсхем.

Если директива `.PARAM` используется внутри описания подсхемы, то область ее действия ограничена локальным уровнем данной подсхемы.

Вызываемые параметры подстановки, а также вычисляемые выражения заключаются в фигурные скобки. В следующем примере показаны оба способа определения переменных пользователя, а также передача параметров в подсхему, через ее строку вызова:

```
*
* Это определение схемы
.params x=1k y=1k*tan(pi/4+0.1)
X1 n001 n002 0 divider top=x bot=y
V1 n001 0 pulse(0 1 0 .5μ .5μ 0 1μ)
*
* это определение подсхемы
.subckt divider n1 n2 n3
```

```

r1 n1 n2 {top}
r2 n2 n3 {bot}
.ends
*
.tran 3μ
.end

```

В примере на уровне схемы определяются значения переменных x и y . Переменной x присваивается значение, а переменная y приравняется к алгебраическому выражению. Далее эти переменные приравняются к переменным `top` и `bot`, которые через строку вызова передаются в подсхему `x1`. После того как в подсхеме встречаются указанные переменные, обрамленные фигурными скобками, происходит подстановка соответствующих значений определенных и вычисленных ранее на уровне схемы.

В алгебраических выражениях доступны функции, перечисленные в табл. 4.6.

Таблица 4.6. Полный перечень алгебраических функций, допустимых для применения в директиве `.PARAM`

Имя функции	Определение	Примечание
<code>abs (x)</code>	Абсолютное значение x	
<code>acos (x)</code>	Арккосинус x	Результат в радианах. Возвращается вещественная часть арккосинуса x , что снимает ограничения на величину аргумента x
<code>arccos (x)</code>	Арккосинус x	Синоним <code>acos (x)</code>
<code>acosh (x)</code>	Ареа-косинус x	Возвращает вещественную часть ареа-косинуса x , что снимает ограничения на величину аргумента x
<code>asin (x)</code>	Арсинус x	Результат в радианах. Возвращает вещественную часть арксинуса x , что снимает ограничения на величину аргумента x

Таблица 4.6 (продолжение)

Имя функции	Определение	Примечание
<code>arcsin(x)</code>	Арксинус x	Синоним для <code>asin(x)</code>
<code>asinh(x)</code>	Ареа-синус x	
<code>atan(x)</code>	Арктангенс x	Результат в радианах
<code>arctan(x)</code>	Синоним для <code>atan(x)</code>	
<code>atan2(y, x)</code>	Четырехквadrантный арктангенс y/x	Результат в радианах
<code>atanh(x)</code>	Ареа-тангенс x	
<code>buf(x)</code>	1 если $x > 0.5$, иначе 0	
<code>cbrt(x)</code>	Кубический корень x	
<code>ceil(x)</code>	Целое равное или больше чем x	
<code>cos(x)</code>	Косинус x	x в радианах
<code>cosh(x)</code>	Гиперболический косинус x	
<code>exp(x)</code>	Число e в степени x	
<code>fabs(x)</code>	Абсолютное значение x	Синоним <code>abs(x)</code>
<code>flat(x)</code>	Случайное число s между $-x$ и x с равномерным распределением	
<code>floor(x)</code>	Целое равное или меньше x	
<code>gauss(x)</code>	Случайное число из распределения Гаусса	
<code>hypot(x, y)</code>	$\text{Sqrt}(x^2 + y^2)$	
<code>if(x, y, z)</code>	Если $x > 0.5$, то y , иначе z	

Таблица 4.6 (продолжение)

Имя функции	Определение	Примечание
<code>int(x)</code>	Преобразовать x в целое	
<code>inv(x)</code>	0, если $x > 0.5$, иначе 1	
<code>limit(x, y, z)</code>	Промежуточное значение x , y , и z	
<code>ln(x)</code>	Натуральный логарифм x	
<code>log(x)</code>	Альтернативный синтаксис для <code>ln(x)</code>	
<code>log10(x)</code>	Логарифм по основанию 10	
<code>max(x, y)</code>	Большее из x или y	
<code>mc(x, y)</code>	Случайное число между $x \cdot (1+y)$ и $x \cdot (1-y)$ с равномерным распределением	
<code>min(x, y)</code>	Меньшее из x или y	
<code>pow(x, y)</code>	$x^{**}y$	Возвращает вещественную часть, что снимает ограничения на знак аргумента x
<code>pwr(x, y)</code>	$\text{abs}(x)^{**}y$	
<code>pwrsgn(x, y)</code>	$\text{sgn}(x) \cdot \text{abs}(x)^{**}y$	
<code>rand(x)</code>	Случайное число между 0 и 1 в зависимости от целого значения x	
<code>random(x)</code>	То же, что и <code>rand(x)</code>	Обеспечивает гладкий переход между значениями
<code>round(x)</code>	Ближайшее целое x	

Таблица 4.6 (окончание)

Имя функции	Определение	Примечание
<code>sdt(x[,ic[,assert]])</code>	Альтернативный синтаксис для <code>idt(x)</code>	
<code>sgn(x)</code>	Знак x	
<code>sin(x)</code>	Синус x	x в радианах
<code>sinh(x)</code>	Гиперболический синус x	
<code>sqrt(x)</code>	Квадратный корень x	
<code>table(x,a,b,c,d,...)</code>	Интерполировать значение для x , основанное на поиске в таблице данной как набор пар точек	
<code>tan(x)</code>	Тангенс x	
<code>tanh(x)</code>	Гиперболический тангенс x	
<code>u(x)</code>	1 если $x > 0$, иначе 0	
<code>uramp(x)</code>	x если $x > 0$, иначе 0	

Математические и логические операции, доступные в алгебраических выражениях, приведены в табл. 3.2.

4.22. SAVE — ограничение количества сохраненных данных

Некоторые виды моделирования, особенно производимые во временной области, могут генерировать большой объем данных. С помощью директивы `.SAVE` можно уменьшить этот объем, сохраняя только интересующие узловые напряжения и токи в выводах схемных элементов.

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Текстовый синтаксис: `.save <V(узел) > [V(узел) [I(элемент)
[I(элемент)]]] [dialogbox].`

Например, директива `.SAVE I(Q2)` сохранит базовый, коллекторный и эмиттерный токи биполярного транзистора Q2. Определение типа `Ic(Q2)` позволяет сохранить ток только одного вывода, в данном случае коллектора.

Выводимые данные можно выбирать по шаблону, используя обобщающие символы "?" и "*". Обобщающий символ "?" подразумевает замену любого одиночного символа, а обобщающий символ "*" — любой комбинации символов. Например, строка `.SAVE V(*) Id(*)` сохранит все узловые напряжения и стоковые токи полевых транзисторов.

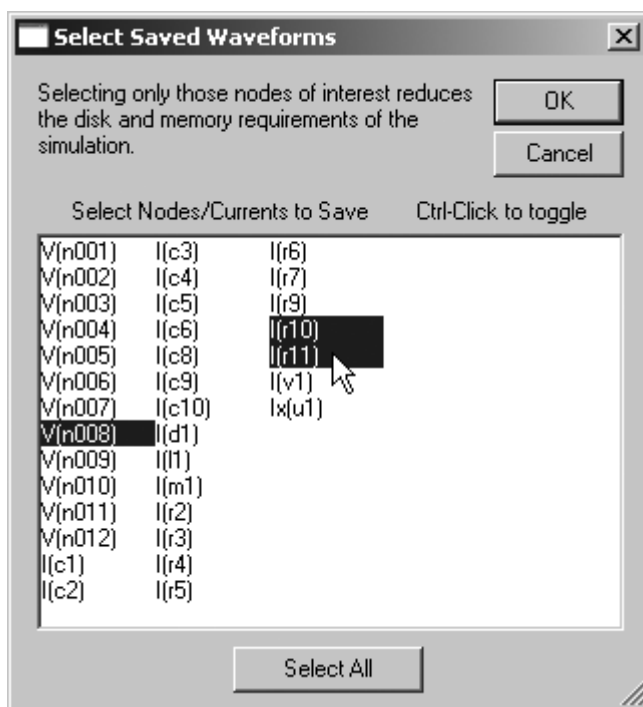


Рис. 4.16. Выбор выводимых параметров в диалоговом окне **Select Saved Waveforms**

Если в качестве параметра директивы `.SAVE` использовано ключевое слово **dialogbox** (Диалоговое окно), то перед сохранением данных появится диалоговое окно **Select Saved Waveforms** (Выбор сохраняемых диаграмм) со списком всех доступных напряжений и токов (рис. 4.16). Далее требуется просто

щелкнуть по напряжению или току, который надо сохранить. Выбранный параметр будет подсвечен синим фоном. Так как текстовые названия напряжений и токов в диалоговом окне **Select Saved Waveforms**, мягко говоря, не сильно информативны, то можно щелкать прямо по узлам и ветвям схемы (рис. 4.17). В этом случае эффект будет аналогичен предыдущему.

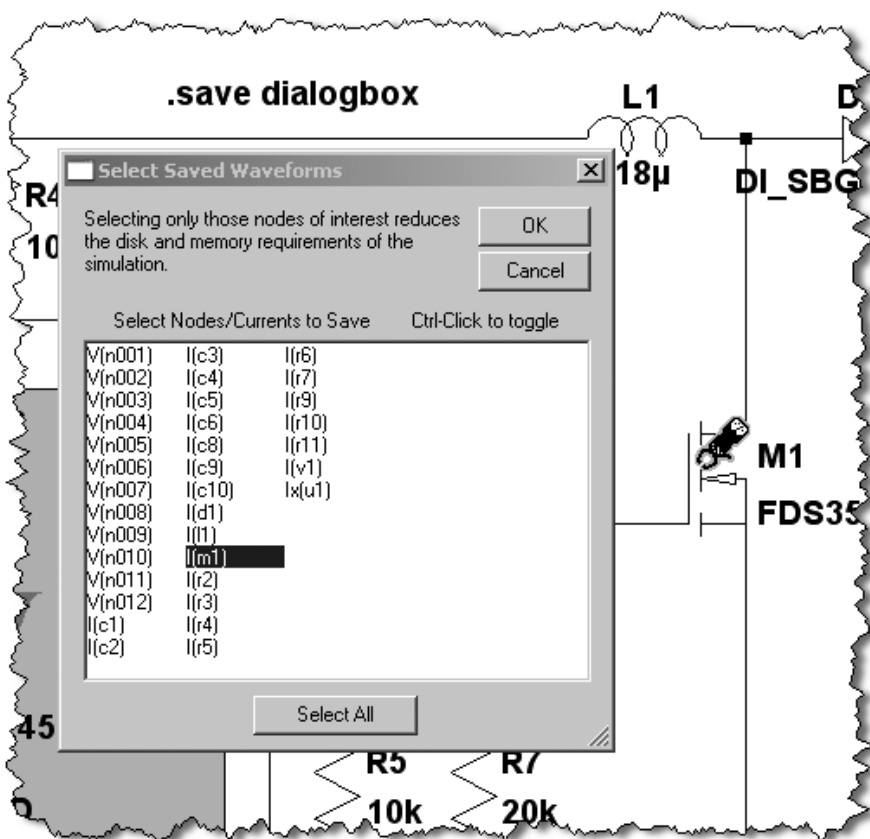


Рис. 4.17. Выбор выводимых параметров непосредственно в схеме

4.23. SAVEBIAS — сохранить рабочую точку на диск

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Тестовый синтаксис: `.SAVEBIAS <имя файла> [internal]`
+ `[temp=<значение>] [time=<значение> [repeat]] [step=<значение>]`
+ `[DC1=<значение>] [DC2=<значение>] [DC3=<значение>]`

Директива записывает на диск текстовый файл состояния, который можно загрузить директивой `.LOADBIAS` при последующей симуляции. Такая возможность может быть очень полезной, если производится поиск рабочей точки сложной схемы. Рассчитав и сохранив на диск рабочую точку, можно существенно ускорить моделирование, загрузив результаты расчета и уже с этого места продолжить дальнейшее моделирование.

Если в строку директивы включить флаг `internal` (внутренний), то это позволит сохранить на диск более полное решение за счет сохранения внутренних узлов схемных элементов.

Параметр `temp` (температура) задает температуру, для которой сохраняются узловые потенциалы при вариации температуры, а необязательный параметр `step` (шаг) задает интервал температур, через который обновляется запись в файл.

Параметр `time` (время) позволяет установить конкретное время TRAN-анализа, для которого нужно сохранить рабочую точку. Если при этом включить флаг `repeat` (повторять), то рабочая точка будет записываться после истечения каждого периода, заданного параметром `time`.

Параметры `DC1`, `DC2` и `DC3` используются, чтобы извлечь единственную рабочую точку из DC-анализа при вариации параметров. Параметр `DC1` используется при вариации одной переменной, параметры `DC1` и `DC2` при вариации двух переменных (соответственно первой и второй), а параметры `DC1`, `DC2` и `DC3` при вариации трех переменных (соответственно первой, второй и третьей).

Образуемый на диске файл имеет текстовый формат. В первой строке, в виде комментариев, указываются имя файла схемы, из которого была произведена запись рабочей точки, с использованием директивы `.SAVEBIAS`. Далее, опять же в виде комментариев, указывается время в секундах после начала анализа. Затем следует директива `.NODESET`, содержащая полную информацию об узловых потенциалах схемы. Поэтому после загрузки файла по директиве `.LOADBIAS` эти потенциалы будут установлены автоматически и ее действие аналогично действию соответствующей директивы `.NODESET`.

Если требуется запустить TRAN-анализ из сохраненной рабочей точки, то это можно организовать, заменив в файле с сохраненным состоянием директиву `.NODESET` на `.IC`.

ПРИМЕЧАНИЕ

Поскольку директива `.SAVEBIAS` не сохраняет состояния всех реактивных сопротивлений схемы, то успех этой технологии сохранения состояния не всегда гарантирован.

4.24. STEP — вариация параметров

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Текстовый синтаксис 1: `.STEP [OCT] [DEC] <варируемый параметр>`

+ <начальное значение> <конечное значение> <количество точек>

Текстовый синтаксис 2: `.STEP <варируемый параметр> LIST <значение>`
[значение [...]]

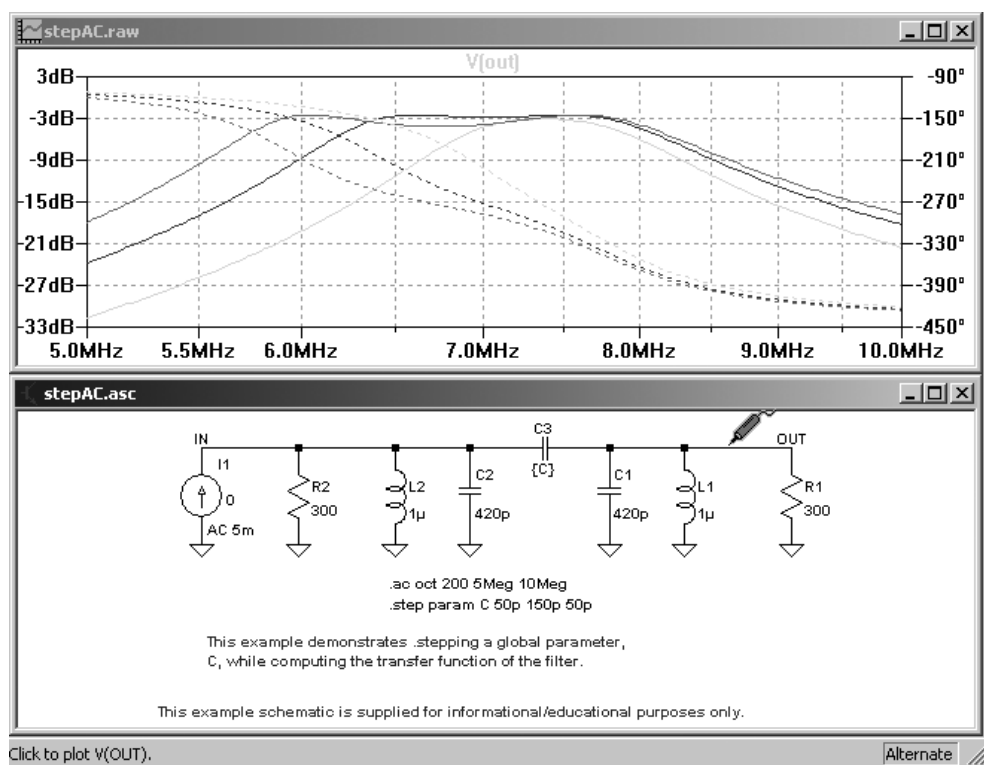


Рис. 4.18. Изменение частотной характеристики фильтра при вариации емкости связи C3

Директива позволяет производить вариацию определенного параметра, которым может быть температура, напряжение или ток независимого источника, параметр модели или глобальный параметр. Для каждого значения варьируемого параметра производится анализ, определяемый соответствующими директивами. Изменение варьируемого параметра может иметь линейное или логарифмическое распределения, а также может быть задано в виде списка значений.

Рассмотрим несколько примеров использования директивы `.STEP`, которые расположены в каталоге `C:\Program Files\LTC\LTspiceIV\examples\Educational` (по умолчанию).

Исследуем изменение частотной характеристики полосового фильтра при изменении емкости конденсатора связи `C3` (файл `stepAC.asc`). В качестве емкости `C3` укажем параметр `c`, который можно варьировать в процессе моделирования. Задание на вариацию емкости `C3` задается с помощью строки:

```
.STEP PARAM C 50p 150p 50p
```

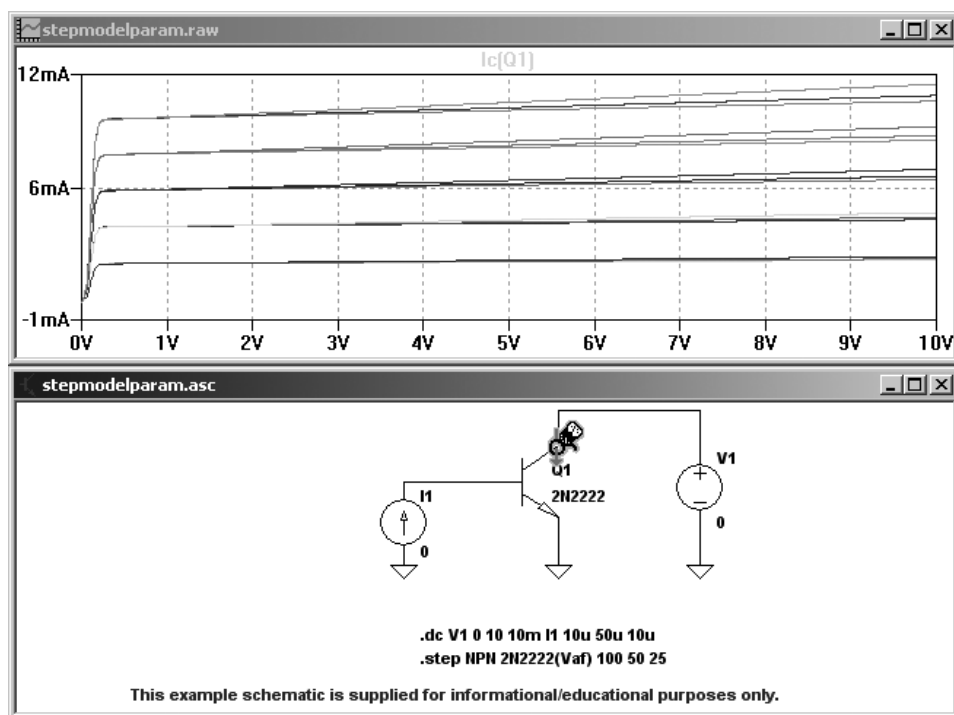


Рис. 4.19. Изменение выходных характеристик транзистора 2N2222 при вариации параметра `Vaf`

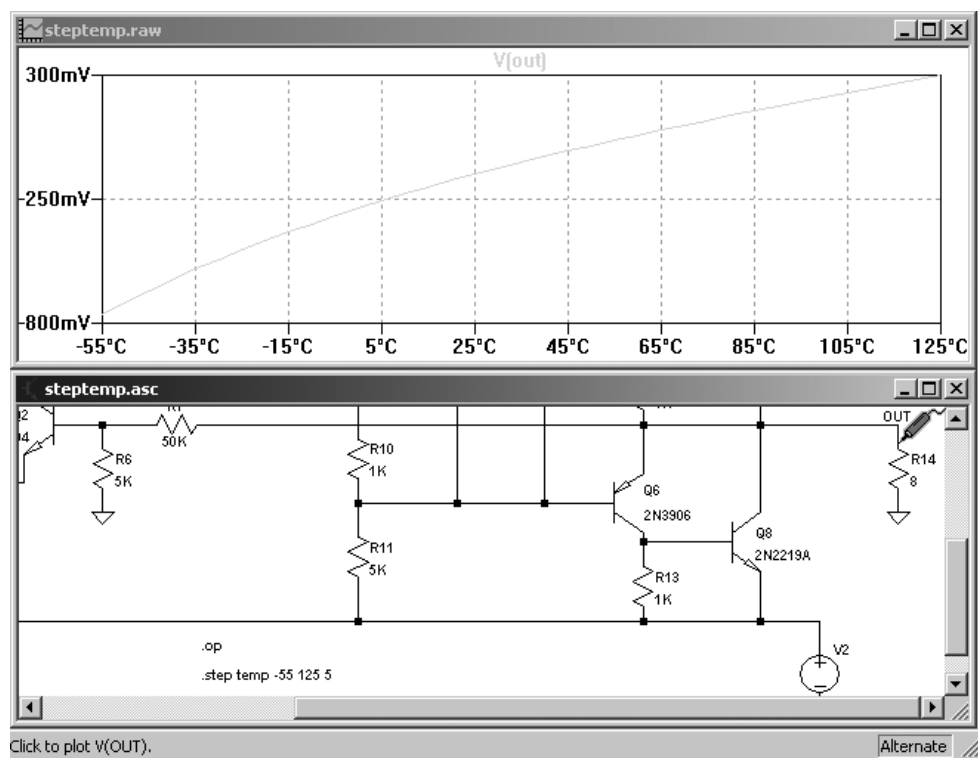


Рис. 4.20. Дрейф выходного напряжения усилителя низкой частоты при изменении температуры

Или, используя альтернативный синтаксис:

```
.STEP PARAM C LIST 50p 100p 150p
```

В обоих случаях параметр C имеет начальное значение 50 пФ, конечное 150 пФ и изменяется с шагом 50 пФ.

Результаты моделирования изображены на рис. 4.18.

При создании и проверке моделей транзисторов иногда возникает необходимость наблюдения зависимости полученных характеристик от вариации какого-то параметра модели. Для примера исследуем изменение выходной характеристики n - p - n -транзистора 2N2222 при вариации параметра V_{af} его модели (файл `stepmodelparam.asc`). Задание на вариацию параметра V_{af} задается с помощью строки:

```
.STEP NPN 2N2222 (Vaf) 100 50 25,
```

означающей, что варьируется параметр `vaf` транзистора 2N2222, описываемого стандартной моделью `npn`. Варьируемый параметр имеет начальное значение 100, конечное 50 и изменяется с шагом 25. Результаты моделирования изображены на рис. 4.19.

Зачастую, при создании различных усилительных и измерительных устройств требуется исследовать температурный дрейф их характеристик. Для примера исследуем изменение температурного дрейфа выходного напряжения мощного усилителя низкой частоты (файл `steptemp.asc`). Задание на вариацию температуры задается с помощью строки:

```
.STEP TEMP -55 125 5,
```

означающей, что варьируется температура всего устройства (параметр `TEMP`). Температура изменяется от -55°C до 125°C с шагом 5°C .

Результаты моделирования изображены на рис. 4.20.

4.25. SUBCKT — определение подсхемы

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Текстовый синтаксис: `.SUBCKT <имя подсхемы> [список внешних узлов]`.

Зачастую, в схемах используются какие-то повторяющиеся фрагменты. Такие фрагменты с помощью директивы `.SUBCKT` можно оформить в виде подсхемы и впоследствии вызывать по имени. Перед запуском моделирования вместо каждого вызова подсхемы вставляется соответствующее описание, созданное ранее при помощи директивы `.SUBCKT`. Данная директива особенно удобна при создании моделей элементов, отсутствующих во встроенной библиотеке программы LTspice.

В строке директивы `.SUBCKT` указывается уникальное `<имя подсхемы>`, а также `<список внешних узлов>`, через которые происходит передача внешних узловых потенциалов в подсхему. Далее следует описание подсхемы. В конце описания подсхемы отмечается директивой `.ENDS`.

Ниже приведен пример, где в подсхеме описана простейшая RC-цепочка:

* Это определение схемы

```
X1 N005 N006 0 rcnet
```

```
V1 N005 0 PULSE(0 1 0 100n 100n 100u 1m)
```

*

* Это определение подсхемы RC-цепочки

```
.subckt rcnet n1 n2 n3
```

```
R1 n1 n2 1k
```

```
C1 n2 0 1μ
```

```
.ends
```

```
.tran 10m
```

```
.end
```

Перед запуском моделирования текстовое описание схемы приводится к виду:

* Это определение схемы

```
R1 N005 N006 1k
```

```
C1 N006 0 1μ
```

```
V1 N005 0 PULSE(0 1 0 100n 100n 100u 1m)
```

```
.tran 10m
```

```
.end
```

4.26. *TEMP* — вариация температуры

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Текстовый синтаксис: `.TEMP <T1> [T2 [...]]`.

Эта директива позволяет обеспечить изменение температуры несколько устаревшим способом. Симуляция выполняется для каждой указанной температуры. В качестве альтернативы данной директивы можно использовать директиву `.STEP` для списка:

```
.STEP TEMP LIST <T1> <T2> ...
```

4.27. *TF* — найти передаточную функцию по постоянному току

Текстовый синтаксис 1: `.TF V(<узел>[,узел 2]) <источник>`.

Текстовый синтаксис 2: `.TF I(<источник напряжения>) <источник>`.

Этот режим анализа позволяет найти малосигнальную передаточную функцию по постоянному току для напряжения узла $V(<\text{узел}>)$ или напряжения между узлами $V(<\text{узел}, \text{узел } 2>)$, а также для тока ветви $I(<\text{источник напряжения}>)$. Анализ производится для малых изменений независимого источника.

Для примера определим передаточную функцию простого усилителя постоянного тока, собранного на полевом транзисторе с изолированным затвором типа IRF530 (рис. 4.22).

В отличие от других директив, которые размещаются на схеме только с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактировать текст на схеме), изображенного на рис. 4.1, для настройки и размещения директивы `.tf` можно использовать окно **Edit Simulation Command** (Редактировать команду моделирования), изображенное на рис. 4.21, которое вызывается командой меню **Simulate** (Моделировать) | **Edit Simulation Cmd** (Редактировать команду моделирования).

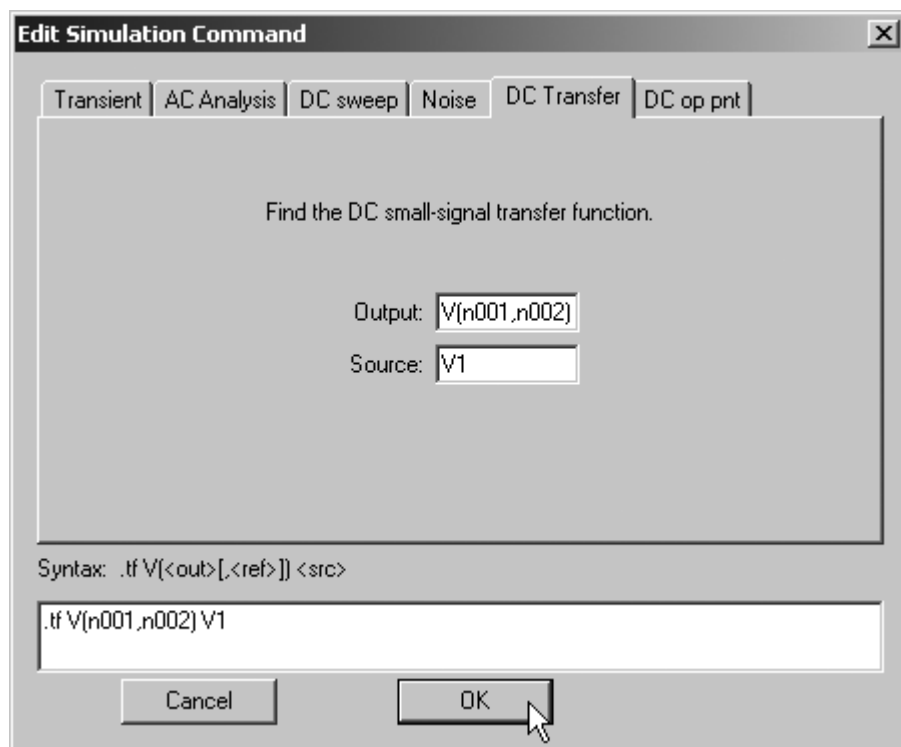


Рис. 4.21. Редактирование директивы `.tf`

Для настройки анализа передаточной функции по постоянному току выбираем вкладку **DC Transfer**. На этой вкладке есть два информационных поля. В верхнем поле **Output** (Выход) необходимо указать выходной узел, или, если выходное напряжение снимается между узлами, два узла, записанные через запятую. В данном случае напряжение снимается со стоковой нагрузки R1 транзистора M1 и поэтому нас интересует напряжение между узлами V(n001,n002). В нижнем поле **Source** (Источник) необходимо указать независимый источник V1, используемый для снятия передаточной функции.

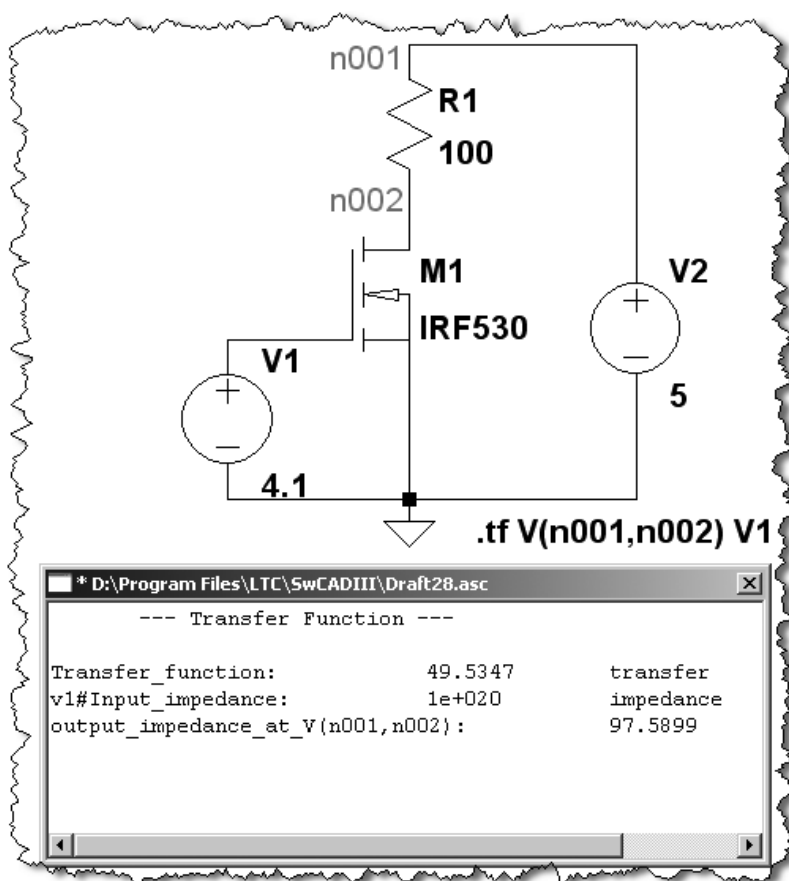



Рис. 4.22. Исследование передаточной функции на постоянном токе

Одновременно с заполнением информационных полей в нижнем поле **Syntax** (Синтакс) формируется строка директивы **.tf V(n001,n002) V1**. Заполнив все

поля, щелкнем по кнопке **OK** и поместим директиву в схему модели. Далее, с помощью команды меню **Simulate** (Моделирование) | **Run** (Выполнить) или щелкнув по иконке  на панели инструментов, запустим поиск малосигнальной передаточной функции по постоянному току. Результат анализа будет выведен в выпадающем текстовом окне **Transfer Function** (Передаточная функция), изображенном на рис. 4.22.

4.28. **TRAN** — выполнить анализ переходного процесса

Директива **.TRAN** позволяет выполнить анализ переходного процесса. Этот тип анализа обеспечивает наиболее полную симуляцию работы схемы и по существу моделирует поведение схемы после подачи питания.

Текстовый синтаксис 1: **.TRAN** <шаг вывода данных> <время остановки>
+ [<время старта> [<максимальный шаг>]] [<опции>].

Текстовый синтаксис 2: **.TRAN** <время остановки> [<модификаторы>].

Первая форма текстового синтаксиса является традиционной для SPICE-симуляторов, а вторая — сокращенной формой LTspice. Дискретность вывода данных, а также построения кривых в окне плоттера, определяется параметром <шаг вывода данных>. Этот же параметр используется как предположение начального размера шага симуляции и по умолчанию установлен в ноль. Расчет переходного процесса начинается с нулевого момента времени до момента, определенного параметром <время остановки>. Перед началом расчета переходных процессов рассчитывается рабочая точка по постоянному току. Если определен параметр <время старта>, то данные начинают записываться в выходной файл и выводятся в окно плоттера, начиная с момента времени, определяемого этим параметром. Параметр <максимальный шаг> определяет максимальный шаг интегрирования уравнений схемы. Если <максимальный шаг> не указан, то устанавливается равным <время остановки>/50.

Далее в строке директивы **.TRAN** могут быть указаны различные <опции>, влияющие на процесс анализа. Обычно эти опции называются модификаторами директивы **.TRAN**.

В отличие от других директив, которые размещаются на схеме только при помощи окна **Edit Text on the Schematic** (Редактировать текст на схеме), изображенного на рис. 4.1, для настройки и размещения директивы **.TRAN**

можно использовать окно **Edit Simulation Command** (Редактировать команду моделирования), изображенное на рис. 4.23, которое вызывается командой меню **Simulate** (Моделирование) | **Edit Simulation Cmd** (Редактировать команду моделирования).

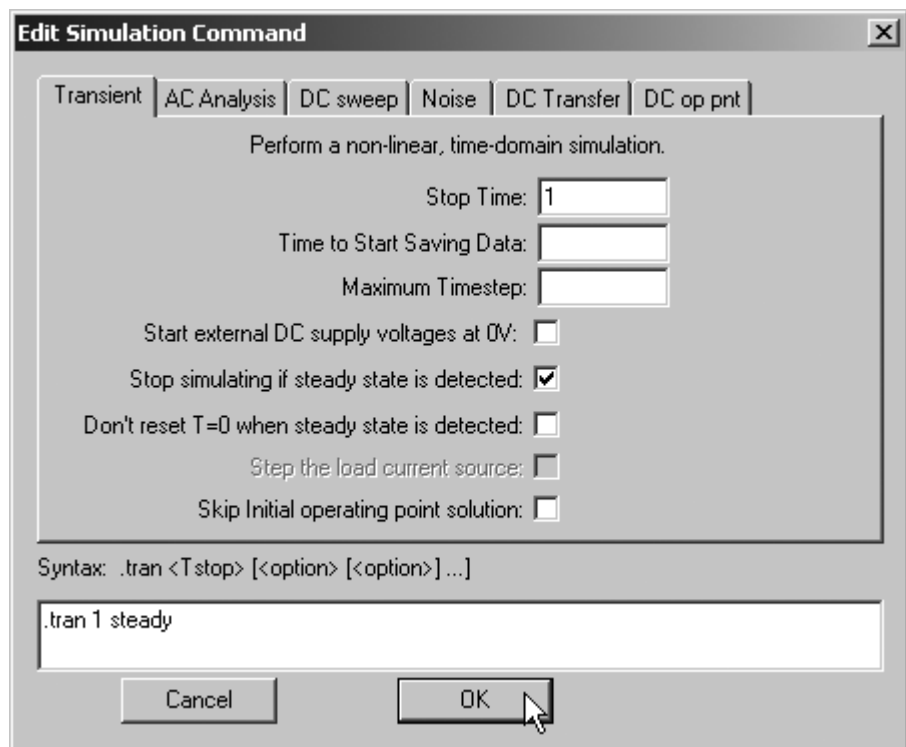


Рис. 4.23. Редактирование директивы `.TRAN`

Для настройки анализа переходного процесса выбираем вкладку **Transient**.

Вкладка имеет три информационных поля, в которые вводятся значения временных параметров моделирования:

- ☐ **Stop Time** — соответствует параметру <время остановки> и устанавливает время окончания анализа;
- ☐ **Time to Start Saving Data** — соответствует параметру <время старта> и позволяет установить время начала записи данных и вывода графиков в окно плоттера;

- **Maximum Timestep** — соответствует параметру <максимальный шаг> и позволяет определять максимальный шаг интегрирования уравнений схемы.

Под информационными полями находятся пять строк выбора модификаторов директивы .TRAN. Каждый модификатор может быть выбран установкой галочки напротив соответствующей строки.

- **Start external DC supply voltages at 0V** (Старт с обнуленными независимыми источниками) — соответствует модификатору *Startup*. Этот модификатор похож на описанный ниже *UIC*, но в отличие от *UIC* разрешает поиск рабочей точки с обнуленными независимыми источниками. При этом потенциалы узлов и токи ветвей могут удерживаться на уровне, определенном директивой .IC. После начала анализа переходного процесса независимые источники линейно вводятся в работу в течение первых 20 мкс.

- **Stop simulating if steady state is detected** (Остановить моделирование, если обнаружено устойчивое состояние) — соответствует модификатору *Steady*. Присутствие этого модификатора позволяет остановить симуляцию, если достигнуто устойчивое состояние переходного процесса. Стабильность состояния необходима для калькулятора эффективности, который определяет общий коэффициент полезного действия (КПД) моделируемого устройства, а также потери в отдельных его элементах. Использование модификатора возможно только в том случае, если в схеме присутствует один из импульсных регуляторов производства корпорации Linear Technology, модели которых расположены в разделе **PowerProducts** встроенной библиотеки. Это является своеобразной платой за бесплатное использование программы LTspice. Устойчивое состояние считается достигнутым, если за период тактовой частоты средний выходной ток усилителя ошибки равен нулю. Доля пикового тока на выходе усилителя ошибки определяется параметром *SSTOL*. Порой, из-за невозможности корректного значения *SSTOL*, автоматическое определение устойчивого состояния может быть неудачным. В этом случае можно попытаться вручную определить границы устойчивого участка. Для этого после начала симуляции нужно активизировать команду меню **Simulate** (Моделирование) | **Efficiency Calculation** (Калькулятор эффективности) | **Mark Start** (Отметить начало). После этого симулятор удалит все накопленные данные и снова начнет накапливать их для калькулятора эффективности. Если повторно выполнить команду **Mark Start** (Отметить начало), то все уже накопленные данные будут повторно стерты и

накопление начнется снова. Затем, после истечения некоторого времени, но не менее десяти периодов работы импульсного регулятора, необходимо активизировать команду меню **Simulate** (Моделирование) | **Efficiency Calculation** (Калькулятор эффективности) | **Mark End** (Отметить конец). После этого симуляция будет остановлена. Чтобы просмотреть отчет калькулятора эффективности, нужно активизировать пункт меню **View** (Смотреть) | **Efficiency Report** (Отчет эффективности). Если выбрать подпункт **Show on Schematic** (Показать на схеме), то отчет, в виде комментариев, будет размещен на схеме или скопирован в буфер обмена, если выбран подпункт **Paste to clipboard** (Копировать в буфер обмена).

- ❑ **Don't reset T=0 when steady state is detected** (Не сбрасывать T=0, когда обнаружено устойчивое состояние) — соответствует модификатору `Nodiscard`, который позволяет оставить результаты симуляции переходного процесса, предшествующего стабильному участку.
- ❑ **Step the load current source** (Ступенчатое изменение тока нагрузки) — соответствует модификатору `step` (Шаг), который позволяет моделировать реакцию схемы на ступенчатую нагрузку и работает с источником ступенчатого тока (`step` версия), используемого в качестве нагрузки. Использование модификатора возможно только в том случае, если в схеме присутствует один из импульсных регуляторов производства корпорации Linear Technology, модели которых расположены в разделе **PowerProducts** встроенной библиотеки. Это является своеобразной платой за бесплатное использование программы LTspice. После запуска процесса моделирования ожидается устойчивое состояние, которое считается достигнутым, если за период тактовой частоты средний выходной ток усилителя ошибки равен нулю. Доля пикового тока на выходе усилителя ошибки определяется параметром `sstol`. Если не установлена опция **Nodiscard**, после достижения устойчивого состояния данные, соответствующие предшествующему переходному процессу, стираются. После этого ток нагрузки, со скоростью 20 А/мкс, принимает значение, соответствующее следующему ступенчатому значению. Далее, после достижения устойчивого состояния, ток нагрузки переходит к следующему ступенчатому значению и т. д. Изменение нагрузки прекращается после того как список токов будет исчерпан. Порой из-за невозможности корректного значения `sstol` автоматическое определение устойчивого состояния может быть неудачным. В этом случае можно использовать директиву `.TRAN` без опции **Step**, а в качестве нагрузки использовать источник тока, программируемый пользователем.

□ **Skip initial operating point solution** (Пропустить поиск начальной рабочей точки) — соответствует модификатору `uic`, который позволяет пропустить поиск рабочей точки и использовать начальное состояние, определенное директивой `.ic`. Не стоит злоупотреблять этим модификатором, т. к. пропуск поиска рабочей точки может привести к возникновению нереальных состояний, связанных, например, с нарушением законов коммутации. Это может случиться, если где-то в схеме источник напряжения подключен параллельно конденсатору или источник тока включен последовательно с индуктивностью. В этом случае после начала анализа переходного процесса возникнет ситуация, когда потребуется мгновенно увеличить напряжение на конденсатор или ток в индуктивности. В обоих случаях симулятор будет вынужден использовать бесконечно короткий временной шаг, что приведет к ошибке сингулярности и выдаче сообщения "time step too small convergence fail" (невозможно получить сходимость из-за слишком маленького размера временного шага).

Одновременно с заполнением информационных полей и выбором модификаторов в нижнем поле **Syntax** (Синтакс) формируется строка директивы **.tran**. Так как параметр **Tprint** (Шаг вывода данных) не имеет специального информационного поля на вкладке **Transient**, то при необходимости его значение можно ввести непосредственно в строку **.tran**, формируемую в нижнем поле.

Заполнив все поля и щелкнув по кнопке **OK**, можно начать анализ переходного процесса.

4.29. WAVE — вывести сигнал в WAV-файл

С помощью директивы `.wave` LTspice может записывать сигналы из различных точек схемы в аудиофайл формата WAV. Этот файл затем можно прослушать или использовать для формирования входного сигнала для другой симуляции.

Директива размещается на схеме с помощью окна **Edit Text on the Schematic** (Редактирование текста на схеме), изображенного на рис. 4.1.

Текстовый синтаксис: `.WAVE <имя .wav файла> <Нбит> <частота выборок>
V(выход) [V(выход2) ...].`

Параметр <имя .wav файла> обозначает полное имя WAV-файла, которое может быть задано в абсолютной форме, начиная с корневой директории диска, или относительно директории, содержащей схему или ее текстовое описание. Если имя файла содержит пробелы, то его необходимо заключить в двойные кавычки. Параметр <Nбит> назначает разрядность выборки в битах. Допустимой считается разрядность от 1 до 32 бит. Параметр <частота выборок> назначает число выборок, которые будут записаны за секунду, моделируемую симулятором. Допустимой считается частота от 1 до 4 294 967 295 выборок в секунду. Далее после параметров идет перечень узлов схемы, сигналы с которых записываются в файл. Для каждого узла организуется независимый канал в WAV-файле. Число каналов может быть от одного до 65 535. Эта же директива может использоваться для записи токов ветвей.

Аналого-цифровой преобразователь в формат WAV-файла имеет полный диапазон входного сигнала от -1 до $+1$ вольт или ампер.

Пример:

```
.WAVE C:\output.wav 16 44.1K V(left) V(right)
```

ПРИМЕЧАНИЕ

Не все файлы, записанные в LTspice, могут быть затем проиграны с использованием музыкальной системы персонального компьютера из-за существующих там ограничений на число каналов, разрядность и частоту выборки. Чтобы избежать таких проблем необходимо придерживаться определенных правил, согласно которым число каналов должно равняться 1 или 2, разрядность 8 или 16 бит и частота выборки 11 025, 22 050 или 44 100 Гц.

ГЛАВА 5



Редактор схем



Редактор схем используется для создания новых или изменения существующих схем. Размер схемы и глубина ее иерархии ограничиваются только ресурсами используемого компьютера.

Редактор схем имеет встроенную библиотеку, содержащую приблизительно 800 символов. Основу встроенной библиотеки составляют микросхемы, производимые корпорацией Linear Technology. В основной массе это линейные и импульсные источники питания, операционные усилители и компараторы. Продукция корпорации Linear Technology пользуется большой и заслуженной популярностью в профессиональной и любительской среде разработчиков и поэтому встроенной библиотеки уже достаточно для решения многих задач. Однако при необходимости пользователь имеет возможность пополнять библиотеку своими символами и моделями.

Основным режимом работы редактора схем программы LTspice является SPICE-моделирование. Это означает, что если щелкнуть по любому объекту в рабочем поле схемного редактора, то это скорее приведет к построению кривой напряжения или тока через этот элемент, но не к прекращению моделирования и выбору объекта для операции редактирования. Для осуществления различных операций редактирования нужно явно выбрать соответствующую команду. Любая операция редактирования может быть отменена или возвращена после отмены.

Несмотря на то, что все встроенные схемные элементы LTspice, кроме К и Х, имеют соответствующие символы, библиотека LTspice может пополняться элементами, которые не имеют заранее согласованной модели и символа. Поэтому в редакторе схем программы LTspice введено более общее понятие схемного компонента, которое подразумевает схемную единицу, состоящую из графического символа и соответствующей модели.

5.1. Окно редактора схем

Для запуска редактора схем необходимо в стартовом окне программы LTspice активизировать команду меню **File** (Файл) | **New Schematic** (Новая схема) или **File** (Файл) | **Open** (Открыть). В первом случае будет создаваться новая схема и окно редактора схем после запуска будет пустым. Во втором случае в окно редактора схем можно загрузить уже существующую схему для последующего редактирования. Аналогичный результат можно получить если соответственно щелкнуть левой кнопкой мышки по иконкам  и , расположенным на панели инструментов.

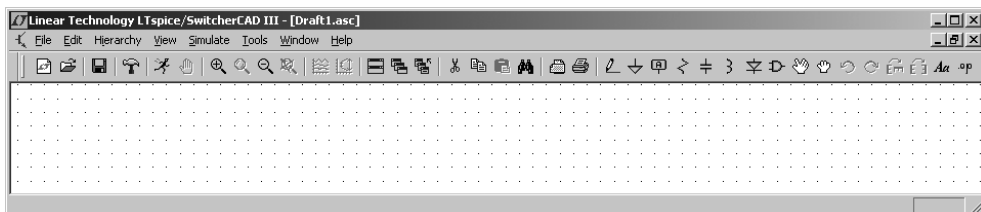



Рис. 5.1. Окно редактора схем

Отличительным признаком окна редактора схем является символ синего транзистора  в левой части панели команд (рис. 5.1).

5.1.1. Панель команд редактора схем

Рассмотрим подробнее подпункты меню команд:

- **File** (Файл) — позволяет осуществлять различные действия с файлами (рис. 5.2):
 - **New Schematic** (Новая схема) — начать создание новой схемы;
 - **New Symbol** (Новый символ) — запустить редактор символов;
 - **Open** (Открыть) — открыть существующий файл формата LTspice;
 - **Save** (Сохранить) — сохранить на диск созданную или отредактированную схему;
 - **Save As** (Сохранить как) — сохранить схему под другим именем;

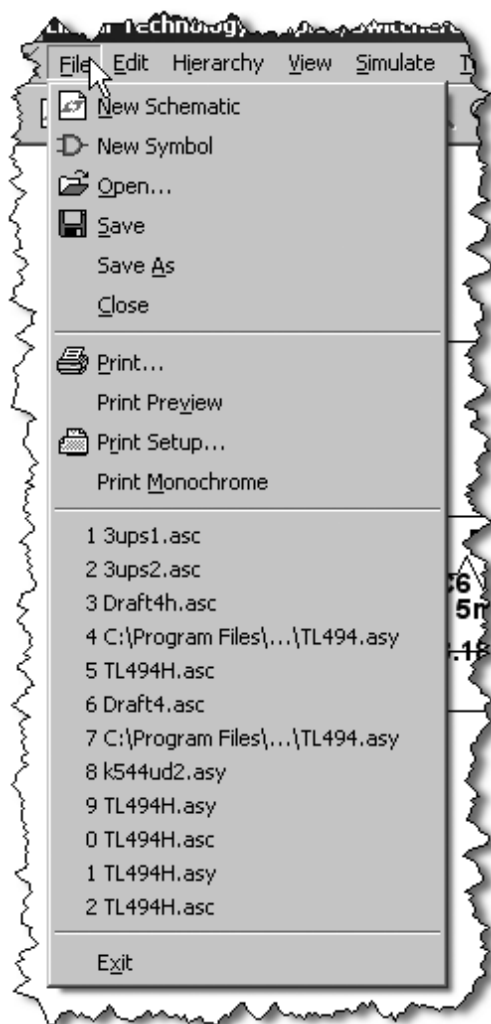



Рис. 5.2. Меню File

- **Close** (Закрыть) — закрыть открытую схему. Если в схему были внесены изменения, то перед закрытием будет предложено сохранить сделанные изменения;
- **Print** (Печать) — печатать область окна редактора схемы, отображенного на экране;
- **Print Preview** (Предварительный просмотр печати) — предварительный просмотр изображения, выводимого на печать;

- **Print Setup** (Настройка печати) — настройка печати. Можно выбрать принтер, а также размер и ориентацию листа;
 - **Print Monochrome** (Черно-белая печать) — выбор этого пункта позволяет печатать цветные изображения, как черно-белые;
 - История открытия файлов позволяет повторно выбирать любой из двенадцати последних файлов, с которыми работал редактор схем;
 - **Exit** (Выйти) — закрыть все открытые документы и выйти из программы. Если в документах были сделаны какие-то изменения, то перед закрытием будет предложено сохранить сделанные изменения.
- **Edit** (Редактировать) — служит для редактирования схемы и содержит следующие подпункты (рис. 5.3):
- **Undo** (Отменить) или <F9> — отменить предыдущее действие;
 - **Redo** (Вернуть) или <Shift>+<F9> — вернуть отмененное действие;
 - **Text** (Текст) или <T> — вставить текст в схему. Этот текст не оказывает какого-либо влияния на схему;
 - **SPICE Directive** (SPICE-директива) или <S> — вставить текст директивы в схему. Текст директивы, размещенный на схеме, одновременно помещается в список связей;
 - **SPICE Analysis** (SPICE-анализ) — ввести/редактировать директиву симуляции;
 - **Resistor** (Резистор) или <R> — вставить резистор в схему;
 - **Capacitor** (Конденсатор) или <C> — вставить конденсатор на схему;
 - **Inductor** (Индуктивность) или <L> — вставить индуктивность в схему;
 - **Diode** (Диод) или <D> — вставить диод в схему;
 - **Component** (Компонент) или <F2> — вставить новый компонент на схему. Команда выводит диалог, с помощью которого можно предварительно просматривать библиотеку и выбирать оттуда схемные элементы;
 - **Rotate** (Вращать) или <Ctrl>+<R> — вращать по часовой стрелке выбранный объект. Команда неактивна и окрашена серым, если нет выбранных объектов;

- **Mirror** (Отразить) или <Ctrl>+<E> — зеркально отразить выбранный объект. Команда неактивна и окрашена серым, если нет выбранных объектов;
- **Draw Wire** (Рисовать связь) или <F3> — рисовать электрическую связь. Чтобы начать линию связи, нужно щелкнуть левой кнопкой мышки. Каждый последующий щелчок левой кнопкой мышки позволяет изменить направление связи и подключить ее. Щелчок правой кнопкой мышки позволяет отменить текущую связь. Повторный щелчок правой кнопкой мышки позволяет выйти из режима рисования электрической связи;
- **Label Net** (Название цепи) или <F4> — определить название цепи. Таким образом можно целенаправленно присваивать имена различным цепям, а также делать эти названия видимыми;
- **Place GND** (Вставить GND) или <G> — вставить символ глобальной "земли";
- **Place BUS tap** (Вставить BUS-отвод) — вставить графический символ, имитирующий подключение к общей шине;
- **Delete** (Удалить) или <F5> — удалить объект или группу объектов. Чтобы удалить один объект, достаточно щелкнуть по нему левой кнопкой мышки. Для удаления группы объектов необходимо, удерживая левую кнопку мышки, поместить их в прямоугольную область выбора. Команда отменяется нажатием клавиши <Esc> или правой кнопки мышки;
- **Duplicate** (Дублировать) или <F6> — копировать объект или группу объектов. Чтобы копировать один объект, достаточно щелкнуть по нему левой кнопкой мышки, переместить копию на новое место и вставить, повторно щелкнув левой кнопкой мышки. Для копирования группы объектов необходимо, удерживая левую кнопку мышки, поместить их в прямоугольную область выбора. Возможно копирование объектов из одной схемы в другую, если обе схемы одновременно открыты. Для этого копируют объекты в первой схеме, затем делают активной вторую схему и вставляют объекты, используя комбинацию клавиш <Ctrl>+<V> или нажав иконку  на панели инструментов;
- **Move** (Переместить) или <F5> — переместить объект или группу объектов. Чтобы переместить один объект, достаточно щелкнуть по нему левой кнопкой мышки. Для перемещения группы объектов не-

обходимо, удерживая левую кнопку мышки, поместить их в прямоугольную область выбора. Команда отменяется нажатием клавиши <Esc> или правой кнопки мышки;

- **Paste** (Вставить) — вставить объекты, скопированные в другой схеме;

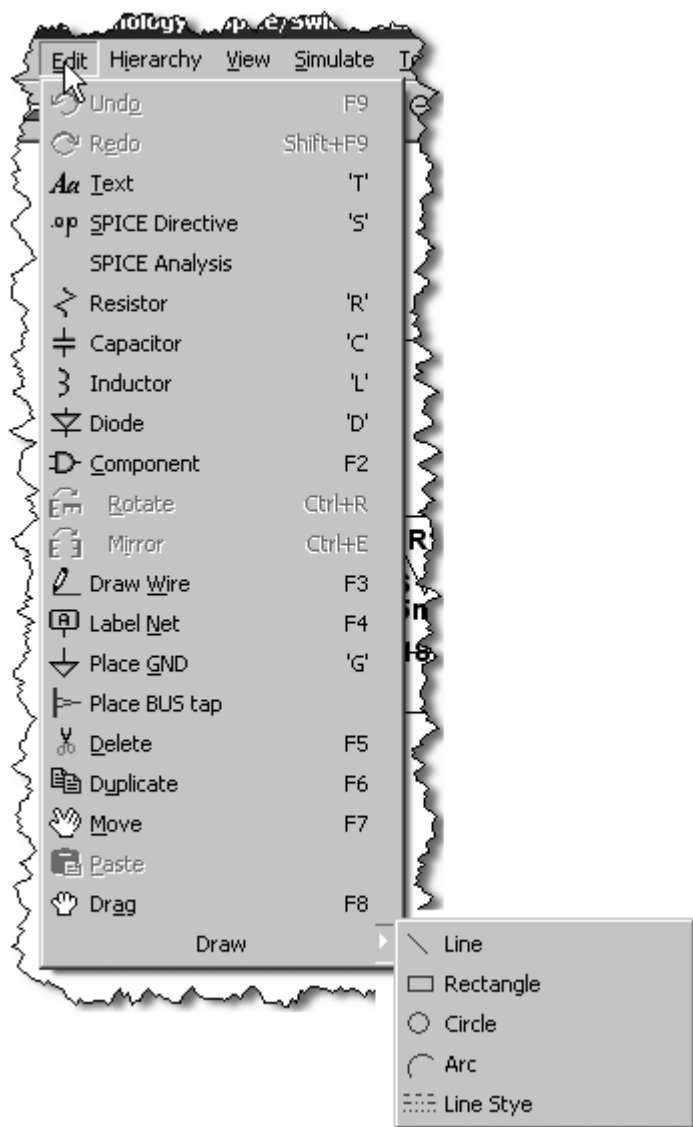


Рис. 5.3. Меню Edit

- **Drag** (Ташить) или <F8> — перетащить объект или группу объектов. Аналогична команде **Move**, но не разрывает электрических связей;
- **Draw** (Рисовать) — создавать изображения символа при помощи графических примитивов и текста:
 - ◇ **Line** (Линия) или <L> — выбрать рисование прямой линии;
 - ◇ **Rect** (Прямоугольник) или <R> — выбрать рисование прямоугольника;
 - ◇ **Circle** (Круг) или <C> — выбрать рисование круга;
 - ◇ **Arc** (Дуга) или <A> — выбрать рисование дуги;
 - ◇ **Line Style** (Стиль линии) — определить стиль линии;
 - ◇ **Text** (Текст) или <T> — выбрать ввод текста.

□ **Hierarchy** (Иерархия) — работа с иерархическими схемами (рис. 5.4):

- **Open this Sheet's Symbol** (Открыть символ этого листа) — открыть символ текущего листа схемы;
- **Create a New Symbol** (Создать новый символ) — запустить редактор символов, чтобы создать новый символ;
- **Create a New Sheet** (Создать новый лист) — открыть новый лист схемы.

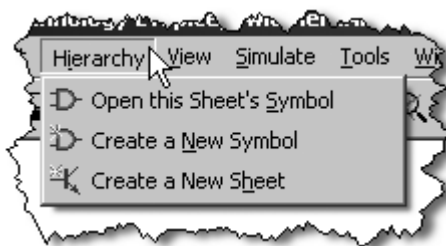


Рис. 5.4. Меню **Hierarchy**

□ **View** (Просмотр) — управление режимом просмотра изображения схемы (рис. 5.5):

- **Zoom Area** (Увеличить область) или <Ctrl>+<Z> — увеличить изображение схемы;
- **Zoom Back** (Уменьшить) или <Ctrl>+ — уменьшить изображение схемы;

- **Zoom to Fit** (Подогнать окно) — выбрать масштаб отображения схемы, обеспечивающий лучшее заполнение окна редактора схем;
- **Pan** (Панарамировать) — отметить точку схемы, которая должна быть в центре экрана;
- **Show Grid** (Показать сетку) или <Ctrl>+<G> — включить/выключить видимость сетки, к которой привязываются графические элементы и текст;
- **Mark Unconn. Pins** (Отметить неподключенные ножки) или <U> — включить/выключить видимость неподключенных выводов схемных компонентов;
- **Mark Text Anchors** (Отметить привязки текста) или <A> — включить/выключить видимость точек привязки текста;
- **Bill of Materials** (Список материалов) — перечень комплектующих схемы:
 - ◇ **Show on Schematic** (Показать на схеме) — поместить на схеме;
 - ◇ **Paste to clipboard** (Вставить в буфер обмена) — вставить в буфер обмена;
- **Efficiency Report** (Отчет эффективности) — перечень активных потерь в схеме, а также общий КПД:
 - ◇ **Show on Schematic** (Показать на схеме) — поместить на схеме;
 - ◇ **Paste to clipboard** (Вставить в буфер обмена) — вставить в буфер обмена;
- **SPICE Netlist** (Список соединений) — показать в отдельном окне список соединений текущей схемы;
- **SPICE Error Log** (Журнал ошибок) — вывести в отдельном окне содержимое LOG-файла;
- **Visible Traces** (Видимость трасс) — показать перечень всех узлов и цепей схемы;
- **Autorange Y-axis** (Автоматическое масштабирование оси Y) — автоматическая установка масштаба отображения по оси Y;
- **Marching Waves** (Вывод диаграмм) — вывод диаграмм в окне плоттера:
 - ◇ **(Re-)Start** (Возобновить-Начать) — начать или возобновить;
 - ◇ **Pause** (Пауза) — приостановить;

- **Set Probe Reference** (Установить опору измерения) — указать узел схемы, относительно которого будут делаться все измерения;
- **Status Bar** (Панель состояния) — вывести/убрать панель состояния;



Рис. 5.5. Меню View

- **Toolbar** (Панель инструментов) — вывести/убрать панель инструментов;
- **Windows Tabs** (Панели окон) — вывести/убрать панель вложенных окон.

- **Simulate** (Моделирование) — управление процессом моделирования (рис. 5.6):
- **Run** (Запустить) — запустить моделирование;
 - **Pause** (Пауза) — приостановить моделирование;
 - **Halt** (Остановка) — остановить моделирование;
 - **Clear Waveforms** (Очистить диаграммы) — очистить данные моделирования, накопленные к данному моменту;
 - **Efficiency Calculation** (Калькулятор эффективности) — калькулятор эффективности:
 - ◇ **Mark Start** (Отметить начало) — отметить начало мерного участка;
 - ◇ **Mark End** (Отметить конец) — отметить конец мерного участка;
 - **Turn off Semicond.cap.** (Выключить конденсаторы полупроводников) — выключить конденсаторы в моделях полупроводников. Эта опция позволяет отключить потери коммутации;
 - **Control Panel** (Панель управления) — вызвать панель управления (см. разд. 5.4);
 - **Edit Simulation Cmd** (Редактировать команду моделирования) — вызвать панель **Edit Simulation Command** для редактирования директив моделирования (см. главу 4).



Рис. 5.6. Меню **Simulate**

❑ **Tools** (Инструменты) — различные инструменты:

- **Copy bitmap to Clipboard** (Копировать битовое поле в буфер обмена) — копировать изображение активного окна программы LTspice в буфер обмена;
- **Write to a .wmf file** (Записать в wmf-файл) — записать изображение активного окна программы LTspice в графический файл формата WMF;
- **Control Panel** (Панель управления) — вызвать панель управления (см. разд. 5.4);
- **Color Preferences** (Установки цветов) — установка цветов (см. разд. 5.5);
- **Sync Release** (Синхронизировать версию) — запустить обновление программы LTspice через Интернет;
- **Export Netlist** (Экспортировать список связей) — экспортировать список связей (см. разд. 5.6).

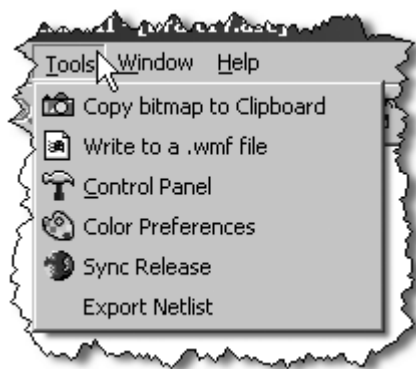


Рис. 5.7. Меню Tools

❑ **Windows** (Окна) — управление окнами программы LTspice:

- **Tile Horizontally** (Расположить горизонтально) — расположить горизонтально;
- **Tile Vertically** (Расположить вертикально) — расположить вертикально;
- **Cascade** (Каскад) — расположить каскадом;

- **Close Everything** (Заккрыть все) — закрыть все окна. Если в какое-то из окон были внесены изменения, то перед закрытием будет предложено сохранить сделанные изменения;
- **Arrange Icons** (Разместить иконки) — привести в порядок иконки.



Рис. 5.8. Меню Windows

□ **Help** (Помощь) — информационное меню:

- **Help Topics** (Темы помощи) или <F1> — встроенное руководство по использованию программы LTspice IV;
- **About LTspice** (Об LTspice) — информация о программе.

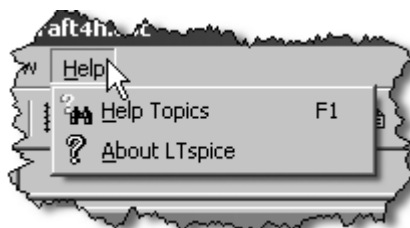






























Рис. 5.9. Меню Help











5.1.2. Панель инструментов редактора схем

Панель инструментов можно выводить/убирать при помощи команды меню **View** (Просмотр) | **Toolbar** (Панель инструментов).

На этой панели, в виде иконок, расположены наиболее часто используемые команды:

- ☐  — начать создание новой схемы;
- ☐  — открыть для редактирования существующую схему;
- ☐  — сохранить на диск созданную или отредактированную схему;
- ☐  — вызвать панель управления;
- ☐  — запустить моделирование;
- ☐  — остановить моделирование;
- ☐  — увеличить изображение схемы;
- ☐  — отметить точку схемы, которая должна быть в центре экрана;
- ☐  — уменьшить изображение схемы;
- ☐  — выбрать масштаб отображения схемы, обеспечивающий лучшее заполнение окна редактора схем;
- ☐  — показать перечень всех узлов и цепей схемы;
- ☐  — автоматическая установка масштаба отображения по оси Y;
- ☐  — расположить окна горизонтально;
- ☐  — расположить окна каскадом;
- ☐  — закрыть все окна. Если в какое-то из окон были внесены изменения, то перед закрытием будет предложено сохранить сделанные изменения;
- ☐  — удалить объект или группу объектов. Чтобы удалить один объект, достаточно щелкнуть по нему левой кнопкой мышки. Для удаления группы объектов необходимо, удерживая левую кнопку мышки, поместить их в прямоугольную область выбора. Команда отменяется нажатием клавиши <Esc> или правой кнопки мышки;

- ☐  — копировать объект или группу объектов. Чтобы копировать один объект, достаточно щелкнуть по нему левой кнопкой мышки, переместить копию на новое место и вставить, повторно щелкнув левой кнопкой мышки. Для копирования группы объектов необходимо, удерживая левую кнопку мышки, поместить их в прямоугольную область выбора. Возможно копирование объектов из одной схемы в другую, если обе схемы одновременно открыты. Для этого копируют объекты в первой схеме, затем делают активной вторую схему и вставляют объекты, используя комбинацию клавиш <Ctrl>+<V> или нажав иконку  на панели инструментов;
- ☐  — вставить объекты, скопированные в другой схеме;
- ☐  — позволяет найти объект или объекты по имени. После выполнения команды объекты, имя которых включает заданный текст, подсвечиваются определенным цветом;
- ☐  — настройка печати. Можно выбрать принтер, а также размер и ориентацию листа;
- ☐  — печатать область активного окна, отображенного на экране;
- ☐  — рисовать электрическую связь. Чтобы начать линию связи, нужно щелкнуть левой кнопкой мышки. Каждый последующий щелчок левой кнопкой мышки позволяет изменить направление связи и подключить ее. Щелчок правой кнопкой мышки позволяет отменить текущую связь. Повторный щелчок правой кнопкой мышки позволяет выйти из режима рисования электрической связи;
- ☐  — вставить символ глобальной "земли";
- ☐  — определить название цепи. Таким образом можно целенаправленно присваивать имена различным цепям, а также делать эти названия видимыми;
- ☐  — вставить резистор в схему;
- ☐  — вставить конденсатор на схему;
- ☐  — вставить индуктивность в схему;

- ☐  — вставить диод на схему;
- ☐  — вставить новый компонент на схему. Команда выводит диалог, с помощью которого можно предварительно просматривать библиотеку и выбирать оттуда схемные компоненты;
- ☐  — переместить объект или группу объектов. Чтобы переместить один объект, достаточно щелкнуть по нему левой кнопкой мышки. Для перемещения группы объектов необходимо, удерживая левую кнопку мышки, поместить их в прямоугольную область выбора. Команда отменяется нажатием клавиши <Esc> или правой кнопки мышки;
- ☐  — перетащить объект или группу объектов. Аналогична команде **Move** (Переместить), но не разрывает электрических связей;
- ☐  — отменить предыдущее действие;
- ☐  — вернуть отмененное действие;
- ☐  — вращать по часовой стрелке выбранный объект. Команда неактивна и окрашена серым, если нет выбранных объектов;
- ☐  — зеркально отразить выбранный объект. Команда неактивна и окрашена серым, если нет выбранных объектов;
- ☐  — вставить текст в схему. Этот текст не оказывает какого-либо влияния на схему;
- ☐  — вставить текст директивы в схему. Текст директивы, размещенный на схеме, одновременно помещается в список связей.

5.1.3. Панель состояния редактора схем

Панель состояния находится в нижней части окна редактора схем. При помощи команды меню **View** (Просмотр) | **Status Bar** (Панель состояния) эту панель можно выводить или убирать. Панель служит для отображения различной информации.

В правой части панели отображается тип вычислителя симулятора LTspice. Пустое поле соответствует типу **Normal** (Нормальный) и надпись **Alternate** соответствует типу **Alternate** (Альтернативный).

В левой части панели выводится информация, которая зависит от режима работы редактора. В режиме редактирования и анализа результатов симуляции там отображается название объекта, на который направлен курсор мышки. В режиме моделирования там отображается информация, касающаяся этого процесса.

5.2. Размещение компонентов в окне редактора схем

Часто используемые компоненты, такие как резисторы, конденсаторы и индуктивности, могут быть выбраны нажатием соответствующей кнопки на панели инструментов.

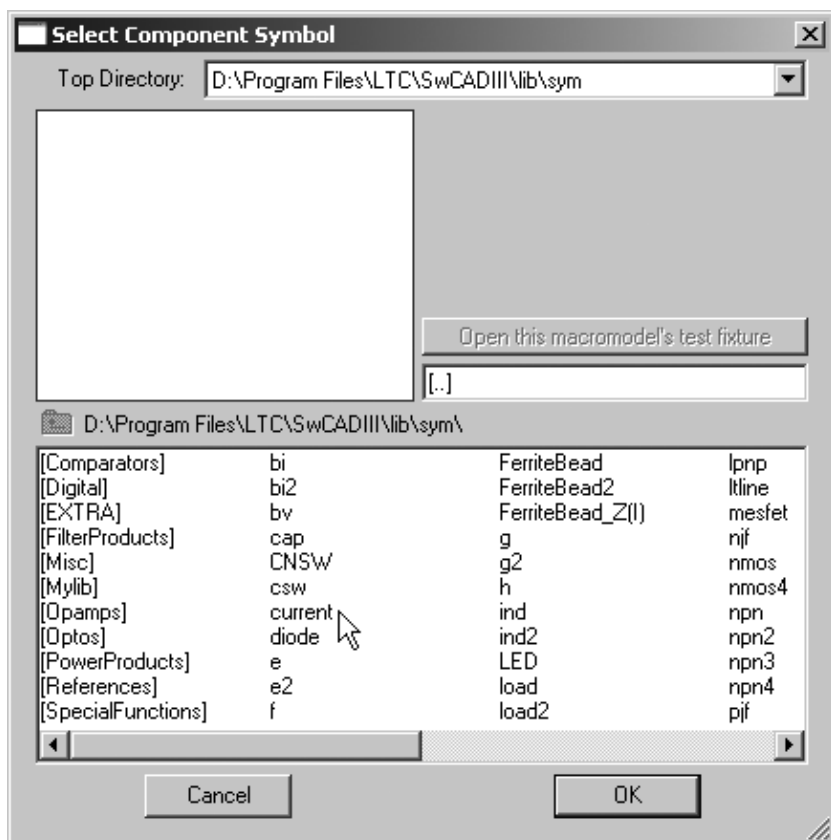



Рис. 5.10. Окно выбора компонентов из библиотеки программы LTspice

Для выбора остальных компонентов можно использовать команду меню **Edit** (Редактировать) | **Component** (Компонент). Результатом действия команды будет появление диалогового окна **Select Component Symbol** (Выбрать символ компонента), изображенного на рис. 5.10, с помощью которого можно предварительно просматривать библиотеку и выбирать оттуда символы схемных компонентов.

После того как компонент выбран из библиотеки и размещен в окне редактора схем, он может быть отредактирован несколькими различными способами.

5.2.1. Редактирование параметров компонента

Для редактирования параметров компонента необходимо навести на его символ курсор мышки, и, когда тот превратится из крестика в указательный палец , щелкнуть правой кнопкой.

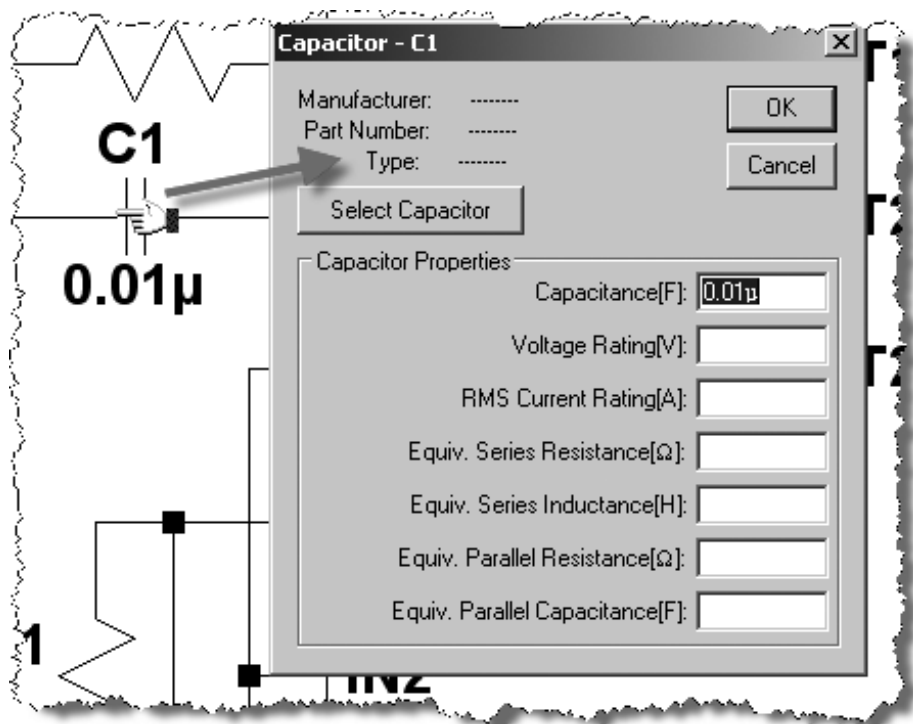


Рис. 5.11. Окно редактирования параметров компонента

В результате появится окно редактирования компонента (рис. 5.11), в котором можно изменить и сохранить его числовые параметры.

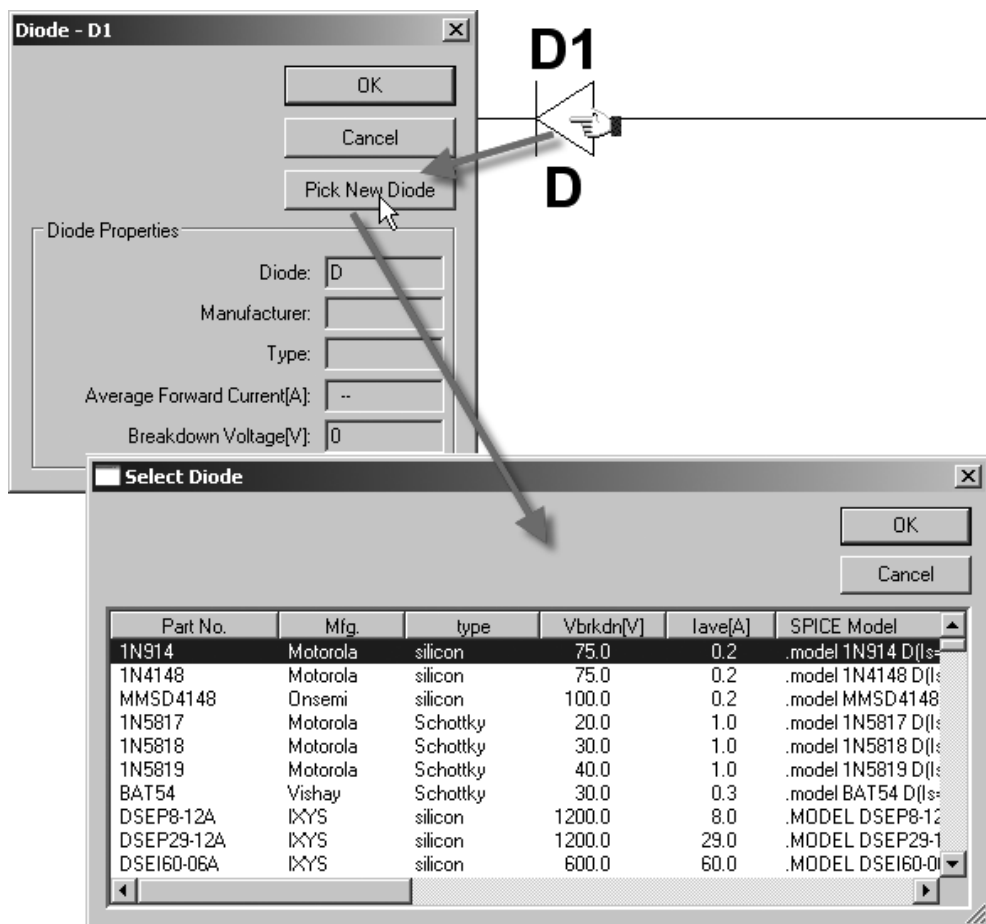


Рис. 5.12. Окно доступа
к библиотекам компонента

Для некоторых типов компонентов, таких как конденсаторы, индуктивности, диоды, биполярные транзисторы, MOSFET-транзисторы и JFET-транзисторы, прямо из окна редактирования можно получить доступ к соответствующим библиотечным базам данных (рис. 5.12).

5.2.2. Редактирование видимых атрибутов компонента

Все видимые атрибуты компонента могут быть отредактированы. Для этого необходимо навести на требуемый атрибут курсор мышки, и, когда тот превратится из крестика в двутавр, щелкнуть правой кнопкой. В результате появится текстовое окно (рис. 5.13), в котором можно отредактировать, а затем сохранить атрибут.

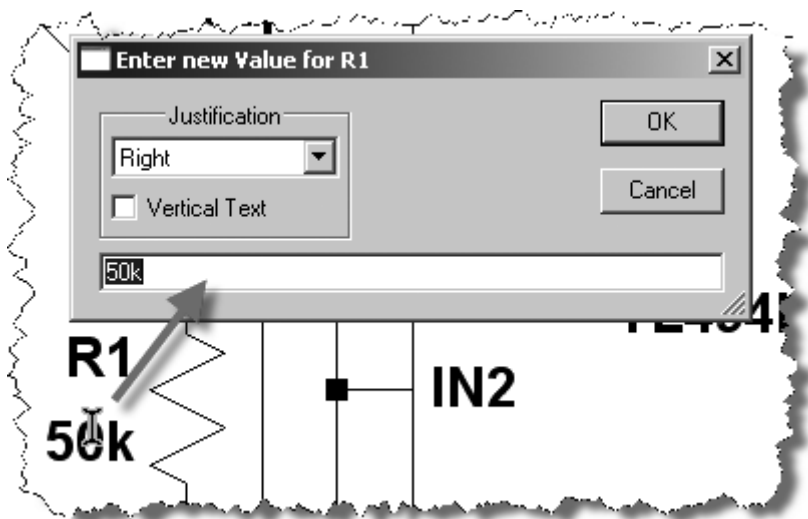


Рис. 5.13. Прямое редактирование видимого атрибута компонента

5.2.3. Редактирование всех атрибутов компонента

Если, удерживая клавишу <Ctrl>, навести курсор мышки на символ компонента и щелкнуть правой кнопкой мышки, то появится диалоговое окно (рис. 5.14), которое будет отображать все доступные атрибуты компонента. В этом окне можно редактировать атрибуты, а также включать и выключать их видимость на схеме.

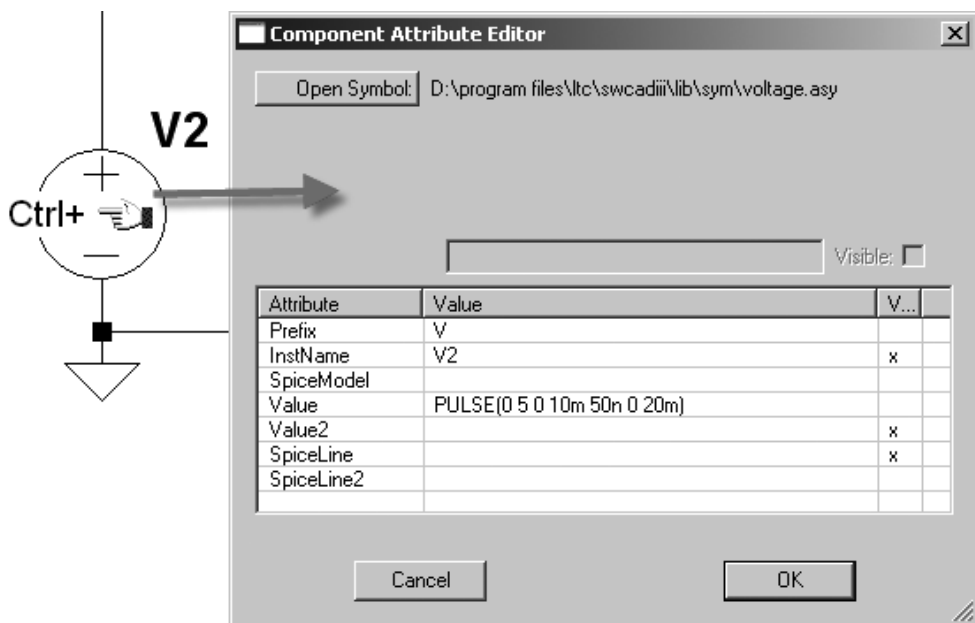



Рис. 5.14. Окно редактирования атрибутов компонента

Атрибут **Prefix**, определяющий тип схемного компонента, автоматически дублируется в качестве первого символа атрибута **InstName**, являющегося позиционным обозначением компонента. Однако атрибут **InstName** можно отредактировать, чтобы позиционное обозначение соответствовало принятым схемотехническим стандартам. Например, биполярный транзистор, имеющий по умолчанию позиционное обозначение Q1, может быть переименован в VT1. Если первая буква позиционного обозначения отличается от стандартного префикса, то в соответствующей строке списка соединений префикс и позиционное обозначение будут разделены символом "\$". Например, для рассмотренного случая с биполярным транзистором это будет выглядеть как Q\$VT1.

Атрибуты **SpiceModel**, **Value**, **Value2**, **SpiceLine** и **SpiceLine2** формируют строку текстового описания компонента в формате SPICE списка соединений. В результате генерируется строка, которая выглядит следующим образом:

<Имя> узел1 узел2 [...] <SpiceModel> <Value> <Value2> <SpiceLine>
<SpiceLine2>.

5.3. Соединение компонентов и наименование цепей

Для создания электрических связей между выводами компонентов можно использовать команду меню **Edit** (Редактировать) | **Draw Wire** (Рисовать связь), функциональную клавишу <F3> или иконку  на панели инструментов. Чтобы начать линию связи, нужно щелкнуть левой кнопкой мышки. Каждый последующий щелчок левой кнопкой мышки позволяет изменить направление связи и подключить ее. Щелчок правой кнопкой мышки позволяет отменить текущую связь. Повторный щелчок правой кнопкой мышки позволяет выйти из режима рисования электрической связи.

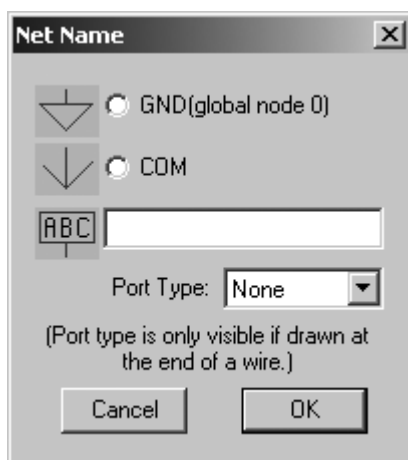




Рис. 5.15. Окно присвоения имени цепи

Цепи, связанные между собой линией электрической связи, образуют узел, которому автоматически присваивается уникальное имя. Цепи и, соответственно, узлу, соединенному с символом  "земли", присваивается имя 0. Узел 0 является глобальной "землей". Все компоненты схемы должны иметь гальваническую связь с этим узлом, пусть даже через очень большое сопротивление, иначе будет генерироваться ошибка симулятора. По умолчанию все измерения в схеме делаются относительно узла 0.

При необходимости пользователь на свое усмотрение может присваивать имена отдельным цепям. Для этого можно использовать команду меню **Edit** (Редактировать) | **Label Net** (Название цепи), функциональную клавишу <F4> или иконку  на панели инструментов. В результате появится окно **Net Name** (Имя цепи), изображенное на рис. 5.15.

Требуемое имя цепи необходимо ввести в строке **ABC**.

Кроме символа глобальной "земли" в LTspice предусмотрен специальный графический символ для узла **COM**. Однако этот узел не является глобальным и служит лишь для общего узла, не связанного с землей.

Приставка "\$G_" перед именем узла, делает этот узел глобальным. Например, \$G_VDD является глобальным и имеет один и тот же потенциал, в независимости от того, где он встречается в схемной иерархии.

Для большей наглядности порой необходимо показывать, что некоторая цепь является входной, выходной или двунаправленной. Соответствующее графическое изображение для имени цепи можно получить с помощью указателя **Port type** (Тип порта):

- ☐ **None** — без направления;
- ☐ **Input** — входная цепь;
- ☐ **Output** — выходная цепь;
- ☐ **Bi-Direct** — двунаправленная цепь.

Указатель **Port Type** на процессы моделирования не влияет.

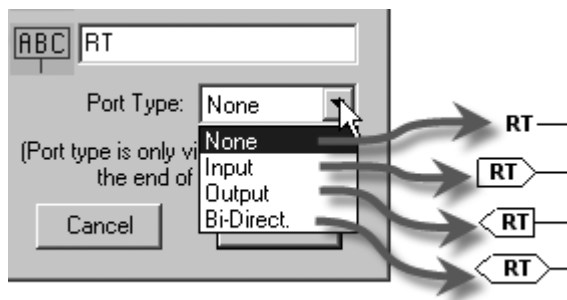


Рис. 5.16. Указание наименования и направления цепей

5.4. Меню *Control Panel*

Меню **Control Panel** (Панель управления), изображенное на рис. 5.17, активируется при помощи команды **Tools** (Инструменты) | **Control Panel** (Панель управления). Меню предназначено для конфигурирования программы LTspice.

На каждой вкладке меню присутствует кнопка **Reset to Default Values** (Сбросить в значения, принятые по умолчанию), которая позволяет сбросить настройки данной вкладки в состояние, заданное по умолчанию. Установки параметров, помеченных символом "*", запоминаются между отдельными вызовами программы.

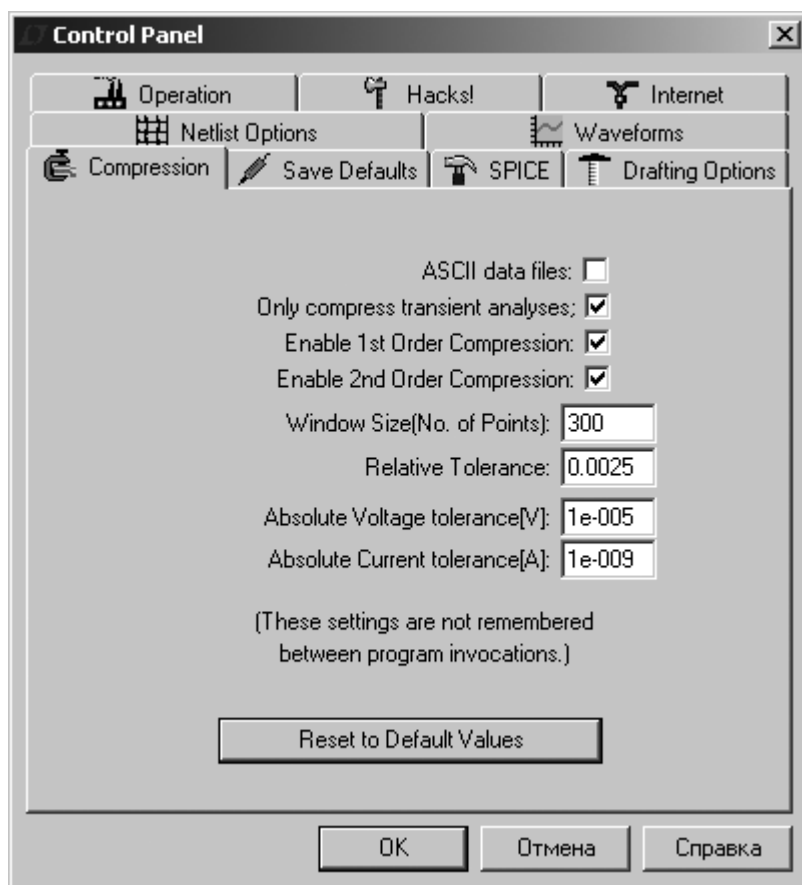


Рис. 5.17. Меню **Control Panel**

5.4.1. Вкладка *Compression*

Для экономии дискового пространства LTspice сжимает данные моделирования перед сохранением в файл. В случае максимального сжатия объем выходного файла может быть уменьшен в 50 раз (рис. 5.18). Но следствием такого сжатия будет потеря информативности. Вкладка **Compression** (Сжатие) позволяет определять потерю информативности, а следовательно и степень сжатия выходного файла.

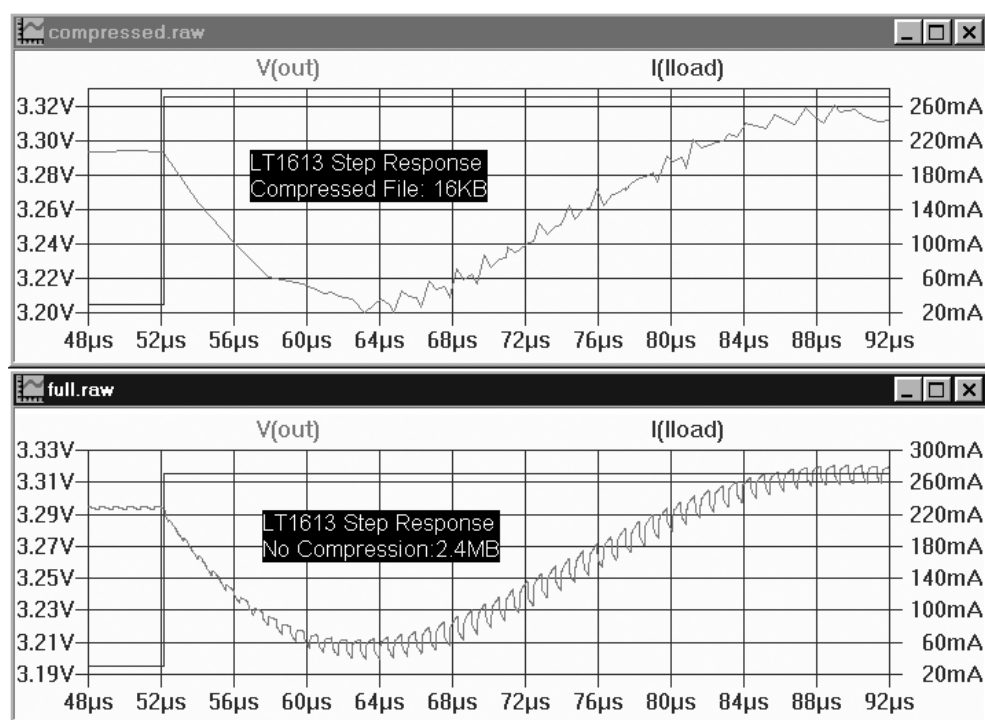


Рис. 5.18. Размер выходного файла
в зависимости от степени сжатия

Вкладка содержит следующие опции и поля настройки:

- ☐ **ASCII data files** — опция позволяет создавать выходной читабельный ASCII-файл данных. Для такого типа файлов сжатие не производится;
- ☐ **Only compress transient analyses** — опция позволяет делать сжатие только для результатов TRAN-анализа;

- ☐ **Enable 1st Order Compression** — разрешить первый порядок сжатия;
- ☐ **Enable 2nd Order Compression** — разрешить второй порядок сжатия;
- ☐ **Window Size(No. of Points)** — максимальное число точек, которые могут быть сжаты в две конечные точки;
- ☐ **Relative Tolerance** — относительная ошибка, позволенная между сжатыми и несжатыми данными;
- ☐ **Absolute Voltage tolerance[V]** — абсолютная ошибка напряжения, которую может допустить алгоритм сжатия;
- ☐ **Absolute Current tolerance[A]** — абсолютная ошибка тока, которую может допустить алгоритм сжатия.

Эти настройки сделаны доступными в основном для диагностических целей и, чтобы стимулировать использование настроек, заданных по умолчанию, сделанные здесь изменения не запоминаются между отдельными вызовами программы. Постоянные изменения в настройках сжатия можно определить при помощи параметров `plotreltol`, `plotvntol`, `plotabstol` и `plotwinsize` директивы `.OPTIONS`, размещенной на схеме.

5.4.2. Вкладка *Save Default*

Настройки **Save Default** (Сохранять по умолчанию), изображенные на рис. 5.19, используются, если пользователь явно не указывает, какие узловые напряжения должны быть сохранены в процессе моделирования.

Вкладка содержит следующие опции настройки.

- ☐ **Save Device Currents[*]** (Сохранять токи устройств) — позволяет строить диаграммы токов. Выбор опции также необходим, если предполагается строить диаграммы потерь.
- ☐ **Save Subcircuit Node Voltages[*]** (Сохранять узловые напряжения под-схем) — позволяет строить диаграммы узловых напряжений в подсхеме. Выбор этой опции позволяет контролировать узловые потенциалы в иерархических схемах.
- ☐ **Save Subcircuit Device Currents[*]** (Сохранять токи устройств под-схем) — позволяет строить диаграммы токов в подсхемах. Выбор этой опции позволяет контролировать токи в иерархических схемах.

- ❑ **Don't save Ib(), Ie(), Is(), Ig()[*]** — позволяет сохранять только коллекторные токи транзисторов, что способствует снижению размера файла данных. Выбор этой опции полезен в проектах, где важны только коллекторные токи транзисторов. При этом из-за недостатка информации расчет потерь на транзисторах будет некорректным.

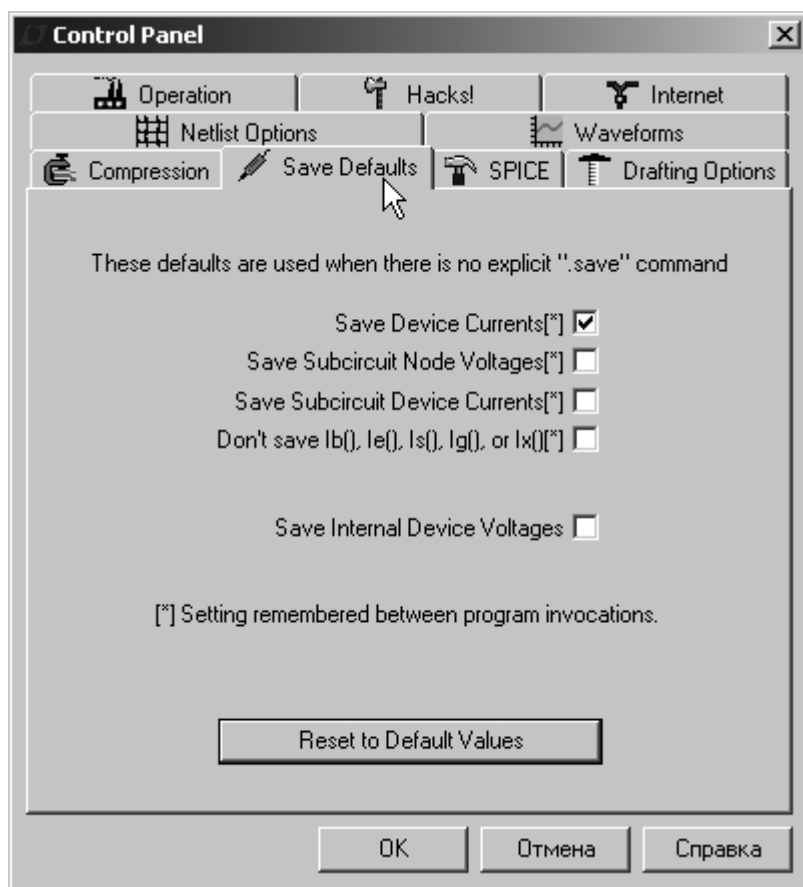


Рис. 5.19. Настройки вкладки **Save Default**

- ❑ **Save Internal Device Voltages** (Сохранять внутренние напряжения устройств) — позволяет строить диаграммы напряжений внутренних устройств. Для пользователей эта опция не имеет особого смысла, т. к. в основном используется разработчиками программы.

5.4.3. Вкладка **SPICE**

Вкладка **SPICE** (рис. 5.20) позволяет настраивать различные установки симулятора LTspice по умолчанию.

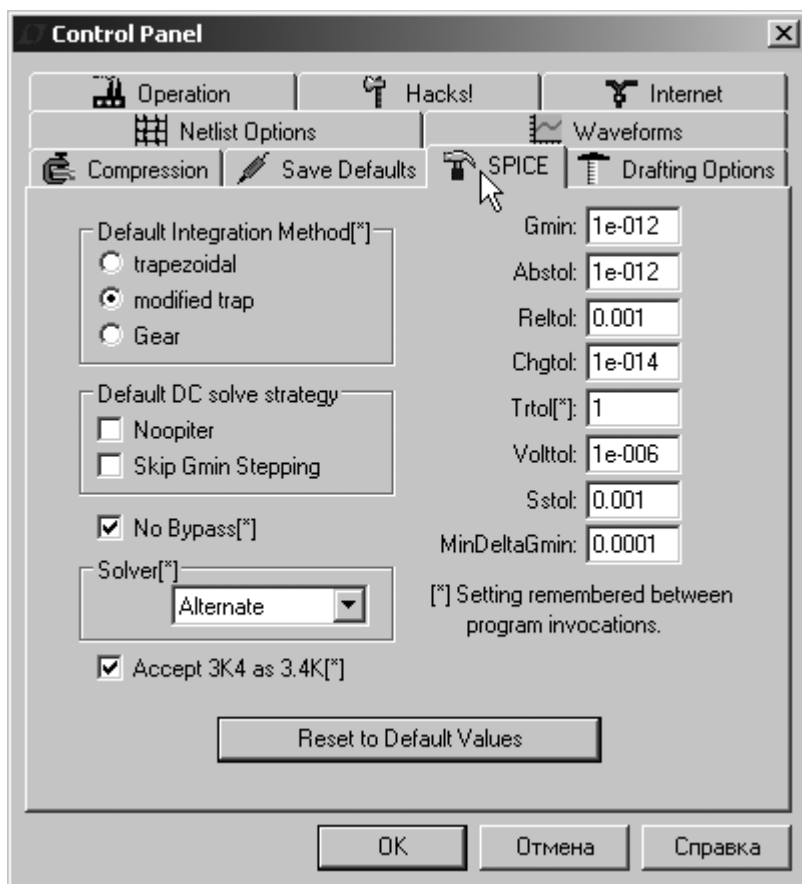


Рис. 5.20. Настройки вкладки **SPICE**

В правой части вкладки **SPICE** перечислены параметры моделирования, которые уже рассматривались при описании директивы `.OPTIONS` (см. главу 4). Параметры **Gmin**, **Abstol**, **Reltol**, **Chgtol**, **Volltol**, **Sstol** и **MinDeltaGmin** не запоминаются между отдельными запусками программы, но могут быть изменены при помощи директивы `.OPTIONS` для каждой конкретной симуляции.

В отличие от указанных параметров, изменения параметра **Trtol** сохраняются и при последующих запусках программы.

В большинстве SPICE-симуляторов параметр **Trtol** по умолчанию равен 7. В LTspice этот параметр по умолчанию равен 1, что в большей степени подходит для моделирования импульсных источников питания. Увеличив значение **Trtol** можно, за счет некоторого ухудшения точности, в два раза увеличить скорость моделирования. Если моделирование все равно идет слишком долго или возникают ошибки сходимости, то проблему можно попытаться решить, установив значение **Reltol** равным 0.01, что уменьшит количество итераций, необходимых для поиска решения. С этой же целью можно несколько увеличить значения **Abstol** и **Volttol**, т. к. обычно не требуется получить решение с точностью до $1 \cdot 10^{-12}$ А и $1 \cdot 10^{-6}$ В.

В области **Default Integration Method** (Метод интегрирования, принятый по умолчанию) можно выбрать метод интегрирования, который будет использоваться по умолчанию вычислителем симулятора LTspice:

- ☐ **trapezoidal** — трапецеидальный;
- ☐ **modified trap** — модифицированный трапецеидальный;
- ☐ **Gear** — метод Гира.

Метод интегрирования Гира требует больше времени, но более устойчив по сравнению трапецеидальными методами. Использование этого метода может быть полезным при анализе цепей, в которых присутствуют высокочастотные колебания или обратные связи.

В области **Default DC solve strategy** (Стратегия поиска рабочей точки, принятая по умолчанию) можно для текущего запуска программы выбрать стратегию поиска рабочей точки:

- ☐ **Noopiter** — перейти напрямую к подбору **Gmin**;
- ☐ **Skip Gmin Stepping** — пропустить пошаговый подбор **Gmin**.

По идее LTspice содержит две полные версии SPICE. Одна версия с *нормальным* вычислителем (Normal), а другая с *альтернативным* (Alternate). Альтернативный вычислитель обеспечивает меньшую ошибку округления. При этом он работает в два раза медленнее нормального, но обеспечивает в 1000 раз большую внутреннюю точность вычисления и лучшую устойчивость. Не существует параметра директивы .OPTIONS, способного выбрать тип вычислителя. Поэтому выбрать тип вычислителя можно только в области **Solver** (Вычислитель) вкладки **SPICE**.

Выбор опции **Accept 3K4 as 3.4K** позволит LTspice понимать десятичную запись величин, где множитель заменяет десятичную точку. Например, запись 3k4 будет воспринята как число 3.4к. Подобный принцип обозначения номинала очень часто используется для маркировки отечественных резисторов.

5.4.4. Вкладка *Drafting Options*

Вкладка **Drafting Options** (Опции рисования), изображенная на рис. 5.21, используется для настройки рисования, ввода текста и содержит следующие опции и настройки:

- ☐ **Allow direct component pin shorts** (Позволять напрямую закорачивать выводы компонента) — не удалять связь, проходящую через компонент и закорачивающую его выводы. Обычно такие связи автоматически удаляются, что позволяет врезать компоненты в существующие электрические связи;
- ☐ **Automatically scroll the view** (Автоматически прокручивать обзор) — автоматически прокручивать изображение во время редактирования схемы, если курсор приближается к его краю;
- ☐ **Mark text Justification anchor points** (Отмечать точки привязки текста) — использовать маленький кружок для индикации точки привязки текстового блока;
- ☐ **Mark unconnected pins** (Отмечать неподключенные ножки) — использовать маленький квадрат для индикации неподключенных выводов компонентов;
- ☐ **Show schematic grid points** (Показывать точки сетки на схеме) — начинать работу редактора схемы с разрешенной видимостью сетки;
- ☐ **Orthogonal snap wires** (Прямоугольные изломы связей) — при включенной опции связи могут тянуться только в горизонтальном или вертикальном направлениях. При этом они могут начинаться, заканчиваться, а также менять направление только в узлах сетки. В присутствии нажатой клавиши <Ctrl> связи можно тянуть в любом направлении;
- ☐ **Ortho drag mode** (Режим произвольного рисования) — при включенной опции связи могут тянуться в любом направлении. При этом они могут начинаться, заканчиваться, а также менять направление только в узлах

сетки. В присутствии нажатой клавиши <Ctrl> связи можно тянуть только в горизонтальном или вертикальном направлениях;

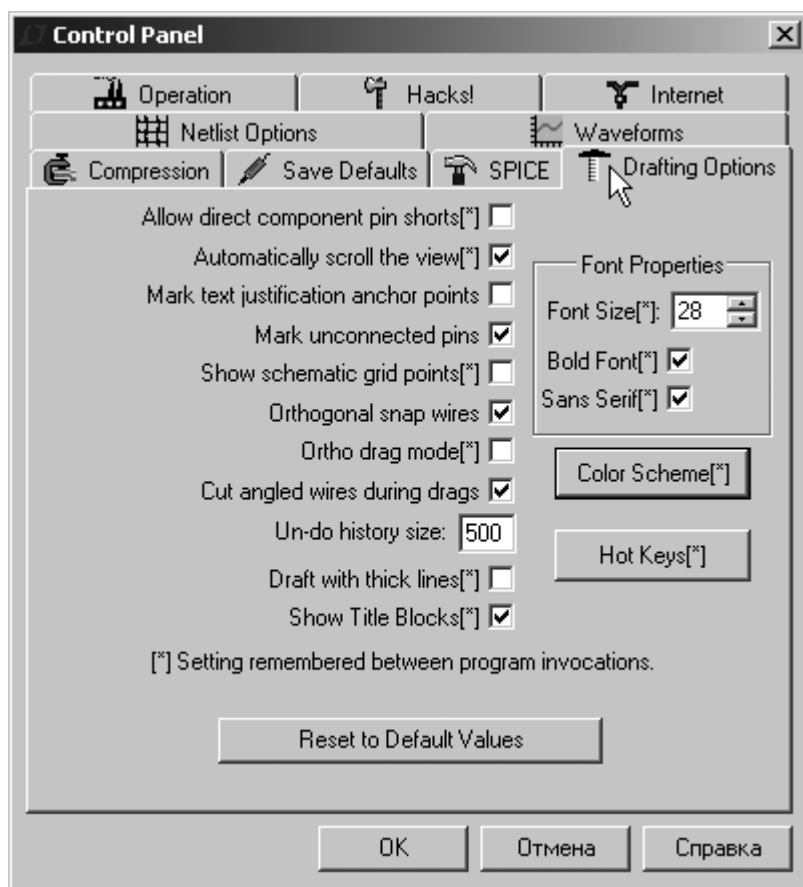


Рис. 5.21. Вкладка настройки рисования

- ☐ **Cut angled wires during drags** (Резать угловые связи в течение рисования) — при использовании команды **Drag** (Тащить) неперпендикулярную связь можно сломать, щелкнув по ней левой кнопкой мышки;
- ☐ **Un-do history size** — установить размер буфера редактирования/восстановления;
- ☐ **Draft with thick lines** (Рисовать толстыми линиями) — увеличить ширину всех линий. Полезно при создании картинок для публикации;

☐ **Show Title Block** (Показать титульный блок) — для внутреннего использования.

В области **Font Properties** можно определить свойство отображаемого шрифта:

- ☐ **Font Size** — размер шрифта;
- ☐ **Bold Font** — жирный шрифт;
- ☐ **Sans Serif** — гротесковый шрифт.

Кнопка **Color Schems** (Цвета редактора схем) позволяет вызвать меню настройки цветов редактора, которое описано в *разд. 5.5*.

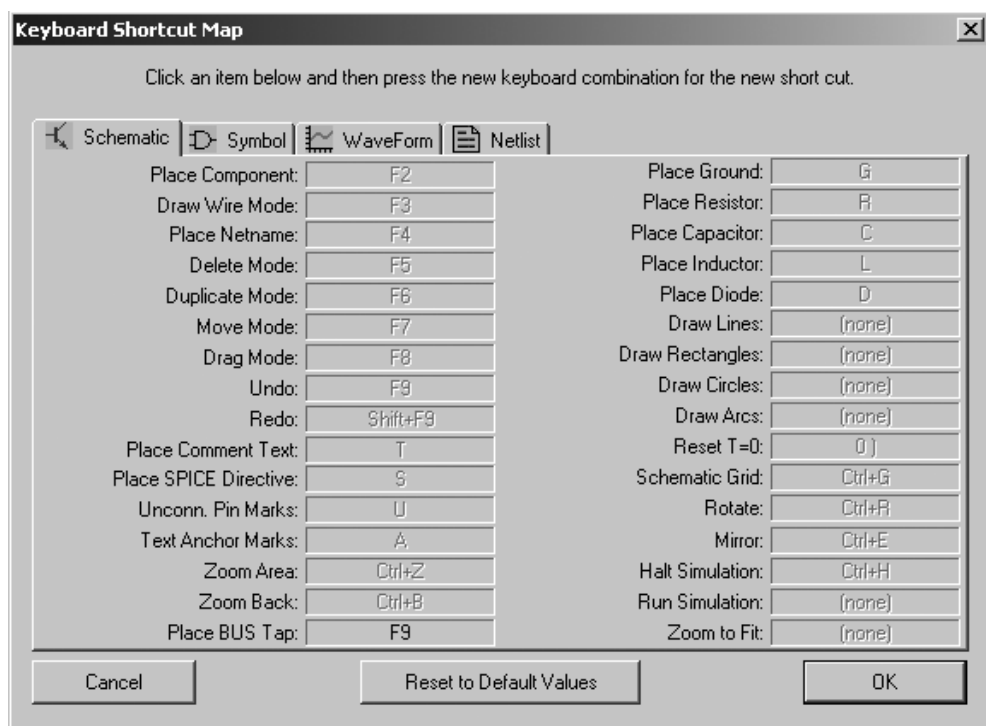


Рис. 5.22. Окно настройки клавиатурных сокращений

Кнопка **Hot Keys** (Горячие клавиши) позволяет вызвать окно **Keyboard Shortcut Map** (Карта быстрых клавиш), изображенное на рис. 5.22, предназначенное для программирования клавиатурных сокращений для большинства команд. Чтобы редактировать сокращение, нужно щелкнуть левой кноп-

кой мышки по требуемой команде, а затем ввести новую клавишу или сочетание клавиш. Чтобы удалить сокращение, нужно выделить требуемую команду, а затем нажать клавишу **Delete** (Удалить).

5.4.5. Вкладка *Netlist Options* — опции списка соединений

Вкладка **Netlist Options** (Опции списка соединений), изображенная на рис. 5.23, позволяет настраивать некоторые опции, касающиеся списка соединений.

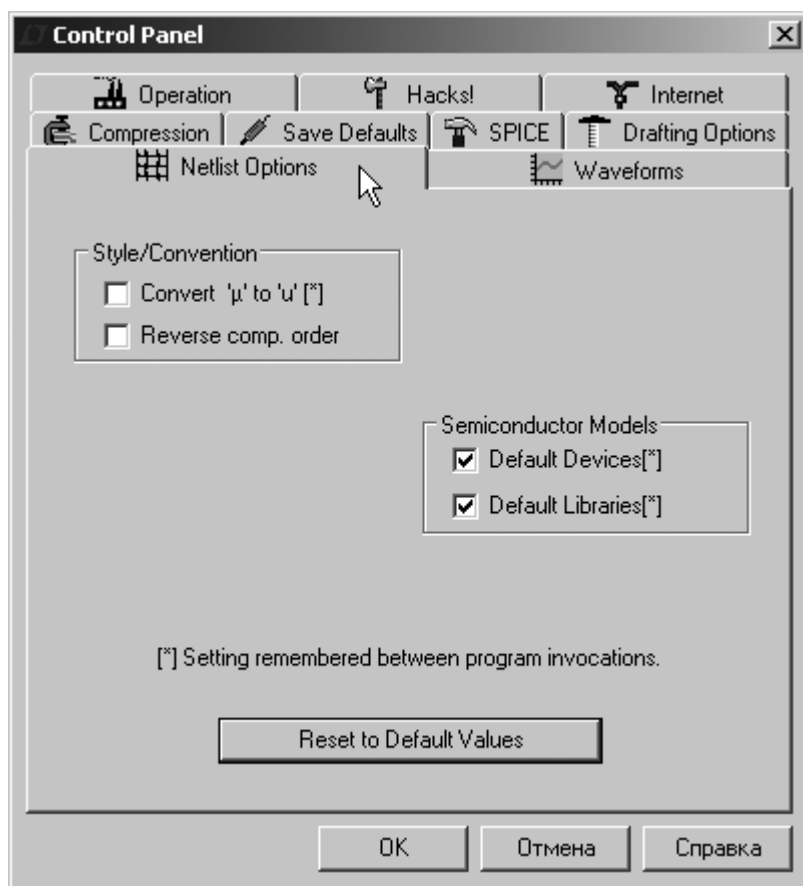


Рис. 5.23. Вкладка **Netlist Options**

Опции области **Style/Convention** (Стиль/Соглашение):

- ☐ **Convert 'μ' to 'u'** — заменяет все символы "μ" на "u". Используется, если текущая версия установленной операционной системы Windows не отображает символы греческого алфавита;
- ☐ **Reverse comp. order** — схемные компоненты обычно вносятся в список связей в порядке, в котором они были добавлены в схему. Если установить галочку, то этот порядок будет изменен на обратный.

Опции области **Semiconductor Models** (Модели полупроводников):

- ☐ **Default Devices** (Устройства, принятые по умолчанию) — всякий раз, когда в схеме используется диод или транзистор, LTspice по умолчанию включает в список соединений строки **.model D D**, **.model NMOS NMOS**, **.model NPN NPN** и т. п. Снятие галочки подавляет включение этих строк;
- ☐ **Default Libraries** (Библиотеки, принятые по умолчанию) — всякий раз, когда в схеме используется диод или транзистор, LTspice по умолчанию включает в список соединений директивы **.lib**, указывающие на библиотеки, принятые по умолчанию. Снятие галочки подавляет включение этих ссылок.

5.4.6. Вкладка *Waveforms*

Вкладка **Waveforms** (Диаграммы), изображенная на рис. 5.24, позволяет настраивать некоторые параметры графической информации, выводимой в окне плоттера.

Вкладка **Waveforms** содержит следующие опции и настройки:

- ☐ **Plot data with thick lines** (Чертить данные толстыми линиями) — опция позволяет чертить диаграммы толстой линией. Полезно при создании картинок для публикации;
- ☐ **Use radian measure in waveform expressions** — использовать радианы в выражениях для диаграмм;
- ☐ **Replace "ohm" with capital Greek omega** — заменить "ohm" на заглавную букву Ω греческого алфавита;
- ☐ **Font** (Шрифт) — выбрать для окна плоттера шрифт System или Arial;
- ☐ **Font point size** (Размер шрифта) — выбрать размер для шрифта Arial.

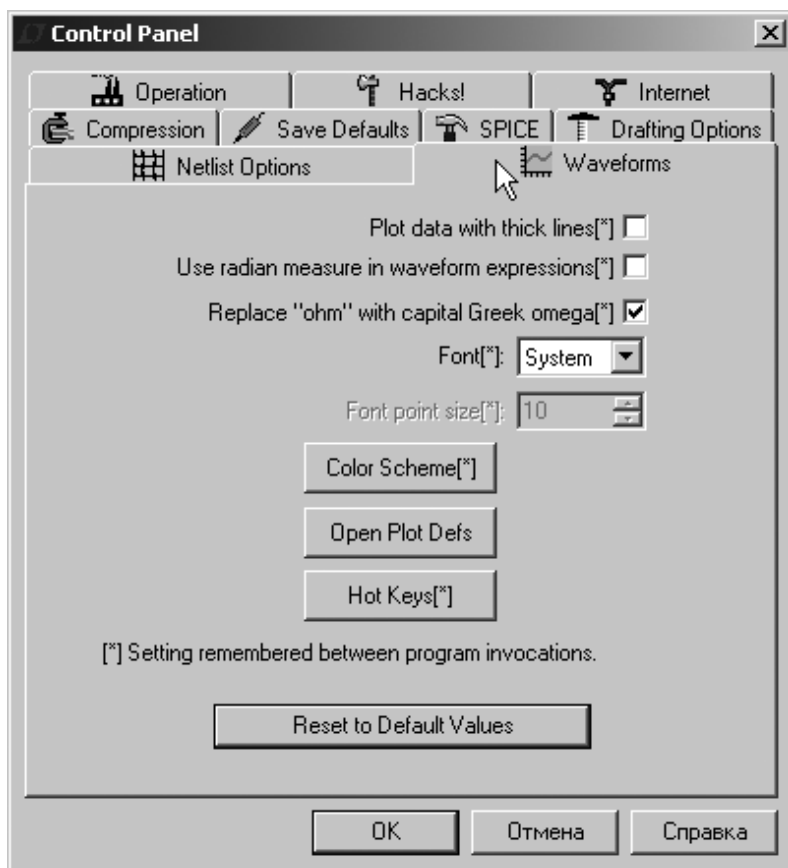


Рис. 5.24. Вкладка **Waveforms**

Кнопка **Color Schemes** (Цвета редактора схем) позволяет вызвать меню настройки цветов редактора, которое описано в *разд. 5.5*.

Кнопка **Plot Defs** позволяет отредактировать файл `Plot.defs`. Для чего этот файл нужен, описано в *главу 6*.

Кнопка **Hot Keys** (Горячие клавиши) позволяет вызвать окно **Keyboard Shortcut Map** (Карта быстрых клавиш), изображенное на рис. 5.22, предназначенное для программирования клавиатурных сокращений для большинства команд. Чтобы редактировать сокращение, нужно щелкнуть левой кнопкой мышки по требуемой команде, а затем ввести новую клавишу или сочетание клавиш. Чтобы удалить сокращение, нужно выделить требуемую команду, а затем нажать клавишу **Delete** (Удалить).

5.4.7. Вкладка *Operation*

Вкладка **Operation** (Функционирование), изображенная на рис. 5.25, позволяет настраивать некоторые параметры функционирования программы LTspice и содержит следующие опции и настройки:

- ☐ **Default Window Tile Pattern** (Образец укладки окон, принятый по умолчанию) — установить ориентацию длинной стороны окна по умолчанию. Возможна горизонтальная (Horz) и вертикальная (Vert) ориентация;
- ☐ **Marching Waveforms** (Вычерчивание диаграмм) — опция позволяет вычерчивание результатов моделирования в течение самого процесса моделирования;
- ☐ **Generate Expanded Listing** (Генерировать расширенный список) — опция выводит полный список связей, расширенный подсхемами, в файл отчета с расширением log;
- ☐ **Open Demo circuits as regular schematics** (Открывать демонстрационные схемы как обычные) — опция позволяет с помощью команды **File | Open** открывать демонстрационные схемы, расположенные в каталоге `.\LTspiceIV\lib\app*.app`. В этом случае можно увидеть все SPICE-команды демонстрационной схемы, которая может быть отредактирована и сохранена в новый файл;
- ☐ **Don't warn when using preliminary models** (Не предупреждать, когда используются предварительные модели) — выключить предупреждающее сообщение для всех SMPS-моделей (эти модели имеют правовую защиту);
- ☐ **Automatically delete .raw files** (Автоматически удалять RAW-файлы) — опция позволяет удалять файл данных после окончания моделирования. Использование данной опции позволяет снизить объем дискового пространства, используемого LTspice, но требует повторного моделирования после очередного открытия схемы;
- ☐ **Automatically delete .net files** (Автоматически удалять NET-файлы) — опция позволяет автоматическое удаление списка соединений после закрытия соответствующей схемы. Использование опции не оказывает существенного влияния на объем дискового пространства, но позволяет удалять лишние NET-файлы, загромождающие корневой каталог симулятора;

- ❑ **Automatically delete .log files** (Автоматически удалять LOG-файлы) — опция позволяет автоматическое удаление файла отчета после закрытия соответствующей схемы. Использование опции не оказывает существенного влияния на объем дискового пространства, но позволяет удалять лишние LOG-файлы, загромождающие корневой каталог симулятора;
- ❑ **Automatically delete .fft files** (Автоматически удалять FFT-файлы) — опция позволяет автоматическое удаление файла с результатами быстрого преобразования Фурье после закрытия соответствующей схемы. Использование данной опции позволяет снизить объем дискового пространства, используемого LTspice, но требует повторного моделирования после очередного открытия схемы;

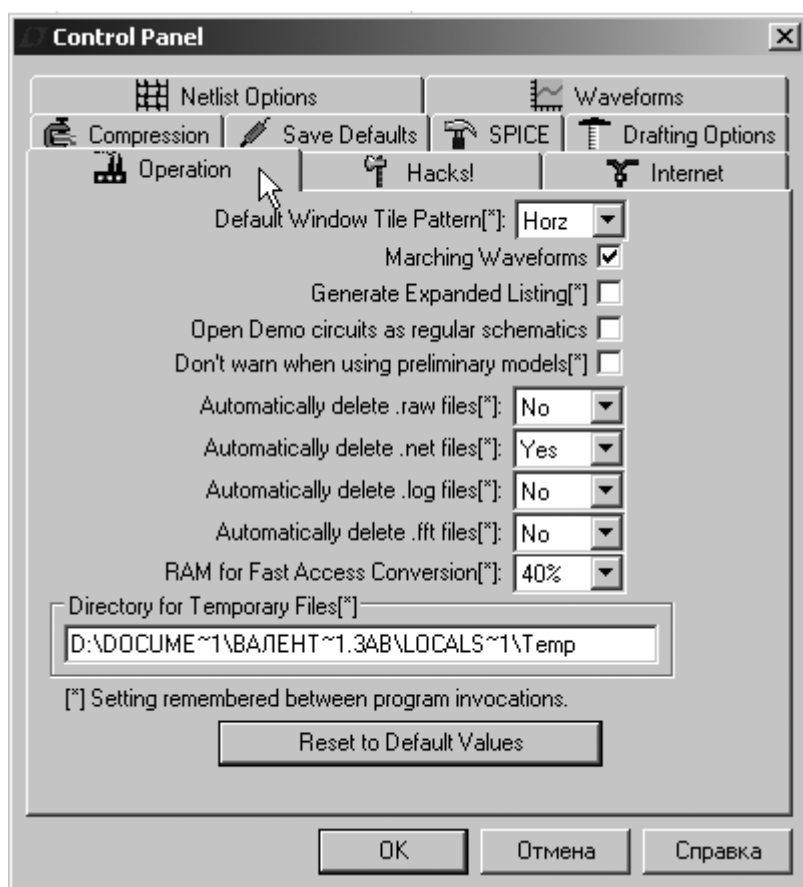


Рис. 5.25. Вкладка Operation

- ☐ **RAM for Fast Access Conversion** — процентный объем памяти для быстрого доступа к преобразованиям;
- ☐ **Directory for Temporary Files** — каталог для временного хранения данных моделирования и файлов изменений.

5.4.8. Вкладка *Hacks*

Вкладка **Hacks** ("Хакерские штучки"), изображенная на рис. 5.26, использовалась для внутренней разработки программы, но, по признанию разработчиков, к настоящему времени устарела.

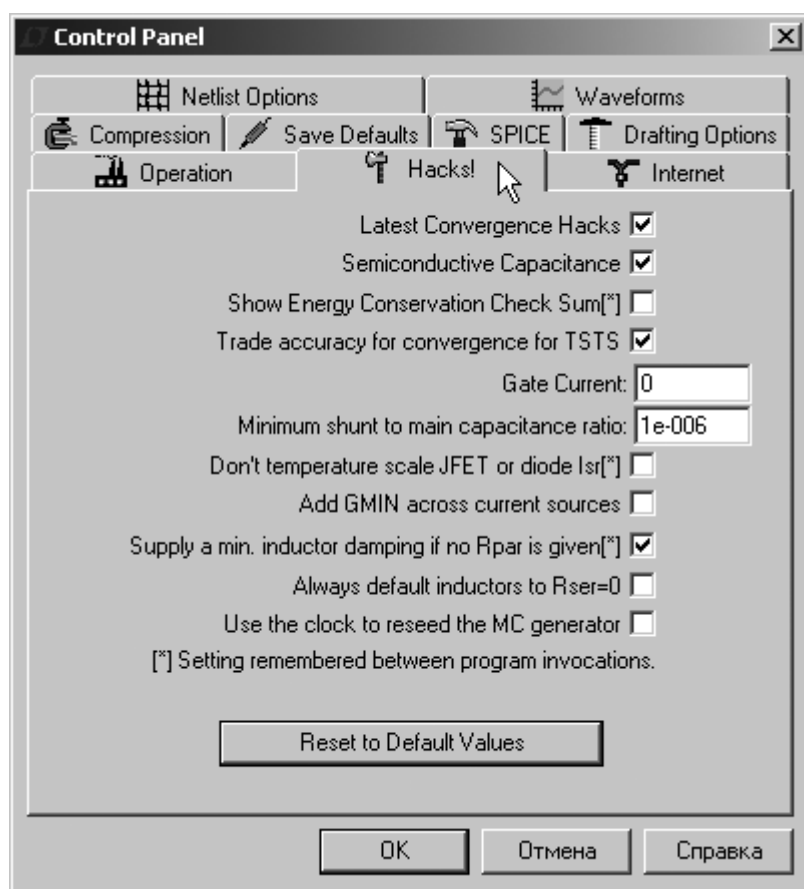


Рис. 5.26. Вкладка **Hacks**

Опции в этой вкладке рекомендуется не трогать. С помощью кнопки **Reset to Default Values** можно восстановить значение этих опций, принятое по умолчанию.

5.4.9. Вкладка *Internet*

Программа LTspice регулярно обновляется новыми характеристиками и моделями через Интернет. Обновление может активизировать пользователь, воспользовавшись командой меню **Tools** (Инструменты) | **Sync Release** (Синхронизировать версию). Если обновления не производились в течение двух месяцев, то LTspice сам предложит проверить обновления. Однако LTspice никогда не пытается получить доступ к Интернету без вашего ведома и разрешения. Разработчики гарантируют, что программа не шпионит за вами и не передает ваши данные сторонним лицам и организациям в процессе получения обновлений.

Вкладка панели управления **Internet** (Интернет), изображенная на рис. 5.27, используется для пошаговых обновлений через Интернет и содержит следующие опции и настройки:

- ☐ **Don't cache files** (Не кэшировать файлы) — опция позволяет запретить использование кэширования файлов для обновления;
- ☐ **Don't verify checksums** (Не проверять контрольную сумму) — в целях безопасности LTspice использует свой и конфиденциальный 128-битный алгоритм проверки суммы, подтверждающий успешное завершение приема файлов обновления из Интернета. С помощью данной опции идентификация может быть заблокирована в случае ошибки этого алгоритма. Однако за длительное время эксплуатации программы не было зарегистрированных случаев сбоя этого алгоритма и поэтому не рекомендуется нарушать эту характеристику безопасности.

В поле **Linear Technology Site** указан интернет-адрес сайта корпорации Linear Technology.

В поле **Connection Type** можно выбрать тип соединения. Кроме рекомендованного типа **Default**, когда LTspice использует высокий уровень операционной системы для интернет-доступа, возможны типы соединений **Direct Connection** (Прямое подключение), а также **Proxy Server** (Подключение через прокси-сервер), когда потребуется определить прокси-сервер и пароль.

Установки на этой панели не запоминаются между вызовами программы.

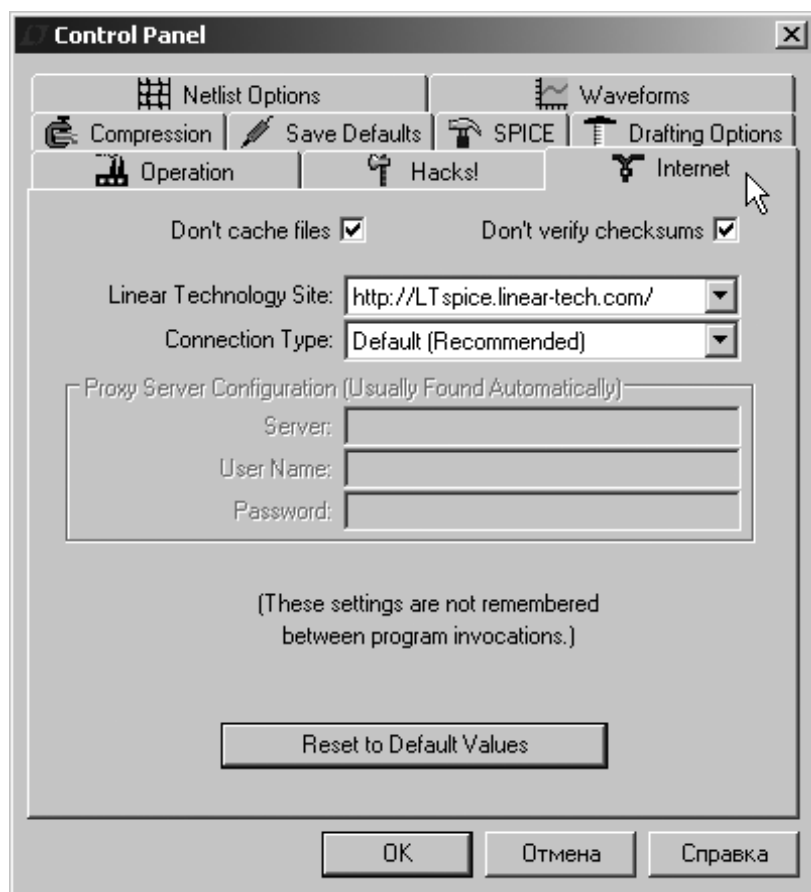


Рис. 5.27. Вкладка Internet

5.5. Окно *Color Preferences*

Цвета различных объектов редактора схем можно установить при помощи окна **Color Palette Editor** (Редактирование цветовой палитры), изображенного на рис. 5.28, которое вызывается при помощи команды меню **Tools** (Инструменты) | **Color Preferences** (Цветовые предпочтения). Требуемый объект можно выбрать в строке прокрутки **Selected Item** (Выбрать объект) или в образце схемы, наведя на него курсор и щелкнув левой кнопкой мышки. Настройка цвета объекта производится с помощью установки уровней красного

(Red), зеленого (Green) и синего (Blue) цветов в области **Selected Item Color Mix** (Выбор смеси цветов объекта). Уровни можно устанавливать напрямую, определяя их числовое значение, которое должно находиться в диапазоне от 0 до 255, или перемещая соответствующие движки.

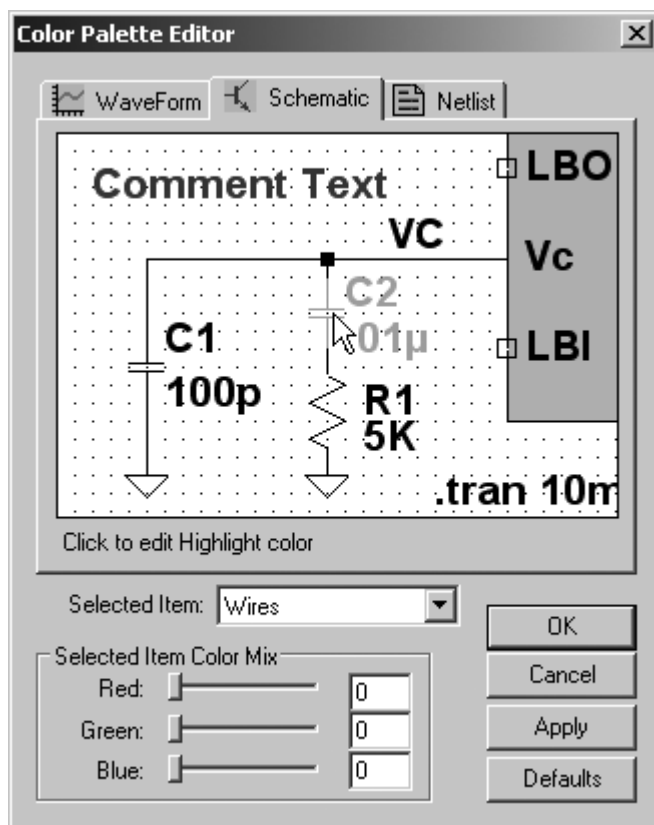


Рис. 5.28. Окно установки цветов

5.6. Команда *Export Netlist*

Редактор схем программы LTspice может с успехом использоваться в различных сборных системах сквозного проектирования электронной аппаратуры. В этом случае можно использовать команду меню **Tools** (Инструменты) |

Export Netlist (Экспортировать список связей), чтобы генерировать ASCII-список связей для программы трассировки печатных плат. Однако следует иметь в виду, что в этом случае нужно добиться того, чтобы порядок выводов в описании символов соответствовал порядку следования выводов в корпусах компонентов программы трассировки печатной платы. В противном случае может оказаться, что у диодов перепутаны анод с катодом, а у транзисторов коллектор с базой и т. п.

В настоящее время LTspice обеспечивает передачу списка связей в следующие программы трассировки: Accel, Algorex, Allegro, Applicon Bravo, Applicon Leap, Cadnetix, Calay, Calay90, CBDS, Computervision, EE Designer, ExpressPCB, Intergraph, Mentor, Multiwire, PADS, Scicards, Tango, Telesis, Vectron и Wire List.

ГЛАВА 6



Плоттер

Программа LTspice IV включает в себя плоттер, который служит для визуализации данных, полученных в процессе моделирования.

6.1. Окно плоттера

В ходе или по окончании моделирования редактор схем автоматически активизирует окно плоттера (рис. 6.1).

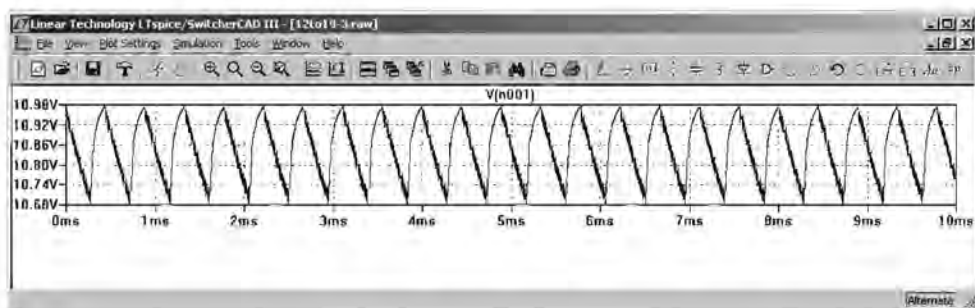



Рис. 6.1. Окно плоттера

Отличительным признаком этого окна является символ плоттера  в левой части панели команд. При необходимости для просмотра результатов моделирования, сохраненных в RAW-файл, можно запустить плоттер независимо, воспользовавшись командой **File (Файл) | Open (Открыть)**.

Панель команд содержит набор меню, свойственный только плоттеру:

- ❑ **File** (Файл) — позволяет осуществлять различные действия с файлами (рис. 6.2):
 - **New Schematic** (Новая схема) — начать создание новой схемы;

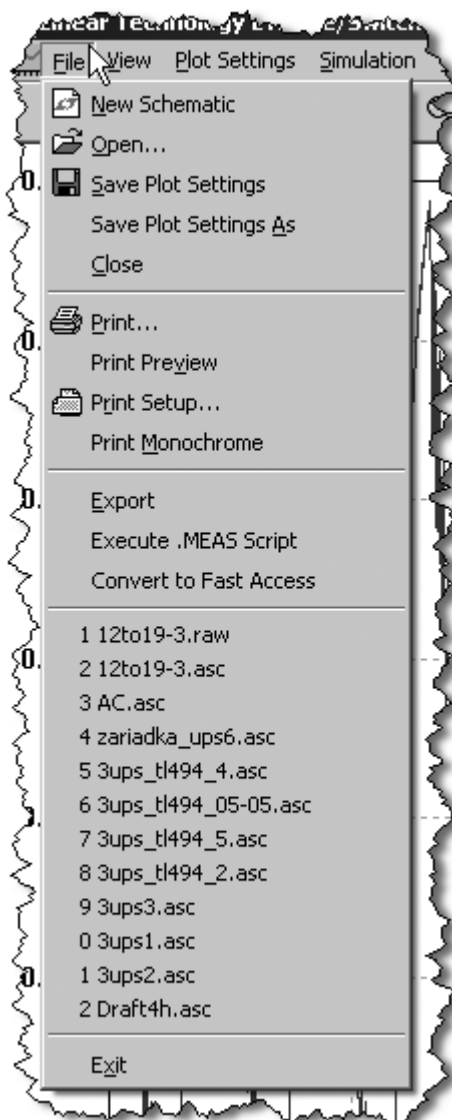


Рис. 6.2. Меню File

- **Open** (Открыть) — открыть существующий файл формата LTspice;
 - **Save Plot Setting** (Сохранить установки плоттера) — сохранить в PLT-файл настройки плоттера;
 - **Save Plot Setting As** (Сохранить установки плоттера как) — сохранить настройки плоттера под другим именем;
 - **Close** (Заккрыть) — закрыть окно плоттера;
 - **Print** (Печать) — печатать область окна плоттера, отображенного на экране;
 - **Print Preview** — предварительный просмотр изображения, выводимого на печать;
 - **Print Setup** (Настройка печати) — можно выбрать принтер, а также размер и ориентацию листа;
 - **Print Monochrome** (Черно-белая печать) — выбор этого пункта позволяет печатать цветные изображения, как черно-белые;
 - **Export** (Экспорт) — сохранить выбранные данные из окна плоттера в текстовый файл;
 - **Execute .MEAS Script** — загрузить и выполнить скрипт директивы .MEAS;
 - **Convert to Fast Access** (Конвертировать в быстрый доступ) — конвертировать текущие данные плоттера в формат быстрого доступа;
 - История открытия файлов, позволяет повторно выбирать любой из двенадцати последних файлов, с которыми работал редактор схем;
 - **Exit** (Выйти) — закрыть все открытые документы и выйти из программы. Если в документах были сделаны какие-то изменения, то перед закрытием будет предложено сохранить сделанные изменения.
- **View** (Просмотр) — управление режимом просмотра изображения в окне плоттера (рис. 6.3):
- **Zoom Area** (Увеличить область) или <Ctrl>+<Z> — увеличить изображение;
 - **Zoom Back** (Уменьшить) или <Ctrl>+ — уменьшить изображение;
 - **Zoom to Fit** (Подогнать окно) — выбрать масштаб отображения, обеспечивающий лучшее заполнение окна плоттера;

- **Pan** (Панорамировать) — отметить точку, которая должна быть в центре окна плоттера;
- **FFT** — выполнить быстрое преобразование Фурье для выбранных данных;
- **Toolbar** (Панель инструментов) — вывести/убрать панель инструментов;
- **Status Bar** (Панель состояния) — вывести/убрать панель состояния;
- **Windows Tabs** (Раскладка окон) — вывести/убрать панель вложенных окон.

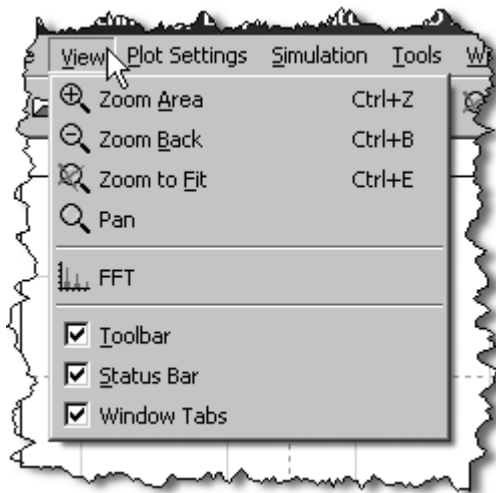


Рис. 6.3. Меню View

- **Plot Setting** (Настройки плоттера) — позволяют осуществлять различные установки в окне плоттера (рис. 6.4):
- **Visible Traces** (Отображаемые диаграммы) — из перечня доступных данных выбрать данные для графического отображения;
 - **Add trace** (Добавить диаграмму) или **<Ctrl>+<A>** — добавить диаграмму в окно плоттера;
 - **Delete Traces** (Удалить диаграмму) или **<F5>** — удалить диаграмму из окна плоттера;

- **Select Steps** (Выбрать шаги) — выбрать для отображения определенный шаг. Используется для моделирования с пошаговым изменением параметра;
- **Add Plot Pane** — добавить новое окно плоттера;
- **Delete Active Pane** — удалить активное окно плоттера;
- **Sync. Horiz. Axes** — синхронизировать горизонтальные оси для различных диаграмм;
- **Grid (Сетка)** — вывести сетку в окне плоттера;
- **Reset Colors** (Сбросить цвета) — установить цвета отдельных диаграмм в соответствии с порядком их выбора для отображения;
- **Mark Data Points** (Ответить точки данных) — отображать точки, соответствующие временному шагу вычислителя;
- **Eye Diagram** — исследовать диаграмму:
 - ◇ **Enable** (Разрешить) — опция неактивна;
 - ◇ **Properties** (Свойства) — опция неактивна;
- **Undo** (Отменить) или <F9> — отменить предыдущее действие;
- **Redo** (Вернуть) или <Shift>+<F9> — вернуть отмененное действие;
- **Autorange Y-axis** или <Ctrl>+<Y> — автоматически выбирать масштаб по оси Y;
- **Manual Limits** — определить крайние значения и деления вертикальной и горизонтальной осей;
- **Autoranging** — авторасположение;
- **Notes & Annotations** (Примечания и комментарии) — с помощью этого пункта меню можно вставлять в окно плоттера примечания и комментарии, что облегчает публикацию диаграмм на различных информационных ресурсах:
 - ◇ **Label Curs. Pos.** — подписать координаты позиции курсора;
 - ◇ **Place Text** — вставить текстовое сообщение;
 - ◇ **Draw Arrow** — нарисовать стрелку;
 - ◇ **Draw Line** — нарисовать линию;
 - ◇ **Draw Box** — нарисовать квадрат;
 - ◇ **Line Style/Color** — изменить стиль/цвет линии;

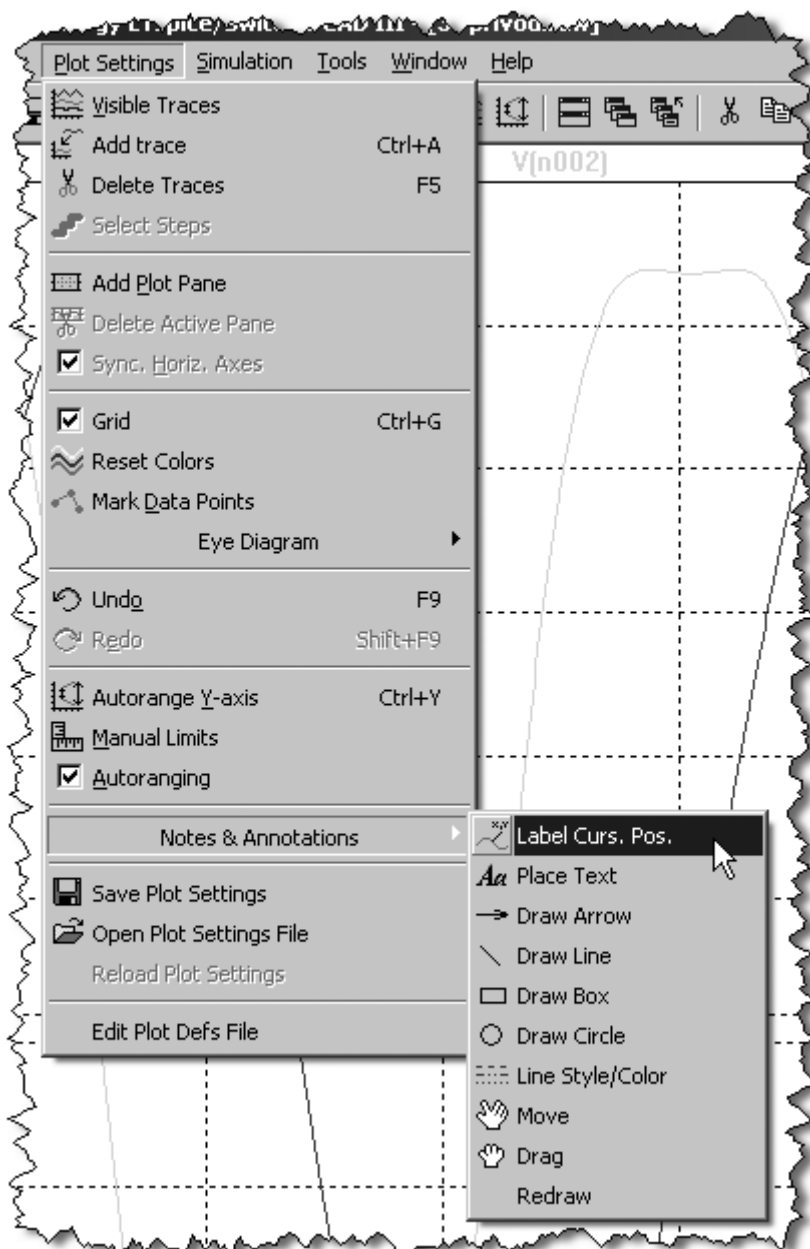


Рис. 6.4. Меню Plot Setting

- ◇ **Draw Circle** — нарисовать круг;
 - ◇ **Move** — переместить объект;
 - ◇ **Drag** — перетянуть объект;
 - ◇ **Redraw** — обновить объекты;
 - **Save Plot Setting** (Сохранить настройки плоттера) — сохранить в PLT-файл настройки плоттера;
 - **Open Plot Setting File** (Открыть файл настроек плоттера) — открыть PLT-файл настройки плоттера;
 - **Reload Plot Settings** (Перезагрузить настройки плоттера) — перезагрузить PLT-файл настройки плоттера;
 - **Edit Plot Defs File** — редактировать файл plot.defs.
- **Simulation** (Моделирование) — управление процессом моделирования (рис. 6.5):
- **Run** (Запустить) — запустить моделирование;
 - **Stop** (Остановить) или <Ctrl>+<H> — остановить моделирование;
 - **Marching Waves** — вывод диаграмм в окне плоттера:
 - ◇ **(Re-)Start** — начать или возобновить;
 - ◇ **Pause** (Пауза) — приостановить;
 - **Tools** (Инструменты) — различные инструменты. Аналогично одноименному меню редактора схем;
 - **Windows** (Окна) — управление окнами программы LTspice. Аналогично одноименному меню редактора схем;
 - **Help** (Помощь) — информационное меню. Аналогично одноименному меню редактора схем.

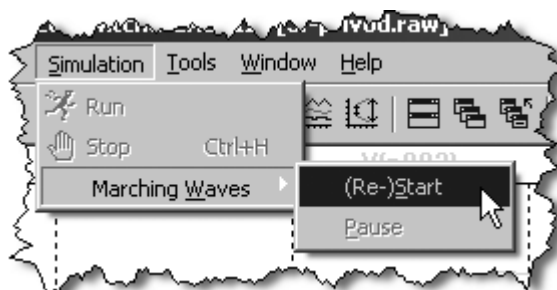


Рис. 6.5. Меню Simulation

6.2. Выбор данных

Выбор данных для отображения в окне плоттера возможен с помощью одного из трех способов.

1. Прямое зондирование схемы.
2. Выбор напряжений и токов из окна **Select Visible Waveform** (Выбор отображаемых диаграмм), которое вызывается командой **Plot Settings** (Настройки плоттера) | **Visible Traces** (Отображаемые диаграммы).
3. Добавление напряжений и токов из окна **Add Traces to plot** (Добавить диаграмму в плоттер), которое вызывается командой **Plot Settings** (Настройки плоттера) | **Add trace** (Добавить диаграмму).

6.2.1. Прямое зондирование схемы

Самым простым и показательным способом получения данных для плоттера является прямое зондирование схемы. Чтобы получить диаграмму напряжения в определенной точке (узле) схемы, нужно подвести к ней курсор и когда тот преобразуется в измерительный щуп (рис. 6.6) щелкнуть левой кнопкой мышки. Этот способ очень удачно имитирует измерительный процесс на реальном устройстве.

Чтобы получить диаграмму тока, протекающего через резистор, конденсатор, индуктивность и любой другой двухвыводной компонент, нужно совместить курсор с символом компонента и, когда тот преобразуется в некоторое подобие токовых клещей, щелкнуть левой кнопкой мышки. Чтобы получить диаграмму тока, протекающего в одном из выводов многовыводного компонента, нужно совместить курсор с соответствующим выводом и поступить аналогичным образом (рис. 6.7). При необходимости ток можно измерить в любой линии электрической связи даже в отсутствие компонента. Для этого совмещаем курсор с требуемой линией и когда тот преобразуется в измерительный щуп, преобразуем его в токовые клещи, нажав и удерживая клавишу <Alt>. Стрелочка на токовых клещах показывает положительное направление тока, принятое для данного участка цепи.

Чтобы получить диаграмму напряжения между различными узлами, нужно подвести курсор к первому узлу и, когда тот преобразится в щуп красного цвета, нажать и удерживать левую кнопку. При этом красный щуп зафиксируется в районе первого узла, а курсор превратится в щуп серого цвета. Далее

подводим серый щуп ко второму узлу и, когда его цвет изменится на черный, отпускаем левую кнопку мышки.

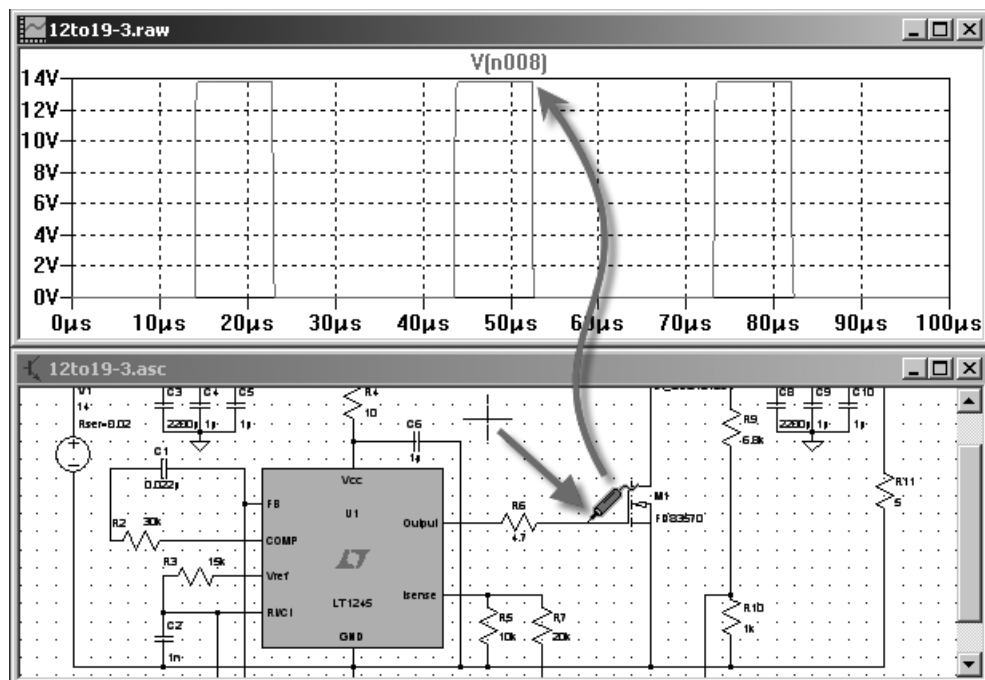



Рис. 6.6. Получение диаграммы напряжения в определенной точке схемы

Если много измерений делается относительно одного и того же узла, который не является "землей", то можно воспользоваться командой **View** (Просмотр) | **Set Probe Reference** (Установить опору измерения). После выполнения команды появляется измерительный щуп серого цвета, который подводят к опорному узлу и щелкают левой кнопкой мышки, когда его цвет изменяется на черный. В результате щуп закрепляется к опорному узлу и все последующие измерения делаются относительно его потенциала. Чтобы отменить опорный узел, нужно повторно воспользоваться командой **View** | **Set Probe Reference**, а затем нажать клавишу <Esc> или правую кнопку мышки.

Кроме измерения тока и напряжения, прямое зондирование позволяет измерять мгновенную и среднюю мощность, рассеиваемую на различных компонентах схемы. Измерение мгновенной мощности производится аналогично

измерению тока, но когда курсор преобразится в токовые клещи нужно нажать кнопку <Alt>. В этом случае симулятор "поймет", что требуется изме-

рение мощности, и превратит токовые клещи в термометр . После этого, нажав левую кнопку мышки, можно вывести в окно плоттера диаграмму мгновенной мощности, рассеиваемой на компоненте.

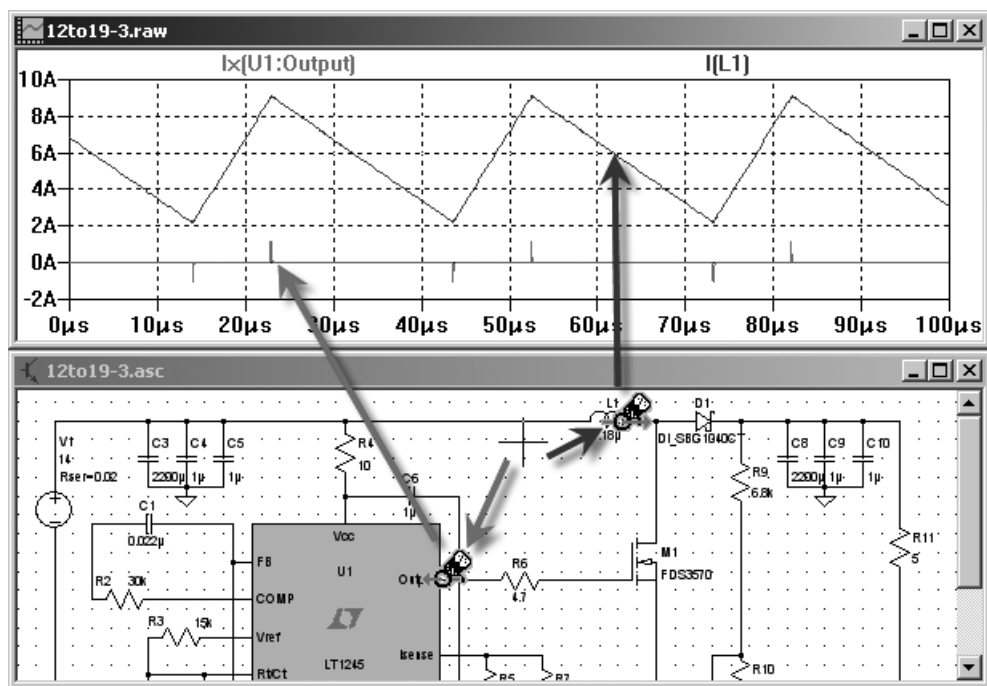



Рис. 6.7. Получение диаграммы протекающего тока

Чтобы определить среднее значение любой диаграммы, отображаемой в окне плоттера, нужно, нажав и удерживая клавишу <Ctrl>, щелкнуть левой кнопкой мышки по имени диаграммы. В этом случае для напряжений и токов рассчитываются среднее (**Average**) и средне квадратичное (**RMS**) значения (рис. 6.8), а для мгновенной мощности средняя (**Average**) мощность и суммарная (**Integral**) энергия (рис. 6.9).

Если какой-то ток или напряжение выбрать два раза подряд, то в окне плоттера будет оставлена только его диаграмма, а все остальные будут стерты. Для удаления диаграмм можно, находясь в активном окне плоттера, нажать

функциональную клавишу <F5> и иконку  на панели инструментов.

В результате курсор превратится в ножницы , с помощью которых можно удалить любую диаграмму, просто щелкнув левой кнопкой мышки по ее названию.

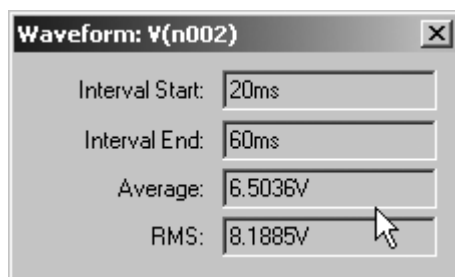


Рис. 6.8. Среднее и среднеквадратичное (действующее) значение диаграммы за отображаемый период

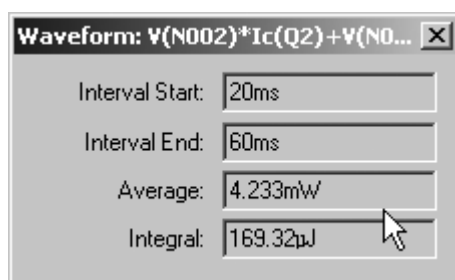



Рис. 6.9. Средняя мощность и суммарная энергия за отображаемый период

Описанный выше способ зондирования работает на всех уровнях схемной иерархии, но для нижних уровней необходимо явно разрешить симулятору накапливать данные. Данные о напряжениях в нижних уровнях иерархии разрешаются установкой опции **Tolls** (Инструменты) | **Control Panel** (Панель управления) | **Save Default** (Сохранения по умолчанию) | **Save Subcircuit Node Voltages** (Сохранять узловые напряжения подсхем). Данные о токах в нижних уровнях иерархии разрешаются установкой опции **Tolls** (Инструменты) | **Control Panel** (Панель управления) | **Save Default** (Сохранения по умолчанию) | **Save Subcircuit Device Currents** (Сохранять токи устройств подсхем).

6.2.2. Выбор напряжений и токов из окна *Select Visible Waveform*

В процессе и по окончании моделирования все напряжения и токи схемы перечислены в окне **Select Visible Waveform** (Выбор видимости диаграмм). Это окно вызывается командой **Plot Settings** (Настройки плоттера) | **Visible Traces** (Видимость диаграмм), а также с помощью иконки  на панели инструментов и может быть использовано для выбора параметров, отображаемых в окне плоттера.

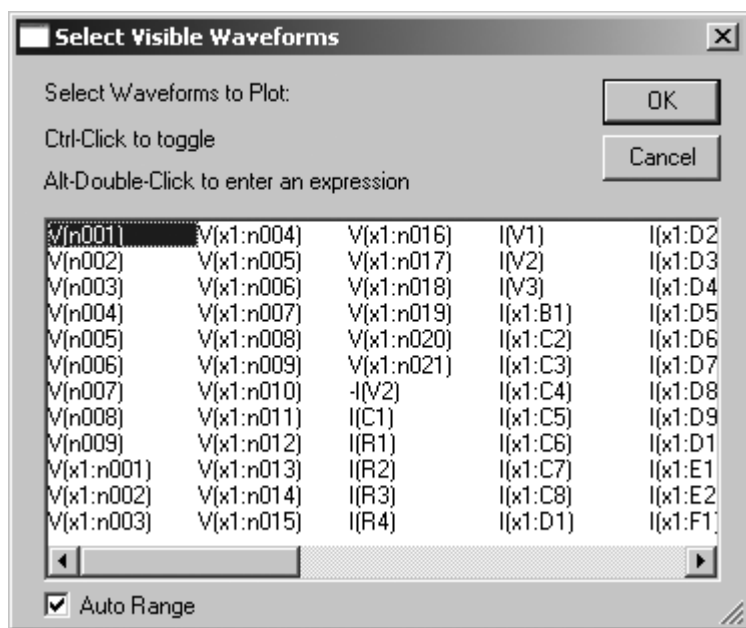


Рис. 6.10. Окно **Select Visible Waveform**

Чтобы выбрать какой-то параметр для отображения, достаточно щелкнуть по нему левой кнопкой мышки. Удерживая клавишу <Ctrl> можно выбрать несколько параметров. Если какой-то параметр предполагается использовать в качестве аргумента математического выражения, то для создания этого выражения можно вызвать окно **Expression Editor** (Редактор выражений), изображенное на рис. 6.12, удерживая клавишу <Alt> и дважды щелкнув по названию параметра.

6.2.3. Добавление напряжений и токов из окна *Add Traces to plot*

Окно **Add Traces to plot** (Добавить диаграмму в плоттер), изображенное на рис. 6.11, вызывается командой **Plot Settings** (Настройки плоттера) | **Add Trace** (Добавить диаграмму) или комбинацией клавиш <Ctrl>+<A>. Это окно очень похоже на окно **Select Visible Waveform** (Выбор видимости диаграмм), описанное в предыдущем пункте, но в отличие от него имеет два очень полезных дополнения.

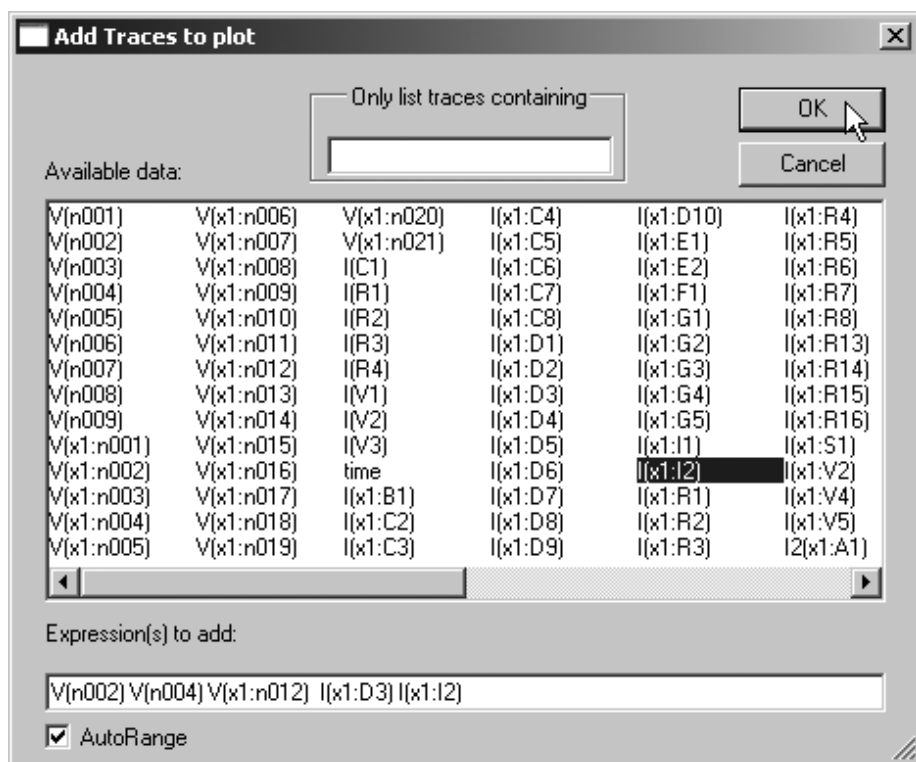


Рис. 6.11. Окно **Add Traces to plot**

Первым дополнением является строка **Only list traces containing** (Только диаграммы содержащие), которая позволяет выбирать данные по образцу. Например, введем в этой строке символ "I" и в окне останутся одни токи. А если ввести символ "V", то останутся одни напряжения.

Вторым дополнением является строка **Expression(s) to add** (Добавить выражение). В этой строке можно формировать список параметров и выражений на их основе, предназначенных для вывода в окне плоттера. Чтобы переместить в эту строку нужный параметр, достаточно щелкнуть по нему левой кнопкой мышки. Отдельные параметры и выражения общего списка разделяются между собой пробелами. Чтобы вывести полученный список в окно плоттера нужно нажать кнопку **ОК**.

6.3. Настройка диаграмм и измерения в окне плоттера

В верхней части окна плоттера выводятся имена для диаграмм, отображаемых в настоящий момент. В общем случае в качестве имени диаграммы используется выражение для ее вычисления. В простейшем случае используется обозначение соответствующего узлового напряжения или тока компонента. Диаграмма и ее имя отображаются одним цветом. Чтобы получить доступ к настройке диаграммы, нужно совместить курсор с ее именем и, когда тот преобразуется в указательный палец, нажать правую кнопку мышки. Результатом будет появление окна **Expression Editor** (Редактор выражения), изображенного на рис. 6.12.

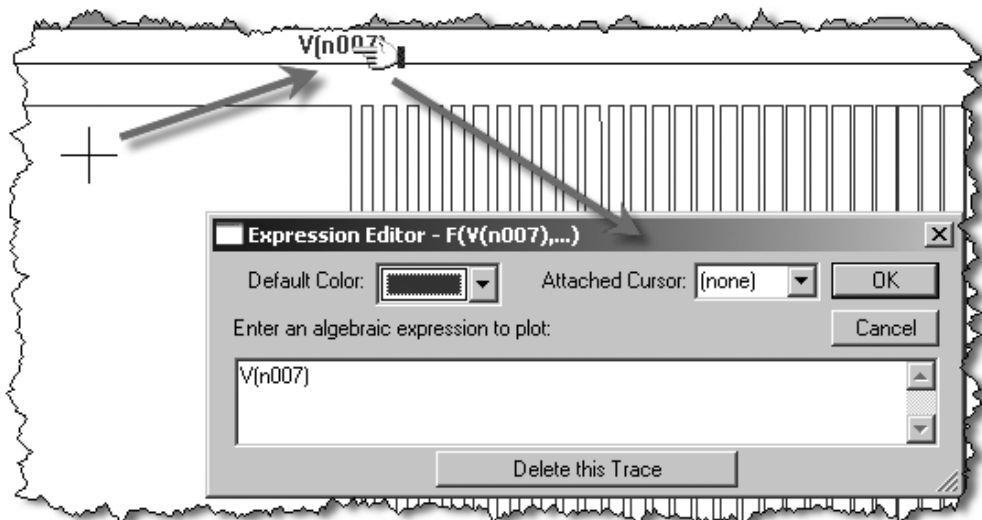


Рис. 6.12. Окно настройки диаграммы

Судя по названию, основным назначением этого окна является редактирование выражения, описывающего диаграмму. Но, кроме этой основной функции, в поле прокрутки **Default Color** (Цвет по умолчанию) можно выбрать цвет диаграммы, а в поле **Attached Cursor** (Прикрепить курсор) прикрепить к диаграмме специальный измерительный курсор.

Курсор выглядит как перекрестие из двух пунктирных линий, которое всегда совмещено с диаграммой. Удерживая измерительный курсор левой кнопкой мышки, его можно таскать туда-сюда вдоль соответствующей диаграммы. При этом в специальном контрольном окошечке (рис. 6.13) будут отображаться текущие координаты курсора. Возможны следующие варианты этого курсора:

- ☐ **(none)** — нет курсора;
- ☐ **1st** (первый курсор) — устанавливается на отдельную диаграмму;
- ☐ **2nd** (второй курсор) — устанавливается на отдельную диаграмму;
- ☐ **1st & 2nd** (первый и второй курсор) — на одну диаграмму устанавливаются два курсора.

Если используются два измерительных курсора, то в области **Diff (cursor2 — cursor1)** окна курсоров будет вычисляться расстояние между ними в горизонтальном (**Horz**) и вертикальном (**Vert**) направлениях, а также соответствующие этим расстояниям частота (**Freq**) и наклон (**Slope**).

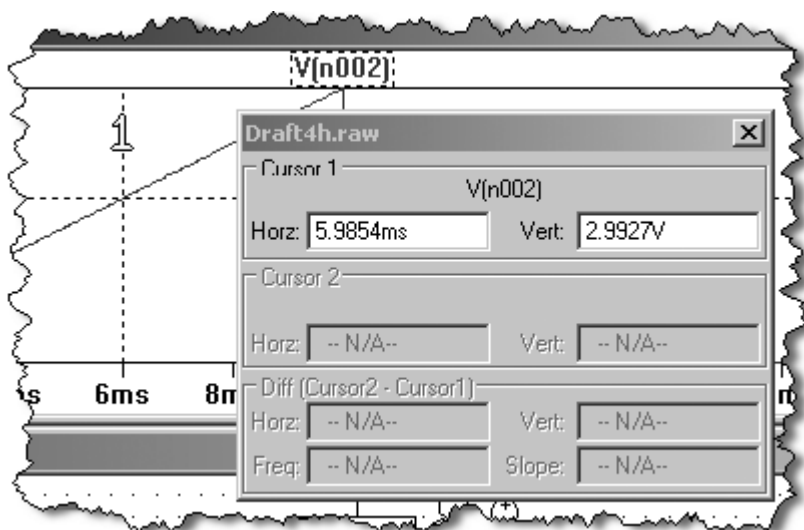



Рис. 6.13. Окно измерительных курсоров

6.4. Изменение масштаба изображения

В процессе прорисовки диаграмм плоттер автоматически поддерживает масштаб, обеспечивающий наилучшее заполнение окна. Однако при необходимости можно изменить масштаб отображения. Например, чтобы увеличить некоторую область диаграммы, можно воспользоваться иконкой , расположенной на панели инструментов, или командой меню **View** (Просмотр) | **Zoom Area** (Увеличить область). Далее, удерживая нажатой левую кнопку мышки, следует выделить требуемый фрагмент изображения. Когда кнопка мышки будет отпущена, выделенный фрагмент полностью заполнит окно плоттера (рис. 6.14).

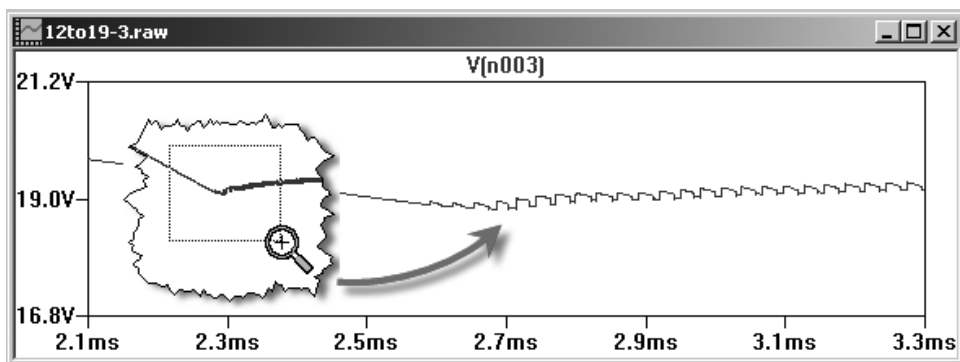





Рис. 6.14. Увеличение фрагмента диаграммы

Изображение можно уменьшить при помощи команды меню **View** (Просмотр) | **Zoom Back** (Уменьшить) или щелкнув по иконке , которая расположена на панели инструментов. Там же есть иконки  и , с помощью которых можно панорамировать изображение и обеспечивать наилучшее заполнение окна плоттера.

6.5. Обработка данных

Как было сказано выше, в окне плоттера можно проводить дополнительную математическую обработку информации, полученной в процессе моделирования. Ранее уже были рассмотрены способы вычисления среднего и дейст-

вующего значения диаграммы (см. *разд. 6.2.1*), а также ее разложение в ряд Фурье (меню **View**). Но кроме этих заранее определенных алгоритмов обработки пользователь может сам писать свои алгоритмы в виде математических выражений.

В случае прямого зондирования схемы (см. *разд. 6.2.1*) математическое выражение записывается в области **Enter an algebraic expression to plot** (Ввести алгебраическое выражение в плоттер) окна **Expression Editor** (Редактор выражений), изображенного на рис. 6.12.

В случае выбора напряжений и токов из окна **Select Visible Waveform** (Выбор видимости диаграмм), рассмотренного в *разд. 6.2.2*, для записи математического выражения нужно вызвать окно **Expression Editor** (Редактор выражения), изображенное на рис. 6.12. Для этого, удерживая клавишу <Alt>, необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мышки по любому параметру.

В случае добавления напряжений и токов из окна **Add Traces to plot** (Добавить диаграмму в плоттер), рассмотренного в *разд. 6.2.3*, для записи математического выражения нужно использовать строку ввода **Expression(s) to add** (Добавить выражение).

Выражение может включать в себя все напряжения и токи схемы, математические и логические операции, а также различные математические и логические функции.

Математические и логические операции, доступные в алгебраических выражениях, сгруппированы в табл. 6.1 в порядке уменьшения приоритета.

Таблица 6.1. Математические и логические операции

Операции	Описание
@	Оператор выбора шага
!	Преобразовать следующее выражение в один из двух логических размеров и инвертировать
**	Символ возведения в степень. Возвращается только вещественная часть, т. е. $-1^{**}0.5$ даст ноль, а не i
*	Умножение с плавающей точкой
/	Деление с плавающей точкой
+	Сложение с плавающей точкой
-	Вычитание с плавающей точкой

Таблица 6.1 (окончание)

Операции	Описание
<	Истинно, если выражение слева меньше выражения справа, в противном случае ложно
>	Истинно, если выражение слева больше выражения справа, в противном случае ложно
<=	Истинно, если выражение слева меньше или равно выражению справа, в противном случае ложно
>=	Истинно, если выражение слева больше или равно выражению справа, в противном случае ложно
&	Преобразовать выражение в один из двух логических размеров и затем AND
^	Преобразовать выражение в один из двух логических размеров и затем XOR
	Преобразовать выражение в один из двух логических размеров и затем OR

Оператор выбора шага @ позволяет выбрать данные для определенного шага при многошаговых анализах step, temp или DC. Например, выражение $v(1) @ 3$ выводит напряжение $v(1)$ для третьего шага моделирования.

Для комплексных данных доступны только арифметические операции +, −, *, /, **, а также оператор выбора шага @. Кроме этого, в случае комплексных данных в булев оператор XOR воспринимается как оператор возведения степень **.

Преобразование числовых значений в логические (булевы) производится по следующему алгоритму — если значение больше чем 0.5, то преобразуется в логическую единицу, если равно или меньше 0.5, то в логический ноль.

Ключевое слово TRUE (Истина) эквивалентно числу 1, а ключевое слово FALSE (Ложь) эквивалентно 0.

При вычислении выражения LTspice сам определяет размерность выражения и соответствующим образом обозначает ее при выводе результатов в окно плоттера.